# برنامه‌ریزی بهینه شبکه‌های فشار متوسط با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و ذخیره سازهای انرژی

**علیرضا خان‌بابا[1]، میثم امیراحمدی[2*]**

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی برق، گروه فنی و مهندسی، پردیس علوم و تحقیقات سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان- ایران
۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
* سمنان- ایران، ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵، meisam_amirahmadi@yahoo.com

**چکیده**

در این مقاله یک روش برای مکان‌یابی و اندازه‌یابی بهینه منابع تولید پراکنده و سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. توابع هدف این مقاله شامل بهبود در پروفیل ولتاژ شین‌های شبکه، کاهش تلفات شبکه توزیع و همچنین کمینه‌سازی هزینه‌های نصب و بهره‌برداری منابع تولید پراکنده و سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری می‌باشد. در این مقاله از تکنولوژی پیل سوختی با تولید همزمان گرما و برق به عنوان منابع تولید پراکنده و از باتری‌های نیکل/کادمیوم به عنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری استفاده شده است. همچنین از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار حل مسئله بهینه‌سازی، از شبکه توزیع شعاعی ۳۳ شینه IEEE به عنوان سیستم تست و از روش جاروب رفت و برگشت به عنوان روش پخش بار در این مقاله استفاده شده است.

**کلیدواژگان**

مکان‌یابی و اندازه‌یابی، منابع تولید پراکنده و سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، الگوریتم ژنتیک.

# Optimal Expansion Planning of MV Power Systems Considering Distributed Generations and Energy Storage Systems

**Alireza Khanbaba[1], Meisam Amirahmadi[2*]**

1- Msc student of power engineering, Department of Engineering, Semnan Science and Research Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran.
2- Assistant Professor, Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
* P.O.B. 1477893855 Semnan, Iran, Meisam_amirahmadi@yahoo.com

**Abstract**

In this paper, an approach is proposed for optimum placement and sizing of distributed generation (DG) and battery energy storage system (BESS) in distribution networks. The objective functions in this paper are includes voltage profile improvement of network busses, loss reduction of distribution system, and minimization of installing and operation costs of both DG and BESS. In this paper, the fuel cell-Combined heat and power (CHP) technology is used as DG and nickel/cadmium (Ni/Cd) batteries is used as BESS. It also in this paper are used genetic algorithm (GA) as a means to solve the optimization problem, IEEE 33-bus radial distribution network as test system and Forward/backward sweep technique as load flow method.

**Keywords**

Placement and sizing, Distributed generation and Battery energy storage system, Loss reduction, Voltage profile improvement, Algorithm genetic.

## ۱- مقدمه

با توجه به کاهش سریع منابع فسیلی، محدودیت‌های زیست محیطی ایجاد شده و حرکت به سمت فناوری‌ها و انرژی‌های تجدیدپذیر، روند استفاده از منابع تولیدی غیرمتمرکز یا توزیع شده که اصطلاحاً منابع تولید پراکنده (DG[1]) نام دارند رو به افزایش است. DGها دارای فناوری‌های تولید برق تجدیدپذیر مانند توربین بادی (WT[2]) و فتوولتائیک (PV[3]) و منابع انرژی غیرتجدیدپذیر مانند دیزل ژنراتور، توربین‌های کوچک، توربین گازی، پیل‌های سوختی و غیره می‌باشند. یکی از مزایای مهم استفاده از DG به منظور تأمین بار شبکه‌های برق، امکان استفاده از انرژی‌های نو می‌باشد که اثرات زیست محیطی مطلوبی را به دنبال خواهد داشت [۱]. روند رشد استفاده از DGها به گونه‌ای است که در آینده نزدیک بر بازار برق تسلط خواهند داشت. بنابراین، طراحی و بهره‌برداری مناسب و بهینه از شبکه‌های توزیع به همراه استفاده از DGهای تجدیدپذیر به یک موضوع مهم تبدیل شده است. مزایای فنی استفاده از DGها شامل کاهش آلودگی محیط زیست، به حداقل رساندن تلفات توان، بهبود پایداری ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان سیستم و غیره می‌باشد [۲]. افزایش تقاضای برق و گسترش توسعه سیستم‌های توزیع می‌تواند منجر به افزایش تلفات شبکه و تخریب پروغیل ولتاژ شین‌های شبکه شود. اندازه و مکان مطلوب DGها جهت نصب و بهره‌برداری در شبکه‌های توزیع می‌بایست به دقت مورد بررسی قرار گیرد، لذا عدم مکان‌یابی و اندازه‌یابی مناسب این تجهیزات می‌تواند باعث معایبی چون افزایش در بارگذاری خطوط و ولتاژ شین‌ها بیش از حد مجاز و افزایش تلفات شبکه شود. یکی دیگر از معایب حضور DGها در شبکه‌های توزیع بحث عدم صرفه‌ی اقتصادی در بهره‌برداری از این تجهیزات در ساعات کم‌باری شبکه که اصطلاحاً خواب سرمایه نام دارد می‌باشد. بنابراین ذخیره‌سازی انرژی در ساعت کم باری و میان‌باری شبکه و استفاده از انرژی ذخیره‌شده در ساعات پیک بار شبکه به

۱- Distributed Generation
۲- Wind Turbine
۳- Photovoltaic

وسیله سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (ESS[1]) می‌تواند مزایای متعددی همچون پیک‌زدایی از منحنی بار شبکه، کمک به کاهش بیشتر تلفات و بهبود بهتر پروفیل ولتاژ را به دنبال داشته باشد [۳].

در دهه گذشته مطالعات بسیاری برای انتخاب محل و اندازه بهینه DGها [۴-۵] صورت گرفته است. در [۶] یک مرور کلی بر انواع DGها، تکنولوژی مورد استفاده برای DG، اصطلاحات مرتبط با آن و اهمیت مکان‌یابی این منابع صورت گرفته است. در [۷] یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه تحت عنوان الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO[2]) برای تعیین مکان و اندازه DG ارائه شده است. اهداف مد نظر در [۷] به حداقل رساندن هزینه‌ها و کاهش تلفات سیستم توزیع و بهینه‌سازی پروفیل ولتاژ می‌باشند. در [۸] چگونگی به کار بردن توابع توزیع احتمالی (PDF[3]) و محدودیت‌ها برای تعیین محل مناسب DG به منظور جلوگیری از مسائلی مانند افزایش بیش از حد ولتاژ یا قطع بار غیر منتظره ارائه شده است. در [۹] بهینه‌سازی تخصیص DG در سیستم توزیع نامتعادل در بارهای مصرفی مختلف و نامتقارن مطرح شده است. تابع هدف در نظر گرفته شده برای تخصیص DG عبارت است از به حداقل رساندن عواملی چون عدم تعادل ولتاژ، تلفات توان اکتیو، بهبود پروفایل ولتاژ و افزایش سود اقتصادی، که به صورت بهینه‌سازی چندمنظوره (روش بهینه پرتو) در شبکه‌های توزیع بررسی شده است. در [۱۰] یک روش برای مکان‌یابی بهینه DG با هدف کاهش تلفات توان اکتیو شبکه و محدوده مجاز سطح ولتاژ ارائه شده است. تلفات توان اکتیو شبکه توزیع شعاعی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN[4]) و فرمولاسیون مطرح شده به طور همزمان بوسیله‌ی کنترل سطح ولتاژ و میزان توان تزریقی تنظیم می‌شود. در [۱۱] هدف از مطالعه ارائه روشی برای تعیین محل نصب و ظرفیت بهینه‌ی سیستم ذخیره‌سازی انرژی باتری (BESS[5]) به منظور مسطح‌سازی بار است. در [۱۲] مکان‌یابی مناسب BESS در شبکه توزیع برق به منظور یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر صورت گرفته است. مطالعه انجام شده در [۱۲] بوسیله‌ی یک الگوریتم مبتنی بر حساسیت به تلفات و به منظور کاهش تلفات شبکه توزیع انجام گرفته است. در [۱۳] مکان و ظرفیت بهینه‌ی BESS در شبکه توزیع اکتیو (ADN[6]) بر اساس مدل بهینه چند هدفه که متمرکز بر اهدافی چون اصلاح پیک بار شبکه و بهبود کیفیت ولتاژ می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله با مطالعه کارهای انجام شده به مکان‌یابی و اندازه‌یابی بهینه و همزمان DG و BESS در شبکه توزیع شعاعی پرداخته شده است. در بخش ۲ این مقاله به تشریح مدل‌های ریاضی و فرمولاسیون مربوط به توابع هدف پرداخته شده است. در ادامه در بخش ۳ مطالعات عددی مسئله بیان شده است. سپس در بخش ۴ نتایج عددی حاصل از انجام بهینه‌سازی مدنظر در این مقاله آورده شده است که نتایج حاکی از کارایی روش پیشنهادی می‌باشد.

## ۲- مدل‌سازی تابع هدف مکان‌یابی و اندازه‌یابی بهینه DG و BESS

تابع هدف در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی مد نظر در این مقاله به صورت چند هدفه می‌باشد. اهداف مد نظر در تابع هدف چند هدفه شامل بهبود پروفیل ولتاژ شین‌های شبکه، کمینه‌سازی هزینه‌های DG و BESS و کاهش تلفات انرژی سالیانه شبکه می‌باشند. در ادامه مدل ریاضی مربوط به پروفیل ولتاژ شین‌های شبکه بیان می‌شود.

### ۲-۱- پروفیل ولتاژ

تابع پروفیل ولتاژ، تابعی از میزان انحراف ولتاژ شین‌ها می‌باشد. این تابع به صورت ضریبی در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$VIF = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{V}_{Bus,i}-1)^2} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، $VIF$ ضریب بهبود ولتاژ، $n$ تعداد شین‌های شبکه توزیع و $V_{Bus,i}$ انحراف ولتاژ شین $i$ ام می‌باشد.

### ۲-۲- هزینه DG

ضریب مربوط به هزینه DG به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$CF_{DG} = \frac{C_{DG}^{Inistalled}}{C_{Max.DG}^{Allowed\ for\ inistalling}} \qquad (۲)$$

که $CF_{DG}$ ضریب هزینه DG، $C_{DG}^{Inistalled}$ هزینه DGهای نصب شده در شبکه و $C_{Max.DG}^{Allowed\ for\ inistalling}$ ماکزیمم هزینه DGهای مجاز برای نصب که با توجه به محدودیت‌های مسئله قابل محاسبه است.

تابع هزینه تولید انرژی التریکی توسط DG برحسب دلار بر ساعت می تواند به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۱۴].

$$C_{DG} = \alpha + \beta \times P_{DG} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، $C_{DG}$ هزینه DG، $P_{DG}$ ظرفیت تولید DG و ضرایب $\alpha$ و $\beta$ بترتیب به صورت رابطه (۴) و (۵) تعریف می‌شوند.

$$\alpha = \frac{C_{DG}^{IC} \times P_{DG} \times IR}{LT_{DG} \times 365 \times 24 \times LF} \qquad (۴)$$

$$\beta = C_{DG}^{O\&M} + C_{DG}^{Fuel} \qquad (۵)$$

در روابط (۴) و (۵)، $C_{DG}^{IC}$ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه DG، $IR$ نرخ بهره، $LT_{DG}$ طول عمر DG، $LF$ ضریب بارگیری، $C_{DG}^{O\&M}$ هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری DG و $C_{DG}^{Fuel}$ هزینه سوخت DG که هزینه سوخت در مورد برخی از DGها مانند PV و WT که نیاز به سوخت ندارند صفر می‌باشد.

### ۲-۳- هزینه BESS

ضریب مربوط به هزینه BESS به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$CF_{BESS} = \frac{C_{BESS}^{Inistalled}}{C_{Max.BESS}^{Allowed\ for\ inistalling}} \qquad (۶)$$

که $CF_{DG}$ ضریب هزینه BESS، $C_{BESS}^{Inistalled}$ هزینه BESSهای نصب شده و $C_{Max.BESS}^{Allowed\ for\ inistalling}$ ماکزیمم هزینه BESS های مجاز برای نصب که با توجه به محدودیت‌های مسئله قابل محاسبه است.

هزینه BESSها شامل هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه تعویض و هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری می‌باشد. در BESSها دو پارامتر ظرفیت انرژی $(\mathrm{E_{BESS}})$ و ظرفیت توان $(\mathrm{P_{BESS}})$ بر روی هزینه‌های نامبرده تأثیر مستقیم دارند [۳] و [۱۵].

---

۱ – Energy Storage System
۲ - Honey Bee Mating Optimization
۳ - Probability distribution functions
۴ - Artificial Neural Network
۵ - Battery Energy Storage System
۶ - Active distribution network

**۲-۳-۱- هزینه سرمایه‌گذاری BESS**

هزینه سرمایه‌گذاری BESS شامل هزینه‌های واحد ذخیره‌ساز، تجهیزات الکترونیک قدرت و تعادل تأسیسات می‌باشد که در ادامه مدل ریاضی آنها بیان خواهد شد.

مجموع هزینه واحد ذخیره‌ساز از رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$SUC = SUCU \times \frac{E_{BESS}}{eff} \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، $SUC$ هزینه واحد ذخیره‌ساز بر حسب دلار و $SUCU$ هزینه واحد قسمت ذخیره‌ساز انرژی در سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر حسب $\$/kwh$ و $eff$ بازده باتری ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد. $E_{BESS}$ همان ظرفیت انرژی است واحد آن $kwh$ بوده و از رابطه (۸) محاسبه می‌گردد.

$$E_{BESS} = P_{BESS} \times H_O \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، $P_{BESS}$ ظرفیت توان بر حسب $kw$ و $H_O$ مدت زمان هر چرخه‌ی دشارژ سیستم است. در واقع $P_{BESS}$ ، همان ظرفیت آنیBESS است که سرعت شارژ و دشارژ را تعیین می‌کند.

هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت از (۹) به دست می‌آید.

$$PCS = PCSU \times P_{BESS} \quad (۹)$$

در رابطه (۹)، $PCS$ هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت برحسب دلار، $PCSU$ هزینه قطعات الکترونیک قدرت برای واحد توان بر حسب $\$/kwh$ می‌باشد.

از رابطه (۱۰) هزینه تعادل تأسیسات محاسبه می‌شود:

$$BOP = BOPU \times E_{BESS} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، $BOP$ هزینه تعادل تأسیسات برحسب دلار، $BOPU$ هزینه واحد ذخیره‌ساز انرژی برای تعادل تأسیسات بر حسب $\$/kwh$ می‌شود.

کل هزینه سرمایه‌گذاری به صورت (۱۱) تعریف می‌شود:

$$TCC = PCS + BOP + SUC \quad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱)، $TCC$ هزینه سرمایه‌گذاری کل بر حسب دلار می‌باشد. سپس هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه BESS بصورت رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد.

$$ACC = TCC \times CRF \quad (۱۲)$$

که $ACC$ هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه بر حسب دلار است.

**۲-۳-۲- هزینه تعویض سالیانه**

این امکان وجود دارد که عمر BESS از عمر کل پروژه کمتر باشد و نیاز به تعویض مجدد داشته باشد. هزینه تعویض را به صورت سالیانه می‌توان طبق (۱۳) محاسبه کرد.

$$A = F \times \left[ \left(1+i_r\right)^{-r} + \left(1+i_r\right)^{-2r} + \ldots \right] \times CRF \quad (۱۳)$$

که $A$ هزینه تعویض سالیانه بر حسب دلار، $F$ ارزش آینده هزینه تعویض بر حسب $\$/kwh$، $r$ دوره تعویض بر حسب سال وCRF، ضریب بازگشت سرمایه می‌باشد. در محاسبات هزینه تعویض، عمر باتری به صورت تعداد شارژ/دشارژ بیان می‌شود. دوره تعویض و ضریب بازگشت سرمایه به ترتیب از روابطه (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند.

$$r = \frac{C}{n \times D} \quad (۱۴)$$

$$CRF = \frac{\left(i_r \left(1+i_r\right)^y\right)}{\left(\left(1+i_r\right)^y - 1\right)} \quad (۱۵)$$

در رابطه (۱۴)، $C$ تعداد چرخه‌های شارژ/دشارژ در طول عمر ذخیره‌ساز، $n$ تعداد چرخه‌های شارژ/دشارژ در شبانه روز و $D$ تعداد روزهای عملیاتی واحد ذخیره‌ساز در سال می‌باشد. در رابطه (۱۵)، $i_r$ نرخ بهره و $y$ طول عمر $i$ امین BESS است.

نهایتاً هزینه تعویض سالیانه BESS از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$ARC = A \times \frac{E_{BESS}}{eff} \quad (۱۶)$$

**۲-۳-۳- هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری**

هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری از رابطه (۱۷) به دست می‌آید:

$$OMC = OM \times P_{BESS} \quad (۱۷)$$

که در رابطه (۱۷)، $OMC$ مجموع هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری سالیانه بر حسب دلار و $OM$ نیز هزینه ثابت بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری سالیانه برحسب $\$/kw.year$ می‌باشد.

در نهایت باتوجه به پارامترهای تأثیرگذار در هزینه سالیانه BESS ، تابع هزینه سالیانه سیستم ذخیره‌ساز انرژی $\left(C_{A,BESS}^{Total}\right)$ از رابطه (۱۸) بدست آورده می‌شود.

$$C_{A,BESS}^{Total} = ACC + OMC + ARC \quad (۱۸)$$

**۲-۴- تلفات انرژی سالیانه شبکه**

تلفات توان در شبکه‌های توزیع به عوامل متفاوتی بستگی دارد. با توجه به این موضوع که نسبت تلفات خطوط به سایر تلفات مانند تلفات ترانسفورماتورها بسیار بیشتر است بنابراین در این مطالعه تنها تلفات خطوط مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور محاسبه تلفات اکتیو شبکه توزیع در این مقاله از رابطه (۱۹) استفاده می‌شود.

$$L_{Active} = \sum_{k=1}^{n} r_k I_k^2 \quad (۱۹)$$

در رابطه (۱۹)، $L_{Active}$ تلفات اکتیو شبکه توزیع بر حسب $kw$، $r_k$ مقاومت خط $k$ام بر حسب اهم، $I_k$ جریان عبوری از خط $k$ام بر حسب $kA$ و $n$ تعداد کل خطوط شبکه است. با استفاده از رابطه (۱۹)، تلفات اکتیو سالیانه شبکه برای ۸۷۶۰ ساعت سال به شکل رابطه (۲۰) تعریف می‌شود.

$$L_{Active}^{Annual} = \sum_{h=1}^{8760} L_{Active} \quad (۲۰)$$

در نهایت ضریب تلفات اکتیو سالیانه شبکه به صورت رابطه (۲۱) محاسبه می‌گردد.

$$ALF = \frac{\left\{L_{Active}^{Annual}\right\}^{with\ DG\&BESS}}{\left\{L_{Active}^{Annual}\right\}^{without\ DG\&BESS}} \quad (۲۱)$$

**۲-۵- تابع هدف**

تابع هدف نهایی مربوط به مسئله بهینه‌سازی این مقاله به شکل یک تابع چند هدفه بصورت رابطه (۲۲) ارائه شده است.

$$O.F = VIF + CF_{DG} + CF_{BESS} + ALF \quad (۲۲)$$

**۲-۶- قیود و محدودیت‌ها**

قیودی که در این مسئله لحاظ شده‌اند، شامل موارد زیر است:

- قید ولتاژ: ولتاژ شین‌های شبکه باید در محدوده مجاز باشند.

$$V_i^{Min} < V_i < V_i^{Max} \quad (۲۳)$$

در رابطه (۲۳) $V_i$ مقدار ولتاژ هر شین و $V_i^{Min}$ و $V_i^{Max}$ بترتیب کمترین و بیشترین مقدار مجاز برای ولتاژ شین‌ها می‌باشد.

- محدودیت نصب DG و BESS: تعداد DGها قابل نصب روی هر شین شبکه بین ۰ تا ۵ عدد DG و تعداد BESSها قابل نصب روی هر شین شبکه بین ۰ تا ۳ عدد BESS محدود شده است.

$$0 \le N_{DG,Bus_i} \le 5 \quad (۲۴)$$

$$0 \le N_{BESS,Bus_i} \le 3 \quad (۲۵)$$

- معادلات پخش بار

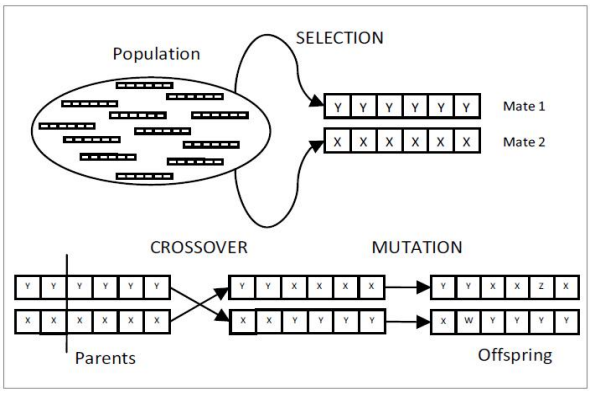
## ۳- مطالعات عددی

**۳-۱- الگوریتم ژنتیک**

الگوریتم ژنتیک (GA) یک روش بهینه‌سازی بر پایه جستجوی تصادفی می‌باشد. GA به صورت جمعیتی از افراد عمل می‌کند که هر فرد یک راه حل برای مسئله بهینه‌سازی می‌باشد. کیفیت هر راه‌حل بوسیله تابع تناسب اندام (Fitness) محاسبه و بررسی می‌شود. در GA این واقعیت وجود دارد که در هر جمعیت (Population) تنها افرادی که شانس بقای بیشتری دارند ژن‌های خود را به نسل بعد انتقال می‌دهند. افرادی که شانس بقای بیشتری دارند به عنوان والدین (Parent) انتخاب (Selection) می‌شوند. سپس با استفاده از عملیات ازدواج (Cross-over) فرزندان (Offspring) تشکیل می‌شوند. در مرحله بعد با بررسی احتمال وقوع جهش (Mutation) بر روی فرزندان جهش اعمال می‌شود. شکل (۱) مراحل انجام الگوریتم ژنتیک را نشان داده است. در بحث مکان‌یابی و اندازه‌یابی DG و BESS مد نظر این مقاله، در هر جمعیت هر افراد شامل مجموعه‌ای از DGها و BESSها روی باس‌های شبکه می‌باشد که می‌تواند یک راه‌حل برای نتیجه نهایی مسئله باشد.

**۳-۲- جاروب رفت و برگشت**

روش جاروب رفت و برگشت روشی قدرتمند و به طور گسترده در سیستم های توزیع استفاده می‌شود. این روش به صورت تکراری تا رسیدن به همگرایی تکرار می‌شود. در هر تکرار بارهای شبکه به صورت جریان ثابت مدل سازی می‌شوند [۱۶].




**شکل ۱** مراحل انجام الگوریتم ژنتیک (GA)

هر تکرار شامل دو مرحله می‌شود. مرحله ی اول که در آن جریان هر یک از شاخه‌های شبکه با جمع نمودن جریان بار شین‌ها محاسبه می‌شود (مرحله‌ی رفت) و مرحله‌ی دوم که با داشتن جریان و امپدانس شاخه‌ها، ولتاژ شین‌های مختلف شبکه محاسبه می‌شود (مرحله‌ی برگشت).

**۳-۳- تکنولوژی DG و BESS**

در این مقاله با بررسی تکنولوژی‌های مختلف DG مانند میکروتوربین‌ها و موتورهای احتراق‌گازی به صورت مجزا یا CHP، پیل سوختی با CHP، فتوولتائیک، توربین‌های بادی و توربین‌های گازی در نتیجه از پیل سوختی با CHP به عنوان DG در این مقاله استفاده شده است [۱۷]. همچنین با بررسی تکنولوژی‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی در این مقاله از باتری‌های نیکل/کادمیوم (Ni/Cd) استفاده شده است [۳]. اطلاعات مربوط به BESS و DG مورد استفاده در این مقاله بترتیب در جداول (۱) و (۲) بیان شده است.

به منظور پیاده‌سازی ساده‌تر BESS زمان شارژ و دشارژ BESSها یکسان و برابر ۸ ساعت فرض شده است. در واقع BESSها هر روز در ساعات کم باری شبکه شارژ شده و سپس در ساعات پیک بار انرژی ذخیره شده را به شبکه تزریق می‌کنند. رفتار شارژ و دشارژ BESSها دارای مزایای متعددی مانند مسطح‌سازی منحنی بار شبکه و عدم خواب سرمایه در ساعات کم‌باری می‌گردد.

**۳-۴- سیستم تست و مدل بار سالیانه**

به منظور بررسی عملکرد و کارایی روش پیشنهادی از شبکه توزیع شعاعی ۳۳ شینه IEEE به عنوان سیستم تست مورد مطالعه استفاده شده است. دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل (۲) نمایش داده شده است [۱۸].

**جدول ۱** مشخصات BESS (باتری نیکل/کادمیوم)

| پارامترهای باتری نیکل/کادمیوم | مقدار |
|---|---|
| توان نامی خروجی (kW) | ۱۰۰ |
| هزینه تعادل تأسیسات ($/kWh) | ۵۰ |
| هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری ($/kW-yr) | ۲۵ |
| هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت ($/kW) | ۱۷۵ |
| هزینه واحد ذخیره‌ساز ($/kWh) | ۶۰۰ |
| بازده (٪) | ۰/۶۵ |
| ارزش آینده هزینه تعویض ($/kWh) | ۶۰۰ |

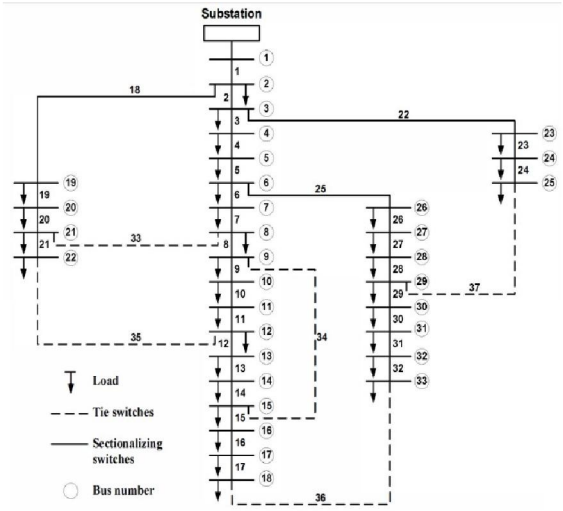
**جدول ۲** مشخصات DG (پیل سوختی با CHP)

| پارامترهای پیل سوختی با CHP | مقدار |
|---|---|
| ظرفیت نامی (kw) | ۲۰۰ |
| هزینه سرمایه‌گذاری ($/kwh) | ۳۶۷۴ |
| هزینه سوخت ($/kwh) | ۰/۰۲۹ |
| هزینه بهره برداری و تعمیر و نگهداری ($/kwh) | ۰/۰۱۰ |
| طول عمر(سال) | ۱۲/۵ |

از آنجا که این شبکه دارای پروفیل ولتاژ مناسب است، به منظور نمایش کارایی روش پیشنهادی در این مقاله بار این شبکه ۱/۴ برابر میزان استاندار فرض شده است.

با توجه به اینکه عمدتاً نصب و بهره‌برداری از تجهیزات مذکور بر روی کلیه شین‌های شبکه‌های توزیع امکان‌پذیر نمی‌باشد در این مقاله تعدادی از

شین‌ها به عنوان شین‌های منتخب فرض شده‌اند. جدول (۳) شین‌های منتخب برای نصب DG و BESS را نشان داده است.




**شکل ۲** شبکه توزیع شعاعی ۳۳ شینه IEEE

**جدول ۳** شین‌های منتخب برای نصب DG و BESS

| شین‌های منتخب برای نصب DG و BESS | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۷ | ۱۸ | ۲۱ | ۲۲ |
| ۲۴ | ۲۵ | ۲۹ | ۳۰ | ۳۱ | ۳۲ | ۳۳ | | | |

همچنین در این مقاله با توجه به حجم و زمان بالای مورد نیاز برای محاسبه تلفات سالیانه شبکه، در این مقاله از یک مدل بار تحت عنوان مدل بار میانگین ۲۸۸ساعته برای محاسبه تلفات سالیانه شبکه استفاده شده است. این مدل با توجه به مدل ضرایب بار شبکه IEEE-RTS[1] ارائه شده است [۱۹]. در این مدل پیک بار شبکه فرض شده است در تابستان رخ می‌دهد و برای هر ماه از سال شبانه‌روزی (۲۴ ساعت) به صورت منتخب در نظر گرفته شده است. هرکدام از ساعات شبانه‌روزهای منتخب دارای ضریب باری است که با روش میانگین‌گیری از کلیه ضرایب بار آن ماه در آن ساعت مشخص بدست آمده است.

## ۴- نتایج عددی

به منظور مقایسه نتایج حاصل از مکان‌یابی و اندازه‌یابی DG و BESS، ابتدا پارامترها و مشخصات سیستم تست مورد مطالعه پیش از نصب تجهیزات محاسبه شده است. اطلاعات مربوط به سیستم تست پیش از نصب تجهیزات در جدول (۴) آورده شده است.

اگر صرفاً به عملکرد دشارژ BESS توجه شود، رفتاری مشابه DG خواهد داشت و بدیهی است هر چه نصب این تجهیزات در شبکه توزیع گستردگی بیشتری داشته باشد، تأثیر بیشتری بر کاهش تلفات خواهد داشت. اما در واقع علاوه بر دشارژ BESS، باید رفتار شارژ آن نیز در مدل‌سازی لحاظ شود. با توجه به اینکه شارژ در ساعات کم باری رخ می‌دهد، توان دریافتی از شبکه بالادست و در نتیجه تلفات شبکه در این ساعات افزایش می‌یابد، اما این افزایش بسیار کمتر است از کاهشی که در اثر دشارژ BESS در زمان‌های پیک بار برای تلفات رخ می‌دهد. لذا برآیند عملکرد BESS کاهش تلفات و کمک به تأمین بار در ساعات پیک بار شبکه است.

با اجرای الگوریتم GA و انجام مکان‌یابی و اندازه‌یابیDGها و BESSها در شبکه تست مورد مطالعه مشاهده می‌شود تلفات انرژی سالیانه شبکه و پروفیل ولتاژ شین‌های بهبود قابل ملاحظه‌ای را پیدا می‌کنند. شکل (۳) منحنی همگرایی الگوریتم GA را نشان می‌دهد. مکان و اندازه DGها و BESSهای نصب شده در شبکه تست در جدول (۵) نشان داده شده است. جدول (۶) حاوی اطلاعات و مشخصات مربوط به سیستم تست بعد از نصب DGها و BESSها است.

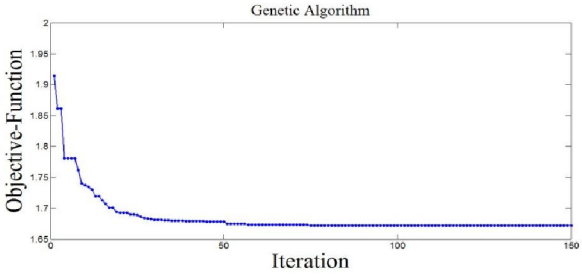
با استناد به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود بعد از نصب DG و BESS، تلفات اکتیو و راکتیو سالیانه شبکه بترتیب ۴۶۹/۶ مگاوات و ۳۱۹/۱ مگاوار شده است که این میزان با صرف هزینه‌ی ۱,۴۲۸,۵۷۱ دلار به منظور نصب DGها و BESSها امکان‌پذیر شده است. میزان کاهش تلفات اکتیو و راکتیو سالیانه شبکه بعد از نصب DGها و BESSها بترتیب ۱۲۶۰/۸۲۳ مگاوات و ۸۹۱/۷۳ مگاوار می‌باشد. همچنین کمترین میزان ولتاژ شین‌ها از ۰/۸۱۸۹ پریونیت روی شین ۱۸ به ۰/۹۶۴۴ پریونیت روی شین ۳۳ بهبود پیدا کرده است. شکل (۴) پروفیل ولتاژ شبکه را قبل و بعد از نصب DG و BESS نشان می‌دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج حاصل از استفاده‌ی الگوریتم GA برای مکان‌یابی و اندازه‌یابی بهینه DG و BESS در شبکه توزیع ارائه شده است. شبیه‌سازی در شبکه توزیع شعاعی ۳۳ شینه IEEE انجام پیاده‌سازی شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود استفاده از BESSها در کنار DGها و همچنین عملکرد شارژ و دشارژ BESSها باعث دستیابی بهتر به اهداف حاصل از استفاده DGها در شبکه توزیع می‌شود. نتایج حاصل از مکان‌یابی و اندازه‌یابی DG و BESS در شبکه تست حاکی از کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ شین‌های شبکه می‌باشد.

**جدول ۴** اطلاعات سیستم تست قبل از نصب DG و BESS

| پارامترها | مقدار |
|---|---|
| بار اکتیو کل شبکه (MW) | ۵/۲۰۱ |
| بار راکتیو کل شبکه (MVAr) | ۳/۲۲۰ |
| تلفات اکتیو پیک بار شبکه (kW) | ۴۶۹/۶ |
| تلفات راکتیو پیک بار شبکه (kVAr) | ۳۱۹/۱ |
| تلفات اکتیو سالیانه شبکه (MW) | ۱,۷۴۴ |
| تلفات راکتیو سالیانه شبکه (MVAr) | ۱,۱۸۲/۴ |
| کمترین ولتاژ (p.u.) | ۰/۸۱۸۹ |
| شماره شین کمترین ولتاژ | ۱۸ |




**شکل ۳** منحنی همگرایی الگوریتم ژنتیک

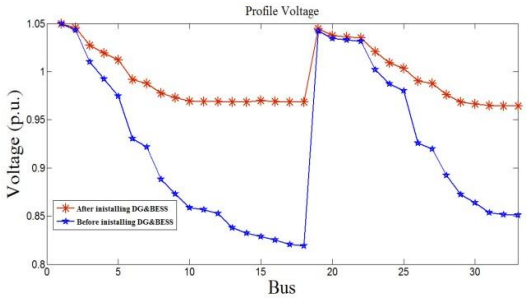
[1] - IEEE Reliability Test System

**جدول ۵** مکان و اندازه DGها و BESSهای نصب شده در شبکه

| شین منتخب | اندازه DGها | اندازه BESSها |
|---|---|---|
| ۵ | – | ۳۰/۲۴۰ (kw/kwh) |
| ۶ | ۱۸۰ (kw) | – |
| ۷ | ۳۲۰ (kw) | – |
| ۸ | ۱۶۰ (kw) | – |
| ۱۴ | – | ۹۰/۷۲۰ (kw/kwh) |
| ۱۵ | ۴۲۰ (kw) | ۴۰/۳۲۰ (kw/kwh) |
| ۱۶ | – | ۳۰/۲۴۰ (kw/kwh) |
| ۱۷ | ۲۲۰ (kw) | ۴۰/۳۲۰ (kw/kwh) |
| ۱۸ | ۱۰۰ (kw) | – |
| ۲۲ | ۲۰۰ (kw) | – |
| ۲۵ | ۱۲۰ (kw) | ۳۰/۲۴۰ (kw/kwh) |
| ۲۹ | – | ۳۰/۲۴۰ (kw/kwh) |
| ۳۰ | ۳۸۰ (kw) | ۴۰/۳۲۰ (kw/kwh) |
| ۳۱ | ۳۰۰ (kw) | – |
| ۳۲ | ۲۴۰ (kw) | ۵۰/۴۰۰ (kw/kwh) |
| ۳۳ | ۱۴۰ (kw) | ۴۰/۳۲۰ (kw/kwh) |
| مجموع | ۲۷۸۰ (kw) | ۴۲۰/۳۳۶۰ (kw/kwh) |

**جدول ۶** اطلاعات مربوط به شبکه بعد از نصب DG و BESS

| پارامترهای شبکه بعد از نصب DGها | مقادیر |
|---|---|
| تلفات اکتیو پیک بار شبکه (kW) | ۱۳۲/۷۵ |
| تلفات راکتیو پیک بار شبکه (kVAr) | ۹۱/۵۳ |
| تلفات اکتیو سالیانه شبکه (MW) | ۴۸۳/۱۷۷ |
| تلفات راکتیو سالیانه شبکه (MVAr) | ۲۹۰/۶۷ |
| کمترین ولتاژ (p.u.) | ۰/۹۶۴۴ |
| شماره شین کمترین ولتاژ | ۳۳ |
| مجوع هزینه DGها و BESSها (دلار) | ۱,۴۲۸,۵۷۱ |




**شکل ۴** پروفیل ولتاژ شبکه قبل و بعد از نصب DG و BESS

## ۶- مراجع


[1] Partha, K., Tanmay, A., and Chandan K. C., "Simultaneous placement and sizing of renewable DGs and capacitor banks in distribution network", Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2014 International Conference on. IEEE, 2014.

[2] Bloemink, J. M., and Timothy C. G., "Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth", Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 28, No. 2, pp. 911-919, 2013.

[3] Schoenung, S. M., and Hassenzahl, W. V., "Long-vs. Short-term energy storage technologies analysis. A life-cycle cost study. A study for the doe energy storage systems program", Sandia National Laboratories, 2003.

[4] Sedighizadeh, M., "Optimal placement of distributed generation using combination of PSO and clonal algorithm", Power and Energy (PECon), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010.

[5] Shrivastava, V. K., "Optimal location of distribution generation source in power system network", Power India Conference, 2012 IEEE Fifth. IEEE, 2012.

[6] Ankesh, Y., and Laxmi, S., "Optimal placement of distributed generation: An overview and key issues", Power Signals Control and Computations (EPSCICON), 2014 International Conference on. IEEE, 2014.

[7] Bahmanifirouzi, B., Niknam, T., and Taheri, S. I., "A new evolutionary algorithm for placement of distributed generation", Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2011 IEEE. Vol. 1. IEEE, 2011.

[8] Chen, Po-Chen, and Mladen Kezunovic. "Analysis of the impact of distributed generation placement on voltage profile in distribution systems." Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE. IEEE, 2013.

[9] Dehghani-Arani, A., and Maddahi, R., "Introduction a multi-objective function in unbalanced and unsymmetrical distribution networks for optimal placement and sizing of distributed generation units using NSGA-II" Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 2013 18th Conference on. IEEE, 2013.

[10] Vukobratovic, M., Hederic, Z., and Miralem H., "Optimal Distributed Generation placement in distribution network", Energy Conference (Energycon), 2014 IEEE International. IEEE, 2014.

[11] Kyung-Hee, J., Kim, H., and Rho, D., "Determination of the installation site and optimal capacity of the battery energy storage system for load leveling", Energy Conversion, IEEE Transactions on, Vol.11, No.1, pp. 162-167, 1996.

[12] Karanki, S. B., "Optimal location of battery energy storage systems in power distribution network for integrating renewable energy sources", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE. IEEE, 2013.

[13] Zhong, Q., "Optimal siting & sizing of battery energy storage system in active distribution network", Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES. IEEE, 2013.

[14] Niknam, T., "Optimal operation of distribution system with regard to distributed generation: a comparison of evolutionary methods", Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005. Vol. 4, 2005.

[15] Piyasak, P., and Ward T. J., "Analysis of the cost per kilowatt hour to store electricity", IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 23, No. 2, pp. 529-534, 2008.

[16] Parizad, A., Amirhossein H. K., and Kalantar, M., "Sitting and sizing of distributed generation through Harmony Search Algorithm for improve voltage profile and reducuction of THD and losses", Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2010 23rd Canadian Conference on. IEEE, 2010.

[17] Holtz-Eakin, D., "Prospects for distributed electricity generation", The Congress of the United States, 2003.

[18] Rakesh, R., and DAS., "Simple and efficient computer algorithm to solve radial distribution networks", Electric power components and systems, Vol. 31, No. 1, pp. 95-107, 2003.

[19] Subcommittee, P. M., "IEEE reliability test system", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol. pas-98, No.6, pp.2047-2054, 1979.