

استفاده از روش بهینه سازی ژنتیک در هماهنگ سازی بانک‌های خازنی، تپ چنجرهای ترانسفورماتورها و ذخیره‌گرها در حضور سیستم‌های خورشیدی

اسماعیل آذرکیش^{۱*}، مصطفی اسماعیل بیگ^۲

*: کارشناس ارشد، تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران Esmael.azarkish64@gmail.com

۲: دکترا، تحصیلات تکمیلی، استادیار دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، me_beag@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۵/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۲۱

چکیده

بهره‌گیری از منابع انرژی تجدید پذیر چالش‌های نوینی را به شبکه برق تحمیل می‌نماید که به واسطه ذات عدم قطعی این نوع منابع است. زمانی که تولید منابع تجدید پذیر از تقاضای محلی فراتر رود ممکن است سبب توان جاری شده معکوس در فیدر توزیع شود. توان جاری شده معکوس ممکن است سبب افزایش ولتاژ و بهره‌برداری نادرست از ادوات تنظیم ولتاژ شود. در این مقاله روشی برای تنظیم ولتاژ توسط ذخیره‌گرها، تولید متغیر منابع تولید پراکنده و ادوات کنترلی ارائه گردیده است. برای هماهنگی میان ادوات مختلف تنظیم ولتاژ استراتژی ارائه شده که در آن هماهنگی‌ها شامل پیکربندی فیدرها، مشخصه تقاضا، نقاط تنظیمی تپ چنجرهای ترانسفورماتورها، تنظیمات بانک‌های خازنی و ذخیره‌گرها است. در روش هماهنگ‌سازی هدف ارتقای مشخصه ولتاژ سیستم ضمن کمینه‌سازی تلفات در بازه زمانی بهره‌برداری است. روش بهینه‌سازی ژنتیک برای حل مسئله و دستیابی به راه‌حل بهینه یعنی مینیمم تغییرات ولتاژ و حداقل تلفات فیدرها استفاده شده و همچنین روش پیشنهادی در شبکه آزمون ۱۲۳ شین IEEE پیاده‌سازی شد. با تحلیل نتایج مشخص گردید که تجمع منابع فوتوولتائیک تلفات انرژی را کاهش می‌دهد و همین‌طور تلفات سیستم توزیع با افزایش سایز فوتوولتائیک کاهش می‌یابد. با افزایش سطح نفوذ منابع فوتوولتائیک، ولتاژ بیشتر افزایش می‌یابد و به تعداد تغییر تپ و تغییرات SVR بیشتری برای حفظ ولتاژ نیاز است. همچنین اثبات گردید که روشن شدن سوئیچ بانک‌های خازنی سبب بهبود مشخصه ولتاژ و استفاده از ذخیره‌گرها سبب حفظ امنیت سیستم به‌طور حداکثری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: هماهنگی ادوات تنظیم ولتاژ، SVR، منابع فوتوولتائیک، بانک خازنی

۱- مقدمه

رشد آگاهی از مسائل زیست محیطی و انرژی و نیاز به تأمین تقاضای مطمئن و ایمن سبب افزایش بیش‌ازپیش استفاده از منابع تولید تجدید پذیر کاهش انتشارات گازهای گلخانه‌ای و نیز کاهش وابستگی به منابع فسیلی شده است [۱]. بهره‌گیری از منابع انرژی تجدید پذیر چالش‌های نوینی را به شبکه برق تحمیل می‌نماید که اساساً به واسطه ذات متغیر و عدم قطعی این نوع منابع است. با حضور منابع تولید تجدید پذیر در فیدرهای توزیع که در نزدیکی مصرف‌کنندگان قرار دارند، توان جاری شده متداول توان از یک جهت به چندجهتی تبدیل شده است. از سوی دیگر، منابع انرژی تجدید پذیر متغیر نظیر توان خورشیدی به‌طور گسترده‌ای وابسته به شرایط آب و هوایی و موقعیت نصب آن‌ها است. از سوی دیگر، قواعد بازار از طراحی مستقیم منابع تولید توسط بهره‌برداران شبکه توزیع جلوگیری می‌نماید.

میزان زیادی از تولید منابع تجدید پذیر که از تقاضای محلی فراتر می‌رود ممکن است سبب توان جاری شده معکوس در فیدر توزیع شود. توان جاری شده معکوس ممکن است سبب افزایش ولتاژ و بهره‌برداری نادرست از ادوات تنظیم ولتاژ شود. این موضوع مخصوصاً در سیستم‌های توزیع فشار ضعیف اتفاق می‌افتد که ولتاژ شین‌ها شدیداً به تغییرات توان اکتیو حساس است [۲] و این

امر منجر به انحرافات ولتاژ پیش از رسیدن به قیود خطوط شود [۳].

تپ چنجرها برای تنظیم ولتاژ در سیستم‌های توزیع متداول استفاده می‌شوند. علاوه بر این، بانک‌های خازنی به‌عنوان پشتیبان‌های توان راکتیو جهت کمینه‌سازی افت ولتاژ فیدر استفاده می‌شوند. در هر حال، برای جلوگیری از تغییرات غیرضروری تپ به‌واسطه تغییرات موقت ولتاژ، تپ چنجرها ادوات مکانیکی با تأخیر زمانی هستند؛ بنابراین، مشکلات تغییرات ولتاژ در اثر کنترل نشدن توان خروجی منابع تجدید پذیر ممکن است توسط تپ چنجرها خنثی نشوند. با به‌کارگیری ذخیره‌گرهای انرژی در مقیاس بزرگ در شبکه‌های توزیع می‌توان سرمایه‌گذاری‌های شبکه را به تأخیر انداخت و پیک تقاضا را کاهش داد [۴]. ذخیره‌گرها را می‌توان برای تأمین رزرو بهره‌برداری کوتاه مدت، پاسخ فرکانسی سریع و تصحیح ضریب توان از طریق تأمین مستقل توان راکتیو از اینورترها مورد استفاده قرار داد [۵]. انتخاب ظرفیت مناسب و موقعیت ذخیره‌گرهای سیستم توزیع در افق طراحی تحت قیود بهره‌برداری و مسائل شبکه قرار می‌گیرد. به‌کارگیری ذخیره‌گرهای انرژی که نیاز به میزان زیادی شارژ دارند تقاضای توان اضافی را به شبکه تحمیل می‌کند که سبب افت ولتاژ غیرقابل قبول می‌شود. از سوی دیگر، نفوذ بالاتر منابع خورشیدی می‌تواند منجر به پخش توان معکوس شود که احتمالاً سبب مشکلات افزایش ولتاژ فیدر می‌شود. علاوه بر این، عدم قطعیت مربوط به منابع تجدید پذیر متغیر ممکن است منجر به بهره‌برداری نادرست از ادوات تنظیم ولتاژ در شبکه‌های توزیع فشار ضعیف و متوسط شود. استفاده کارآمد از ذخیره‌گرها به کنترل عدم قطعیت منابع تولید تجدید پذیر کمک می‌کند و استفاده از سهم بالاتری از آن‌ها را فراهم می‌آورد. منابع ذخیره‌گر به خنثی سازی افزایش ولتاژ و نیز کاهش ولتاژ کمک می‌کنند و انعطاف پذیری بیشتری را برای سیستم در برابر نوسانات خروجی متغیر منابع تجدید پذیر تأمین می‌کنند. روش‌های بسیاری برای حل مشکلات تنظیم ولتاژ در شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در مرجع [۶] روشی برای تنظیم ولتاژ بهینه شبکه‌های توزیع با رگلاتورهای ولتاژ آبخاری در حضور منابع فوتوولتائیک بانفوذ بالا ارائه شده است. در مرجع [۷] روش تنظیم ولتاژ هماهنگ مبتنی بر مدل کنترل پیش‌بین در شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در مرجع [۸] روش کنترل ولتاژ مبتنی بر استفاده بهینه از منابع ذخیره‌گر در حضور منابع خورشیدی بانفوذ بالا ارائه شده است. در مرجع [۹] بهینه‌سازی تعداد، محل و اندازه منابع تولید پراکنده و جبران ساز سنکرون استاتیکی با روش الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در مرجع [۱۰] توزیع بار اقتصادی باهدف کاهش هزینه و بهبود قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن عدم قطعیت ارائه شده است. در مرجع [۱۱] برنامه‌ریزی تقاضا و توسعه شبکه انتقال در بازار ظرفیت با استفاده از ریز شبکه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۲] تنظیم ولتاژ در شبکه توزیع با استفاده از اینورترهای هوشمند خورشیدی انجام شده است. در مرجع [۱۳] روش تنظیم ولتاژ زمان حقیقی شبکه‌های توزیع با تجمیع توان بادی ارائه شده است. در مرجع [۱۴] یک روش تنظیم ولتاژ هماهنگ مبتنی بر تپ چنجر تحت بار و اینورتر برای شبکه توزیع بانفوذ بالای منابع فوتوولتائیک ارائه شده است.

در این مقاله هدف آن است به فضای وابسته به زمان سیستم‌های توزیع در حضور منابع تجدید پذیر برداریم و تنظیم ولتاژ توسط ذخیره‌گرها، تولید متغیر منابع تولید پراکنده و ادوات کنترلی پرداخته شود. فرض می‌گردد که منابع تجدید پذیر متغیر در موقعیت‌های مختلف و پراکنده به سیستم توزیع متصل می‌شوند و این موضوع مبتنی بر دسترس‌پذیری منابع و تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری در سطوح نفوذ مختلف صورت می‌پذیرد. در چنین موقعیت‌هایی، بهره‌بردار شبکه توزیع به حفظ ولتاژهای سیستم در رنج‌های مجاز تمرکز خواهد داشت. این موضوع معمولاً با هماهنگی ادوات کنترلی مبتنی بر تجارب بهره‌بردار سیستم توزیع برای دستیابی به اهداف ولتاژی صورت می‌گیرد. هماهنگی‌ها شامل پیکربندی فیدرها، مشخصه تقاضا، نقاط تنظیمی تپ چنجرهای ترانسفورماتورها، تنظیمات بانک‌های خازنی و ذخیره‌گرها است. روش پیشنهادی یک پلت فرم مشترک ارائه می‌دهد که زمان‌بندی بانک‌های خازنی شانت و تپ چنجرهای ترانسفورماتورها را از شرایط کنونی سیستم هماهنگ می‌سازد تا مشخصه ولتاژ سیستم ضمن کمینه‌سازی تلفات در بازه زمانی بهره‌برداری حفظ شود. روش پیشنهادی ذخیره‌گرها را نیز برای نرم کردن خروجی نوسانی تولید خورشیدی در بهره‌برداری ساعتی برنامه‌ریزی می‌نماید. مسئله در یک فرمت بهینه‌سازی چند دوره‌ای فرمول‌بندی شده است که شامل متغیرهای گسسته است. روش بهینه‌سازی ژنتیک نیز برای حل مسئله و دستیابی به راه‌حل بهینه یعنی مینیمم تغییرات ولتاژی و حداقل تلفات فیدرها استفاده می‌شود.

در بخش دوم مقاله، روش پیشنهادی شامل تابع هدف و قیود مسئله هماهنگی ادوات کنترل، الگوریتم بهینه‌سازی و رویه اجرا و فلوچارت روش ارائه شده است. در بخش سوم تحلیل نتایج شامل بررسی اثر منبع خورشیدی بر روی مشخصه ولتاژ و نیز بررسی

هماهنگی ادوات تنظیم ولتاژ، بانک خازنی و ذخیره‌گرها آورده شده است. در نهایت بخش چهارم مقاله شامل نتیجه‌گیری است.

۲. تشریح روش پیشنهادی

تابع اصلی هماهنگی ادوات کنترل VAR^۱ نظیر تپ چنجرهای ترانسفورماتورها، بانک‌های خازنی شانت و ذخیره‌گر در سیستم‌های توزیع مدرن کمینه نمودن اثرات عدم قطعی منابع تولید تجدید پذیر وارد شده به سیستم در نقطه اتصال به شبکه است. در چنین سیستم‌هایی به کارگیری ادوات کنترل ولتاژی در کنار ذخیره‌گر الزامی است تا تلفات سیستم کمینه گردد و از مشخصه ولتاژ سیستم پشتیبانی صورت گیرد که در چنین شرایطی ادوات کنترل VAR در ابتدا برای کنترل تغییرات ولتاژی استفاده شده و سپس ذخیره‌گرها در صورتی به کار گرفته می‌شوند که ادوات VAR در بازیابی ولتاژ به رنج‌های مجاز ناموفق باشند؛ بنابراین مسئله زمان‌بندی بهینه تپ چنجرهای ترانسفورماتورها و بانک‌های خازنی و برنامه‌ریزی ذخیره‌گرها به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چند دوره‌ای مدل‌سازی می‌شود.

فرمول‌بندی تلفات در شبکه توزیع را می‌توان با اضافه کردن توان‌های شین در N شین شبکه به دست آورد.

در روابط استفاده شده در این بخش P_{it} و Q_{it} مجموع توان اکتیو و راکتیو تزریقی در شین i در زمان t است. P_{ESm} و Q_{ESm} نیز به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی/جذب شده توسط ذخیره‌گر m است.

قیود تابع هدف شامل قید توازن توان و قیود ولتاژی هستند که در روابط زیر آورده شده است [۱۵]:

$$P_{it} - V_{it} \sum_{j=1}^N V_{jt} [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) = 0 \quad (۱)$$

$$Q_{it} - V_{it} \sum_{j=1}^N V_{jt} [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) = 0 \quad (۲)$$

$$V_{mint} \leq V_{it} \leq V_{maxt} \quad (۳)$$

$$\delta_{mint} \leq \delta_{it} \leq \delta_{maxt} \quad (۴)$$

$$|\overline{I_{ijt}}| \leq I_{ij}^{max} \quad (۵)$$

که در این روابط G و B به ترتیب کاندوکتانس و سوسپتانس خط بین شین‌های i و j هستند. δ نیز زاویه ولتاژ در شین i است. I_{ij}^{max} نیز بیانگر ماکزیمم قابلیت جریان خط بین شین‌های i و j است [۱۵].

در این بخش به بحث پیرامون ادوات کنترلی تنظیم ولتاژ می‌پردازیم. ابتدا تپ چنجرهای ترانسفورماتورها مورد بررسی قرار می‌گیرند. تپ چنجرهای ترانسفورماتورها یکی از اصلی‌ترین ادوات کنترلی در سیستم‌های توزیع هستند. رگلاتورهای ولتاژ برای تنظیم گام پایین فیدرها استفاده می‌شوند. تپ چنجرهای ترانسفورماتورها ولتاژ در شین ثانویه را برای حفظ ولتاژ اولیه در رنج‌های قابل قبول تنظیم می‌کنند. روابط و قیود مربوط به تپ چنجر در ادامه آورده شده است:

$$\sum_{t=1}^{24} |Tap_t - Tap_{t-1}| \leq \Psi_T \quad (۶)$$

$$Tap_{mint} \leq Tap_t \leq Tap_{maxt} \quad (۷)$$

$$[V_s]_{abct} = [n_R]_{abct} \quad [V_R]_{abct} \quad (۸)$$

$$n_R = 1 \pm Tap_t \Delta V_t \quad (۹)$$

که در روابط فوق V_{mint} و V_{maxt} به ترتیب ولتاژ ماکزیمم و مینیمم مجاز در شین i است و Ψ بیانگر ماکزیمم مجاز سوئیچینگ تپ چنجر و Tap_t موقعیت تپ در زمان t هستند. همچنین V_R و V_s بیانگر ولتاژهای ورودی و خروجی رگلاتور و ΔV نیز گام تغییرات تپ بوده و n_R بیانگر نسبت مؤثر تعداد دور رگلاتور است. بانک‌های خازنی شانت نیز توان راکتیو برای تأمین تقاضای راکتیو و تنظیم ولتاژ مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۶].

برای بانک‌های خازنی ماکزیمم سوئیچینگ بهره‌برداری و سایر قیود مربوطه به شرح زیر است:

^۱ -Voltage Automatic Regulator

$$\sum_{t=1}^{24} (X_{ct} \oplus X_{ct-1}) \leq \Psi_c \quad c = 1, 2, \dots, n_c \quad (10)$$

$$Q_{it} = \omega C V_{it}^2 \quad (11)$$

$$Q_{mint} \leq Q_{it} \leq Q_{maxt} \quad (12)$$

که در این رابطه Ψ و X_{ct} ماکزیمم سوئیچینگ مجاز بانک خازنی و وضعیت خازن در زمان t هستند. تعداد خازن‌های نصب‌شده برابر با n_c و علامت \oplus بیانگر اپراتور XOR که یک نماد منطقی است. اگر X_{ct} برابر با X_{ct-1} نباشد برابر با یک بوده و در صورتی برابری آن‌ها صفر است. X_{ct} و X_{ct-1} وضعیت بانک خازنی c در ساعت t و $t-1$ است [۱۶]. در ادامه به منابع ذخیره‌گر می‌پردازیم.

ذخیره‌گرهای انرژی انعطاف‌پذیری شبکه توزیع را ارتقا می‌دهند و تجمیع میزان زیادی از منابع تولید پراکنده را ممکن می‌سازند. همچنین ذخیره‌گرها برای سطح‌بندی بار و به تأخیر انداختن به‌روزرسانی شبکه بسیار مفید هستند. قیود فیزیکی و بهره‌برداری ذخیره‌گرها به شرح زیر هستند:

$$P_{it} = P_{Git} - P_{Dit} \pm P_{ESit} \quad m = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$\sum_{t=0}^{24} (-\eta_i P_{ESmt} \Delta t) \leq E_{ESmt}^{max} - E_{ESmt}^0 \quad (14)$$

$$\sum_{t=0}^{24} (\eta_i P_{ESmt} \Delta t) \leq E_{ESmt}^0 \quad (15)$$

$$E_{ESmt}^{min} \leq E_{ESmt} \leq E_{ESmt}^{max} \quad (16)$$

$$P_{ESmt}^{min} \leq P_{ESmt} \leq P_{ESmt}^{max} \quad (17)$$

$$P_{ESmt}^2 + Q_{ESmt}^2 \leq \Omega_{ESmt}^{max}^2 \quad (18)$$

$$P_{Lit}^{With ES} \leq P_{Lit}^{Without ES} \quad (19)$$

که در رابطه فوق η بازده سیکل شارژ-دشارژ ذخیره‌گر بوده و E_{ES} انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌گر و $EOES$ انرژی ذخیره‌شده اولیه در شین i و E_{min} و E_{max} به ترتیب ماکزیمم و مینیمم ظرفیت ذخیره‌گر هستند. Ω_{max} نیز قید قابلیت توان ذخیره‌گر و M تعداد ذخیره‌گرها است (فرض بر آن است یک واحد ذخیره‌گر به یک شین مشخص وصل می‌شود). ذخیره‌گر می‌تواند با توجه به سیکل شارژ یا دشارژ مثبت یا منفی باشد. واحدهای ذخیره‌گر در موقعیت‌های خاص و محدودی به سیستم وصل می‌شوند.

روابط ۱۴ و ۱۵ به ترتیب بیانگر ماکزیمم و مینیمم انرژی ذخیره‌شده یا دشارژ شده ذخیره‌گر هستند. به‌طور مشابه، رابطه ۱۶ و ۱۷ بیانگر ظرفیت حداکثر و حداقل با توان اسمی مربوطه برای ذخیره‌گر هستند. مبتنی بر این فرض که ذخیره‌گر با سیستم توزیع از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت متصل گردیده است، رابطه ۱۸ منحنی قابلیت ذخیره‌گر را مدل می‌نماید [۱۷]. رابطه ۱۹ تضمین می‌کند که سیستم با ذخیره‌گر تلفات کمتری تولید می‌کند.

روابط ۱ تا ۱۹ نمایشگر مسئله تنظیم ولتاژ شامل تولید متغیر تجدید پذیر، ادوات کنترل شبکه و ذخیره‌گرها است. این مسئله به فرم مسئله بهینه‌سازی عدد صحیح ترکیبی غیرخطی است که به‌واسطه بهره‌برداری گسسته از بانک‌های خازنی و تپ چنجرها است و به‌منظور حل مسئله از روش بهینه‌سازی ژنتیک استفاده می‌شود.

توان خروجی ماژول فوتولتائیک وابسته به تابش خورشیدی و دمای محیط سایت و نیز مشخصات خود ماژول است؛ بنابراین توان خروجی واحد خورشیدی مبتنی بر رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$H_C = H_A + S_{av} \left(\frac{T_{no} - 20}{0.8} \right) \quad (20)$$

$$I_C = S_{av} [I_{sc} + \alpha_i (H_C - 25)] \quad (21)$$

$$V_C = V_{OC} - \beta_v H_C \quad (22)$$

$$P_0 = n \left(\frac{V_{MPPT} I_{MPPT}}{V_{OC} I_{sc}} \right) V_C I_C \quad (23)$$

در این قسمت مدل سازی ذخیره ساز معرفی می گردد. باتری ها یکی از محبوب ترین شکل های ذخیره سازها هستند که به خاطر بازده بالا و آلودگی پایین آن ها استفاده می شوند. وضعیت شارژ (SOC) باتری برای توصیف ظرفیت باقیمانده استفاده می گردد که پارامتری مهم در استراتژی کنترلی سیستم است [۱۸]. به طور کلی، SOC به صورت نسبت ظرفیت کنونی $Q(t)$ به ظرفیت نامی Q_n باتری تعریف می گردد [۱۹]. مقدار پایین SOC در یک دوره طولانی مدت نشانگر تلفات ظرفیت به واسطه استرس های مکانیکی بر روی جرم های فعال و افزایش سایز بلوره های سولفات است. مقادیر مناسب معمول برای SOC در باتری ها می بایست بین حدود ۲۰ درصد تا ۹۵ درصد به طوری باشد که پیوستگی باتری حفظ شود [۲۰].

تعدادی از روش های مستقیم را می توان برای دستیابی به SOC استفاده نمود که برای مثال می توان به روش اندازه گیری ولتاژ، نیروی محرک الکتریکی (EMF^1)، ولتاژ مدار باز، روش اندازه گیری امپدانس و روش شمارش کلمب یاد کرد [۱۹]. روش شمارش کلمب در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

روش شمارش کلمب جریان دشارژ از باتری را اندازه گیری می نماید و به نسبت زمان باهدف تخمین SOC ادغام می شود [۱۸]. این روش تخمین SOC را محقق می نماید که تخمینی از جریان دشارژ $i(t)$ و مقادیر تخمینی برای $SOC(SOC(t-I))$ است. با استفاده از رابطه SOC ۲۴ از طریق استفاده از روش شمارش کلمب به دست خواهد آمد [۲۱]:

$$soc(t) = SOC_{init} - \frac{1}{Q_n} \int_0^t i(t) dt \quad (24)$$

که در این رابطه SOC وضعیت شارژ و Q_n ظرفیت نامی و $i(t)$ جریان ذخیره ساز است. پارامتر دیگری که برای باتری ها از اهمیت برخوردار است میزان عمق دشارژ است. ذخیره انرژی رویه ای آهسته است که پس از آن نیاز به آزادسازی سریع انرژی مطابق با تقاضا است. خروجی انرژی یا دشارژ را می توان یک فاکتور محدود کننده با عنوان متوسط انرژی انتقالی به شمار آورد. این متوسط برای تحویل زمان لازم برای استخراج انرژی ذخیره شده را تعیین می نماید. اگر تقاضای سیستم میزان زیادی از انرژی ذخیره ساز را ملزوم نماید، پیکره بندی سیستم برخلاف موقعیت تولید پراکنده کافی نخواهد بود. زمانی که باتری دشارژ گردد، میزان عمق دشارژ (DOD) را می توان به صورت درصدی از ظرفیت انرژی بیان کرد که نسبت به ظرفیت نامی دشارژ می شود که این موضوع در رابطه زیر آورده شده است:

$$DOD = \frac{Q_{Released}}{Q_{rated}} * 100\% \quad (25)$$

که در این رابطه $Q_{Released}$ ظرفیت انرژی دشارژ شده برای هر مقدار جریان است. پارامتر دیگری که برای ذخیره سازها از اهمیت برخوردار است وضعیت سلامت (SOH) است. وضعیت سلامت شرایط عمومی باتری را منعکس می کند. تغییرات وضعیت سلامت مبتنی بر وضعیت توان و ظرفیت است. تغییرات ظرفیت و مقاومت مقادیر نامی سلول جدید سبب خروج و کم شدن توان و ظرفیت می شود. SOH را می توان بر حسب درصدی از ماکزیمم انرژی در دسترس باتری در لحظه ای که به ظرفیت نامی اش می رسد بیان کرد:

$$SOH = \frac{Q_{Max}}{Q_{rated}} * 100\% \quad (26)$$

هدف مسئله کنترل ولتاژ در سیستم توزیع کمینه سازی انحرافات ولتاژی در شین های توزیع و نیز تلفات انرژی است. تابع هدف را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\min F = J \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=0}^N (|V_{it}| - |V_i^{ref}|)^2 + R \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N P_{Lit} \quad (27)$$

که در رابطه فوق J و R ضرایب وزنی انحرافات ولتاژ و تلفات انرژی هستند. اندازه ولتاژ شین i در زمان t و $|V_i^{ref}|$ اندازه ولتاژ مرجع در شین i بوده و P_{Lit} تلفات فیدر توزیع در زمان t است که تابعی از موقعیت تپ جنجر و وضعیت بانک های خازنی است. N تعداد شین ها است. جمله اول رابطه ۲۷ متناظر با مقدار مربعات انحرافات ولتاژ در یک بازه زمانی مشخص است و عبارت دوم بیانگر تلفات انرژی شبکه است.

در رابطه فوق دو وزن R و J برای هر یک از عبارات انحراف ولتاژ و تلفات وجود دارد که برای تعیین این وزن ها می بایست از یک

¹-Electromotive Force

روش وزن دهی استفاده شود. قطعاً بزرگ یا کوچک انتخاب کردن هر یک از این وزن‌ها منجر به نتایج نادرست خواهد شد. از این روش استفاده از روش AHP^1 که یکی از روش‌های مطلوب در وزن دهی است در ارتقای کارایی روش پیشنهادی مؤثر خواهد بود. در ادامه به الگوریتم ژنتیک پرداخته می‌شود.

محدوده کاری الگوریتم ژنتیک بسیار وسیع است و هر روز با پیشرفت روزافزون علوم و فناوری استفاده از این روش در بهینه‌سازی و حل مسائل بسیار گسترش یافته است. الگوریتم ژنتیک را می‌توان یک روش جستجوی کلی نامید که از قوانین تکامل بیولوژیک طبیعی تقلید می‌کند. الگوریتم ژنتیک بر روی یک سری از جواب‌های مسئله به امید به دست آوردن جواب‌های بهتر قانون بقای بهترین را اعمال می‌کند. در هر نسل به کمک فرآیند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولیدمثل جواب‌های انتخاب شده به کمک عملگرهایی که از ژنتیک طبیعی تقلید شده‌اند، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی به دست می‌آید. این فرآیند باعث می‌شود که نسل‌های جدید با شرایط مسئله سازگارتر باشد.

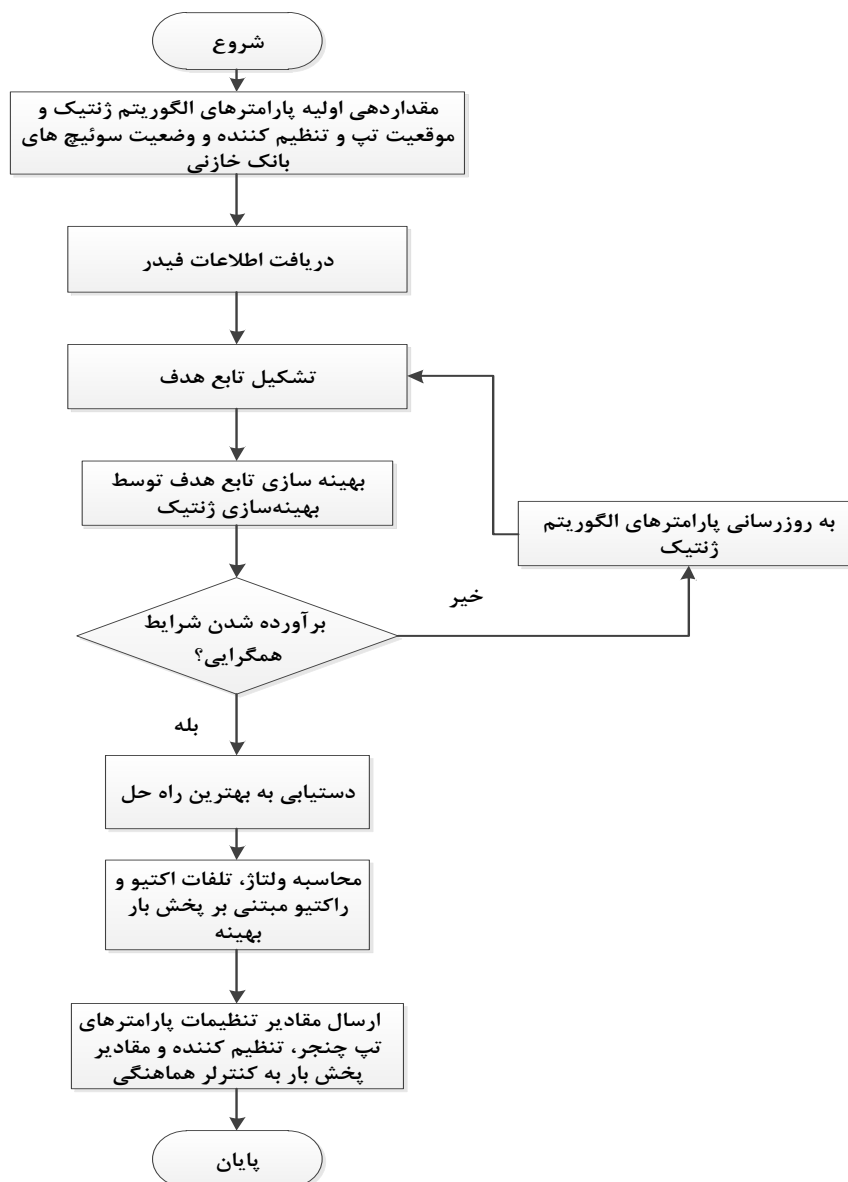
قبل از این که یک الگوریتم ژنتیکی بتواند اجرا شود، ابتدا باید کدگذاری (یا نمایش) مناسبی برای مسئله مورد نظر پیدا شود. معمولی‌ترین شیوه نمایش کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک به شکل رشته‌های دودویی است. هر متغیر تصمیم‌گیری به صورت دودویی درآمده و سپس با کنار هم قرار گرفتن این متغیرها کروموزوم ایجاد می‌شود. همچنین یک تابع برازندگی نیز باید ابداع شود تا به هر راه‌حل کدگذاری شده ارزشی را نسبت دهد. در طی اجرا، والدین برای تولیدمثل انتخاب می‌شوند و با استفاده از عملگرهای آمیزش و جهش باهم ترکیب می‌شوند تا فرزندان جدیدی تولید کنند. این فرآیند چندین بار تکرار می‌شود تا نسل بعدی جمعیت تولید شود. سپس این جمعیت بررسی می‌شود و در صورتی که ضوابط همگرایی برآورده شوند، فرآیند فوق خاتمه می‌یابد.

روند کلی بهینه‌سازی و حل مسائل در الگوریتم ژنتیک به شرح زیر است:

- ۱- شروع: تولید تصادفی یک جمعیت که شامل تعداد زیادی کروموزوم (روش‌های حل مسئله است) است.
 - ۲- صحت و درستی (شایستگی): ارزیابی صحت برای تابع $f(x)$ به ازای هر کروموزوم x در جمعیت.
 - ۳- ایجاد یک جمعیت جدید: تولید یک جمعیت جدید با انجام تمامی زیرگروه‌های زیر تا آن که یک جمعیت جدید ایجاد گردد.
 - ۳-۱: انتخاب: انتخاب کروموزوم‌های پدر و مادر از جمعیت قبلی با توجه به صحت و درستی آن (شایستگی)، به طوری که هر چه شایستگی بهتر باشد (دقت جواب در هم‌گرائی بیشتر باشد) شانس بیشتری برای انتخاب دارد.
 - ۳-۲: تولیدمثل انجام زادوولد و ایجاد یک نسل جدید.
 - ۳-۳: جهش: مشخص شدن مکان فرزند تولید شده در کروموزوم
 - ۳-۴: پذیرش: جا دادن فرزند جدید در داخل جمعیت.
 - ۴- جایگزینی: جایگزینی جمعیت جدید به جای جمعیت قبلی و مورداستفاده قرار دادن جمعیت جدید در مراحل بعدی الگوریتم
 - ۵- امتحان: اگر شرایط مطلوب در حل مسئله برآورده شد اعلام می‌کنیم که به بهترین جواب رسیده‌ایم و از الگوریتم خارج می‌شویم، در غیر این صورت به مرحله ۲ یعنی شایستگی می‌رویم و دوباره همین روند را تکرار می‌کنیم.
- الگوریتم‌های ژنتیک بر پایه تولید و آزمون هستند، لذا جواب مسئله مشخص نیست و نمی‌دانیم که کدام یک از جواب‌های تولید شده جواب بهینه است، بنابراین شرط خاتمه را بر مبنای عدم بهبود در بهترین شایستگی جمعیت در طی چند نسل متوالی و یا اینکه بهترین شایستگی جمعیت تا یک زمان خاصی تغییری نکند، قرار می‌دهیم.
- فلوچارت رویه پیشنهادی برای حل مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شکل ۱ آورده شده است. تمامی پارامترهای موقعیت تپ چنجر، گام‌های تپ تنظیم‌کننده ولتاژ و وضعیت سوئیچ‌های بانک‌های خازنی به‌عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شوند. موقعیت تپ چنجر و گام‌های تپ تنظیم‌کننده ولتاژ به‌عنوان متغیرهای حقیقی و وضعیت سوئیچ بانک خازنی به‌عنوان متغیر باینری در نظر گرفته می‌شود. برای مقداردهی اولیه فقط وضعیت ادوات وارد بهینه‌سازی می‌شود؛ بنابراین بهترین راه‌حل تنظیمات بهینه تپ چنجر، تنظیم‌کننده ولتاژ و سوئیچ‌های بانک خازنی را مشخص می‌کند.
- پس از اجرای رویه بهینه‌سازی ژنتیک و تعیین مقادیر تپ چنجر، تنظیم‌کننده تپ و سوئیچ‌های بانک خازنی، یک روش هماهنگی

¹-Analytic Hierarchy Process

برای برنامه ریزی انرژی ذخیره گرها و فوتوولتائیک جهت خنثی سازی انحرافات ولتاژی و کاهش تلفات انرژی مورد نیاز است. این استراتژی کنترلی بدین شرح است که در حین زمان های غیر پیک، در ابتدا تغییر تپ با افزایش ولتاژ انجام می شود. سپس کنترلر هماهنگی متمرکز سیگنال شارژ را به کنترلر وضعیت شارژ ذخیره گر ارسال می نماید. کنترلر ذخیره گر باتری را برای کم کردن استرس کاری ترانسفورماتور شارژ می کند تا توان معکوس را جذب کند. در حین پیک، کنترلر هماهنگی متمرکز سیگنال دشارژ را به کنترلر ارسال می کند و باتری برای پیک سائی دشارژ می شود. متغیر کنترلی برای نمایش وقوع هرگونه افزایش ولتاژی استفاده می شود. اگر افزایش ولتاژ داشته باشیم، فقط ترانسفورماتور ولتاژ شین i را تنظیم می کند. کنترلرهای ذخیره گر باتری را مبتنی بر سیگنال هماهنگی شارژ می کنند تا توان جاری شده معکوس خنثی شوند. از طریق کنترلر هماهنگی، بهره برداری های تغییر تپ اضافی در اثر افزایش ولتاژ کمینه می شود. وظیفه کنترلر هماهنگی هماهنگ سازی عملکرد شارژ و دشارژ ذخیره گر است.



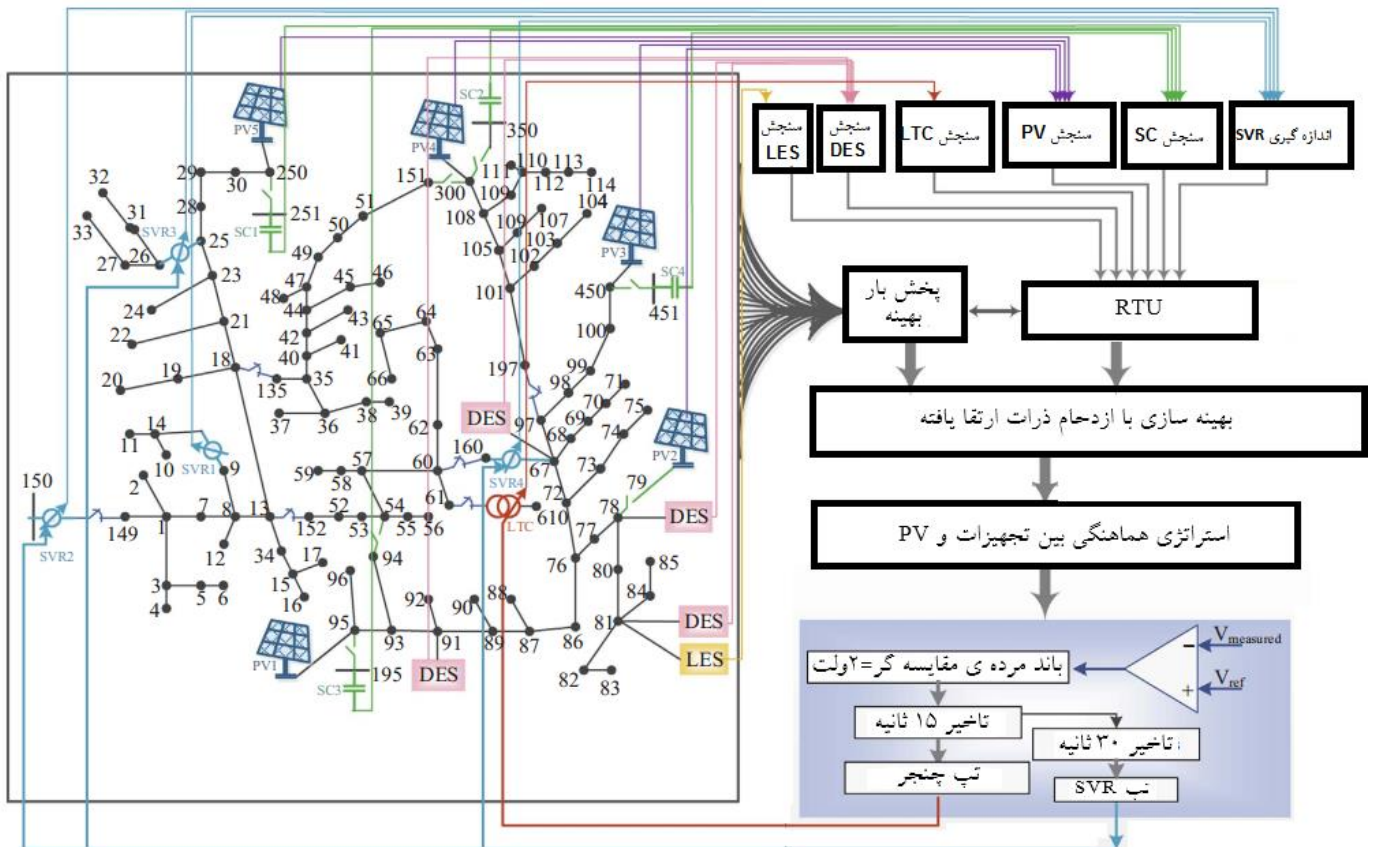
شکل ۱: فلوچارت روش پیشنهادی

۳. نتایج

به منظور بررسی عملکرد روش تنظیم ولتاژ پیشنهادی از شبکه آزمون ۱۲۳ شین^۱ IEEE استفاده شده است. دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل ۲ نمایش داده شده است. مجموع بار این شبکه ۱۲ مگاوات هست و حیدر آن شامل ترانسفورماتور^۲ LTC یعنی دارای تپ چنجر، ۴ SVR، و چهار خازن شانت هست. پارامترهای بانکهای خازنی شانت در جدول ۱ آورده شده است [۲۲]. همچنین در جدول ۲ پارامترهای SVR نمایش داده شده است [۲۳].

جدول ۱: پارامترهای بانکهای خازنی شانت

شماره شین	فاز A (kVar)	فاز B (kVar)	فاز C (kVar)
۲۵۱	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
۳۵۰	۵۰	۰	۰
۱۹۵	۰	۵۰	۰
۴۵۱	۰	۰	۵۰
مجموع	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰



شکل ۲: سیستم آزمون به همراه نحوه قرارگیری المانهای روش پیشنهادی

^۱-Institute of Electrical and Electronics Engineers

^۲-Load Tap Changers

LTC و SVR ها از تأخیر زمانی استفاده می کنند تا از کارکردهای غیر ضروری تغییرات تپ جلوگیری نمایند. رگلاتور در ۰/۹ تا ۱/۱ پریونیت تنظیم شده است، در حالی که قیود ولتاژی مجاز در ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت است. محدوده تپ چنجر $\pm 10\%$ مقدار نامی بوده و سایز گام تپ برابر با ۰/۶۲۵ درصد است.

باند مرده دو ولت بوده و تأخیر زمانی LTC برابر با ۱۵ ثانیه و تأخیر بین LTC و SVR ۳۰ ثانیه هست. سوئیچ های خازن های شانت در زمانی روشن می شوند که توان جاری شده راکتیو خط به سمت بارهای پایین دست برابر با ۵۰ درصد سایز خازن باشد. همچنین این سوئیچ ها زمانی خاموش می شوند که توان جاری شده VAR به ۷۵ درصد سایز خازن در جهت معکوس برسد. ادوات کنترلی در سیستم فیدر حضور دارند.

در این مقاله مشخصات فوتوولتائیک بهینه مبتنی بر معیار بالاترین ضریب هزینه (CF) فوتوولتائیک انتخاب گردیده است. پارامترهای مدول خورشیدی بدین شرح است: $V_{MPP}(v)=17.32$, $I_{sc}(A)=5.32$, $V_{oc}(v)=21.98$, $P_0(w)=75$, $\beta_i(V/C)=0.014$, $\alpha_i(A/C)=0.001$, $I_{MPPT}(A)=4.76$, $T_{no}(c)=43$. مطابق با پارامترهای سیستم فوتوولتائیک، در صورتی که مدول PV با بالاترین CF دارای توان اسمی ۶۰ وات باشد و سطح نفوذ مورد نیاز تولید خورشیدی ۶ مگاوات باشد، این سطح را می توان با استفاده از پنل خورشیدی با ۱۰۰ هزار مدول به دست آورد. بنابراین ۵ مجموعه نیروگاه خورشیدی با سایز یکسان با ۱/۲ مگاوات خروجی توان و ۲۰۰۰۰ هزار مدول انتخاب شد. همان طور که در شکل ۲ نمایش داده شده است روش پیشنهادی با جزئیات تشریحی به شبکه آزمون ۱۲۳ شین IEEE اعمال گردید. تمامی پارامترهای اندازه گیری شده و متغیرهای محاسبه شده توسط پخش بار بهینه به RTU^۱ فرستاده شد. در نهایت روش کنترل هماهنگ کننده یک روزه زمان بندی مطلوب را برای دستیابی به مینیمم نوسانات ولتاژی و حداقل تلفات انرژی ایجاد می کند. ۱۴ خازن شانت مطابق با جدول ۳ به سیستم اضافه شد.

جدول ۲: پارامترهای SVR

SVR4			SVR3		SVR2	SVR1	پارامتر
فاز C	فاز B	فاز A	C-N	A-N	سه فاز	فاز A	
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	نسبت PT
۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۵۰	۵۰	۷۰۰	۵۰	نسبت CT
۰/۲	۱/۴	۰/۶	۰/۶	۰/۴	۳	۰/۴	تنظیمات R
۱/۴	۲/۶	۱/۳	۰/۴	۰/۴	۷/۵	۰/۴	تنظیمات X
۱۲۴	۱۲۴	۱۲۴	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	سطح ولت
۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	تنظیمات پهنای باند
اتصال سه فاز ستاره			دو اتصال تک فاز A-N و C-N		اتصال ستاره سه فاز	متصل به فاز A	نوع
۶۷-۱۶۰			۲۶-۲۵		۱۵۰-۱۴۹	۱۴-۹	شین ها

^۱ -Remote Terminal Unit

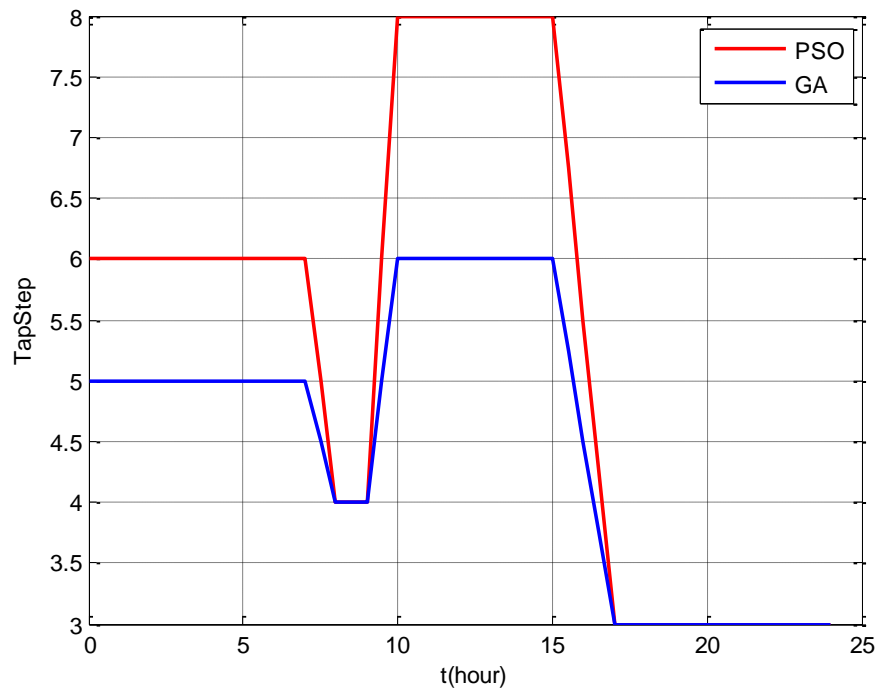
جدول ۳: اطلاعات خازن‌های شانت در سیستم ۱۲۳ شین IEEE

خازن	موقعیت	kVAR
C1	۱	۵۰
C2	۱	۵۰
C3	۱۳	۵۰
C4	۱۸	۵۰
C5	۳۵	۵۰
C6	۴۴	۱۰۰
C7	۵۷	۵۰
C8	۶۰	۱۰۰
C9	۷۲	۵۰
C10	۸۱	۱۰۰
C11	۸۶	۵۰
C12	۱۰۱	۵۰
C13	۱۱۰	۱۰۰
C14	۱۱۴	۱۰۰

مطابق با روابط ۴۴ تا ۴۶، فاکتورهای وزنی بدین صورت انتخاب می‌شوند: $h_{12}=1/(h_{21})=1/2$ ، $h_{11}=h_{22}=1$. از این رو

$$R=0/45 \text{ و } J=0/55$$

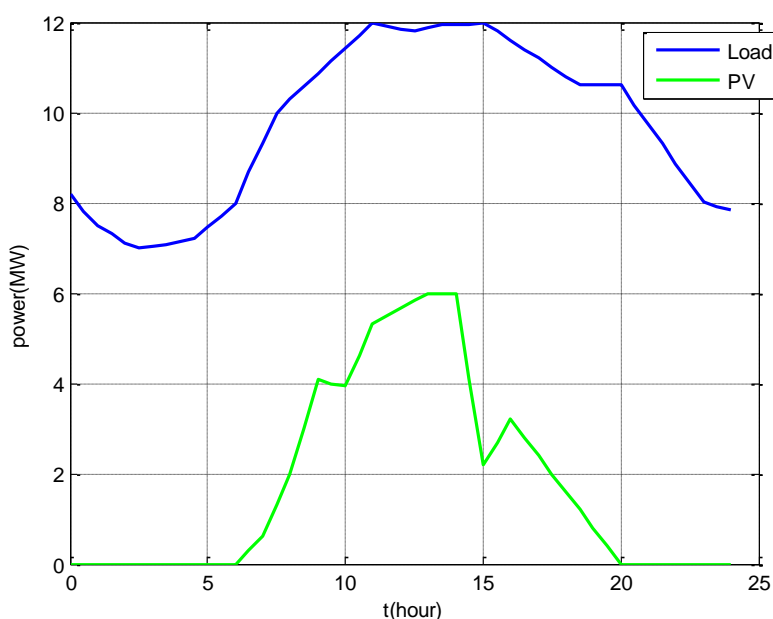
در شکل ۳ نتایج مقایسه میان PSO^۱ و ژنتیک را نمایش می‌دهد که به‌وضوح روش پیشنهادی نتایج مطلوبی کسب نموده است. در واقع در روش پیشنهادی تغییرات تپ کمتر است.



^۱ - Particle Swarm Optimization

شکل ۳: مقایسه روش PSO و ژنتیک در بهره‌برداری LTC

فوتوولتائیک تجمیع شده در سیستم در شین‌های ۴۵۰، ۳۰۰، ۲۵۰، ۹۵ و ۷۹ تجمیع شده‌اند که در شکل ۲ نمایش داده شد. شایان ذکر است که تولید فوتوولتائیک و تقاضا بار مبتنی بر [۲۲] در شکل ۴ ترسیم شده است.



شکل ۴: مشخصه‌های تقاضا و تولید فوتوولتائیک

با فرض آن که ذخیره‌گر انرژی تو وسط بهره‌بردار شبکه توزیع بهره‌برداری و تملک می‌شود، بهره‌برداری بهینه از ذخیره‌گر انرژی برای تعیین بهترین موقعیت و ظرفیت می‌بایست شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری باشد. شایان ذکر است هزینه‌های بهره‌برداری و نیز قیود فنی شبکه نیز می‌بایست در رویه طراحی مدنظر قرار بگیرد، زیرا تعیین اندازه مطلوب ذخیره‌گر برای تکمیل جنبه‌های مختلف بهره‌برداری موردنیاز است. برای تخصیص ذخیره‌گر، مسئله بهینه‌سازی برای این هدف حل می‌شود. سایز و موقعیت ذخیره‌گر انرژی محدود (LES^۱) شین ۸۱ با توان اسمی ۲/۴۸ مگاوات است. برای ذخیره‌گر انرژی توزیع شده (DES^۲) شین و مقادیر نامی به ترتیب شین ۸۱ با ۱/۲۴۷، شین ۶۷ با ۰/۹۱۵، شین ۷۸ با ۰/۱ و شین ۹۱ با ۰/۲۳۵ مگاوات است.

جدول ۴: سایز و موقعیت نصب ذخیره‌گرها

DES		LES	
توان اسمی (مگاوات)	شین	توان اسمی (مگاوات)	شین
۱/۲۴۷	۸۱	۲/۴۸	۸۱
۰/۹۱۵	۶۷		
۰/۱	۷۸		
۰/۲۳۵	۹۱		

۳-۱ تحلیل نتایج: بررسی اثر منبع خورشیدی بر روی مشخصه ولتاژ و بهره‌برداری از LTC

اثر سطح نفوذ منبع خورشیدی بر روی مشخصه ولتاژ و تغییرات تپ در این بخش آنالیز می‌شود. تولید خورشیدی قرارگرفته در سیستم فیدری آزمون، با تزریق‌های توان اکتیو مستقل از ولتاژ با توان راکتیو صفر نمایش داده شده است. ولتاژ در پایانه‌های

^۱- Limit Energy Storage

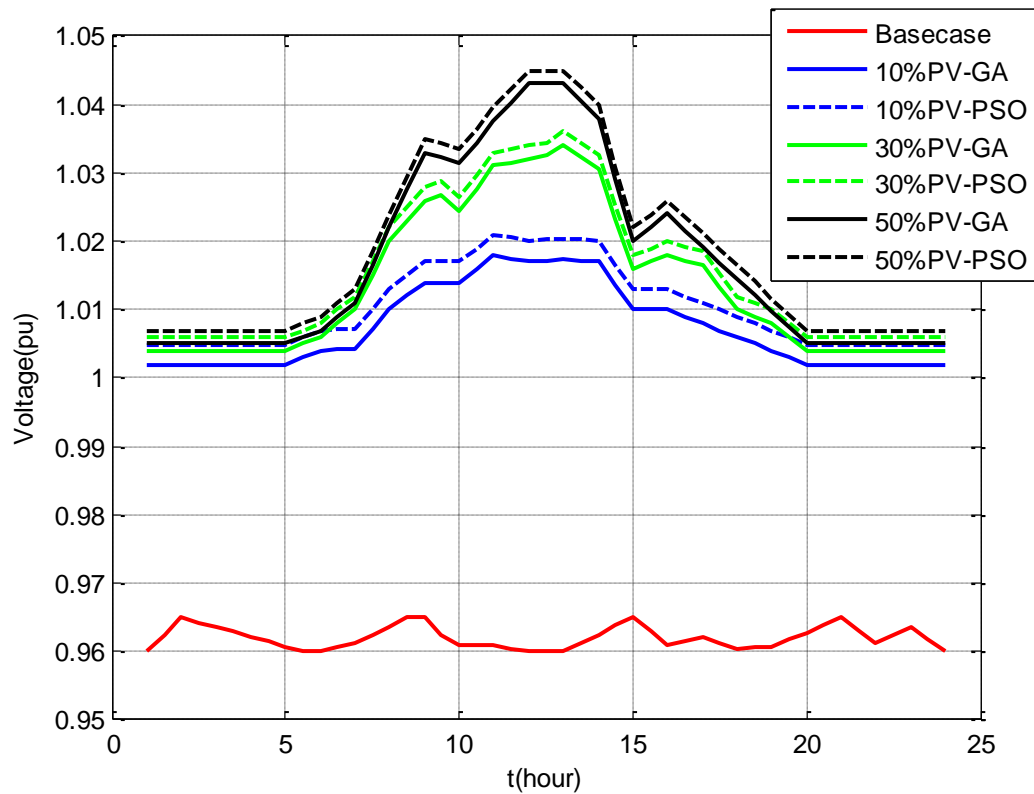
^۲- Distributed Energy Storage

شین ۴۵۰ مانیتور می‌شود، زیرا حساس‌ترین شین از نظر ولتاژی در سیستم آزمون است. پخش بار وضعیت پایه بدون در نظر گرفتن تولید فوتوولتائیک در آغاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. LTC با خازن‌های شناخت برای تنظیم ولتاژ سیستم هماهنگ می‌شوند. زمانبندی بهینه ۲۴ ساعتی خازن‌ها، LTC، و SVR در جدول ۵ نمایش داده شده است. عدد مثبت بیانگر تغییرات افزایشی تپ با افزایش ولتاژ بوده و عدد منفی بیانگر تنظیم رو به پایین در زمان کاهش یافتن ولتاژ است. صفر نیز بیانگر آن است که هیچ عملیاتی توسط رگلاتور انجام نمی‌شود. خازن یا سوئیچش روشن و یا خاموش است که ۱ بیانگر روشن و ۰ بیانگر خاموش است. تمامی خازن‌ها در یک ساعت مشابه روشن نشده‌اند مگر در ساعت بین ۱۳ و ۱۴ که در جدول ۵ آورده شده است. این موضوع برای جبران تقاضای بار در ساعت پیک روز با تزریق بیشتر توان به فیدر برای کاهش تلفات خط و بهبود مشخصه ولتاژ است. پخش بار برای زمان‌های مختلف در ۲۴ ساعت انجام می‌گیرد که مشخصه ولتاژ ۰/۹۶ پرونیوت و تپ رگلاتور LTC برابر با ۱/۰۶۲ را نتیجه می‌دهد که بدین معنی است که فقط یک تپ در حال بهره‌برداری است.

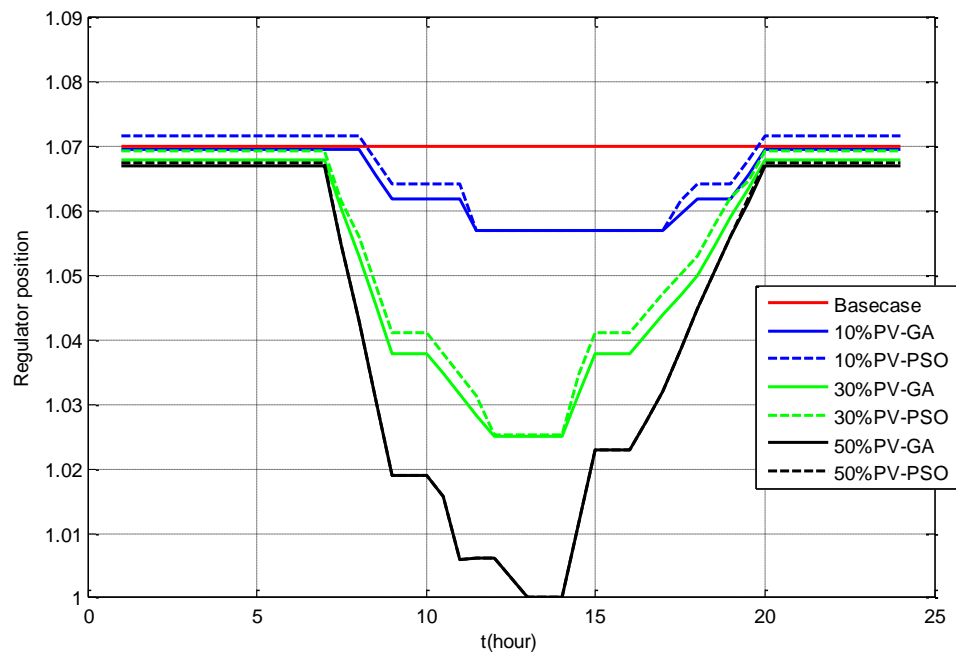
جدول ۵: زمان‌بندی بهینه خازن‌ها، LTC، و SVR در روش پیشنهادی برای ۲۴ ساعت

ساعت	LTC	SC1	SC2	SC3	SC4	SVR2	SVR3 (A-N)	SVR3 (C-N)	SVR4 (A)	SVR4 (B)	SVR4 (C)
۱	۳	۰	۱	۰	۱	-۱	۲	۰	۲	۲	۳
۲	۳	۰	۱	۰	۰	-۱	۲	-۱	۲	-۵	۳
۳	۳	۰	۰	۱	۱	-۱	۲	-۱	۱	-۵	۳
۴	۳	۱	۰	۰	۰	-۱	۲	-۱	۱	-۵	۳
۵	۳	۱	۰	۰	۰	-۱	۲	-۱	۱	-۵	۳
۶	۳	۱	۰	۱	۰	-۱	۲	-۱	۲	-۵	۵
۷	۳	۱	۰	۱	۰	-۱	۰	-۱	۲	۰	۵
۸	۳	۱	۰	۰	۱	-۱	۰	-۱	۲	۰	۴
۹	۳	۰	۱	۱	۱	-۲	۰	-۱	۳	۰	۴
۱۰	۴	۰	۱	۱	۱	-۲	۰	-۱	۳	۰	۴
۱۱	۴	۱	۱	۰	۰	-۲	۱	-۱	۲	۱	۴
۱۲	۴	۱	۱	۱	۰	-۲	۱	-۱	۲	۱	۴
۱۳	۴	۱	۱	۱	۱	-۲	۱	-۱	۲	۱	۳
۱۴	۴	۱	۱	۱	۱	-۲	۱	-۱	۲	۱	۳
۱۵	۴	۱	۰	۰	۱	-۲	۱	-۱	۱	۳	۱
۱۶	۴	۱	۰	۱	۰	-۲	۰	-۱	۱	۱	۱
۱۷	۲	۰	۰	۱	۱	-۲	۰	-۱	۱	۱	۱
۱۸	۲	۰	۱	۱	۰	-۱	۰	۰	۱	۲	۵
۱۹	۲	۱	۱	۱	۱	-۱	۱	۰	۴	۲	۵
۲۰	۲	۱	۰	۱	۱	-۱	۱	۰	۳	۱	۵
۲۱	۲	۱	۰	۰	۱	-۱	۱	۰	۳	۱	۵
۲۲	۲	۱	۱	۰	۰	-۱	۱	۰	۳	۱	۵
۲۳	۲	۰	۱	۱	۱	-۱	۲	۰	۲	۲	۵
۲۴	۲	۰	۱	۱	۱	-۱	۲	۰	۲	۲	۵

سطح نفوذ انتخابی به منظور آنالیز منابع خورشیدی در سه سطح انتخاب شده است که شامل ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد است. این پارامتر سطح نفوذ نسبت بین خروجی فوتوولتائیک و بار است یعنی داریم: $\gamma = 100\% * P_{oit}/P_{Dit}$. در سطوح نفوذ مختلف فوتوولتائیک، مشخصه ولتاژ در شکل ۵ نمایش داده شده است که تغییرات LTC متناظر نیز در شکل ۶ نمایش داده شده است. در شکل ۵ روش پیشنهادی با نماد GA با روش PSO مقایسه گردیده است که همچنان که مشاهده می‌شود روش ژنتیک توانسته به‌طور مناسبی ولتاژ را نسبت به PSO بهبود بخشد.



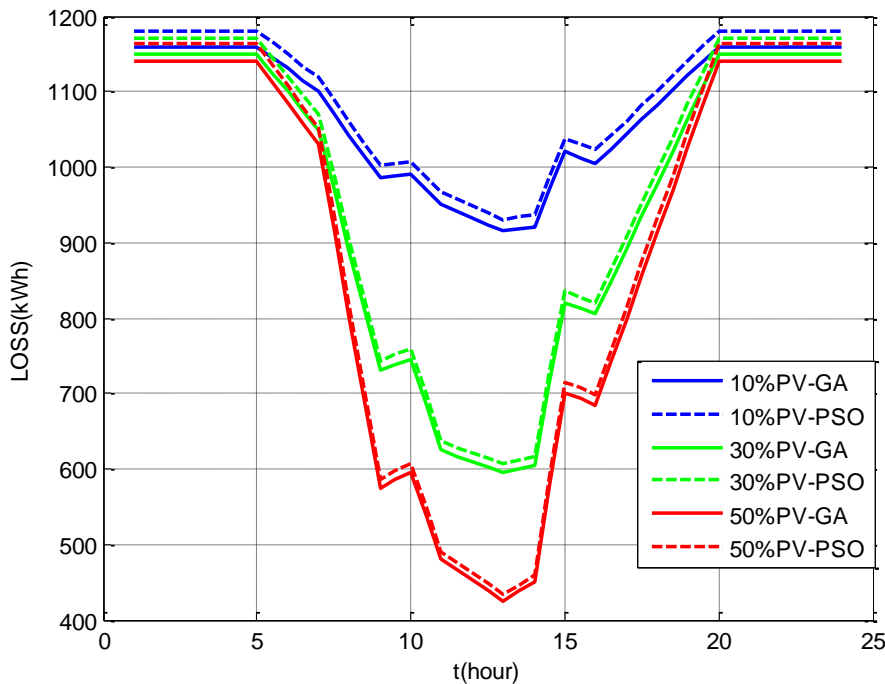
شکل ۵: مشخصه ولتاژ در سطوح نفوذ مختلف فوتوولتائیک تحت تنظیمات بهینه روش پیشنهادی



شکل ۶: موقعیت تپ در سطوح نفوذ مختلف فوتوولتائیک تحت تنظیمات بهینه و استراتژی هماهنگی

در شکل ۶ نیز تغییرات موقعیت رگلاتور نمایش داده شده است که همچنان که در این شکل مشاهده می شود علیرغم بدتر بودن مشخصه ولتاژ PSO بازهم تغییرات آن نسبتاً کمی بیشتر بوده و از این منظر نیز روش پیشنهادی برتری داشته است. البته برای سطح نفوذ ۵۰ درصد دو روش عملکرد تقریباً مشابهی داشته‌اند که در شکل ۴ نیز مشخصه ولتاژ در این سطح نفوذ تقریباً برای دو روش نزدیک به هم است. تجمع منابع فوتوولتائیک تلفات انرژی را به صورت شکل ۶ کاهش خواهد داد. تلفات

سیستم توزیع با افزایش سایز فوتوولتائیک کاهش می‌یابد. گرچه این رویه ممکن است ادامه دارد نبوده و مجدداً با معکوس شدن توان جاری شده، تلفات افزایش یابد. در شکل ۷ مشخص است که روش ژنتیک توانسته تلفات را نسبت به PSO بیشتر کاهش دهد.



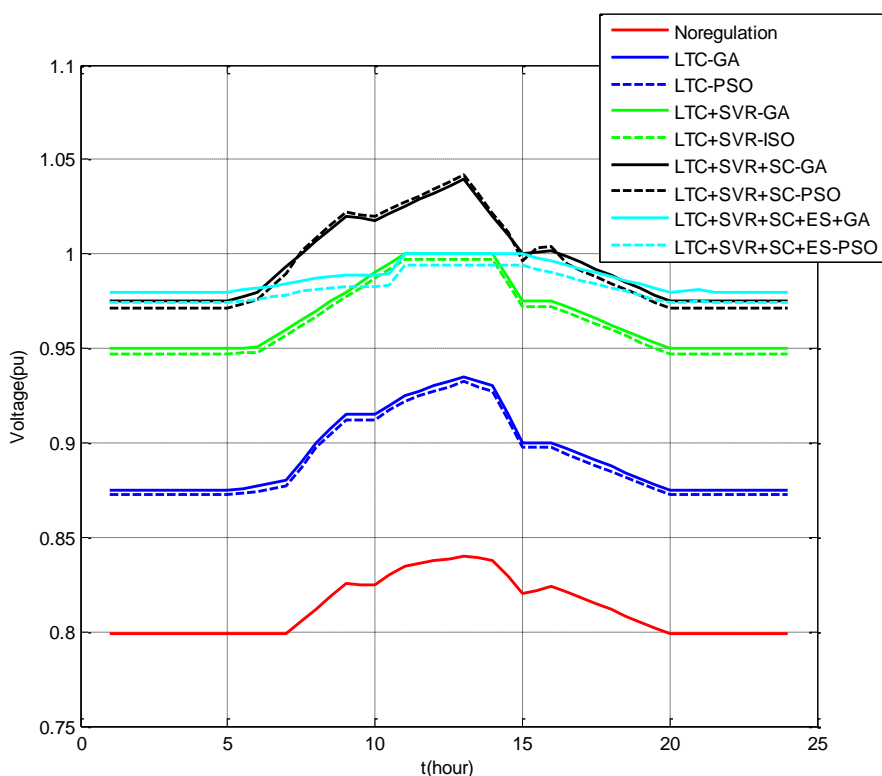
شکل ۷: تلفات انرژی در سطوح انرژی مختلف تحت تنظیمات بهینه روش پیشنهادی

۲-۳ تحلیل نتایج: بررسی هماهنگی LTC، SVR، بانک خازنی و ذخیره‌گر

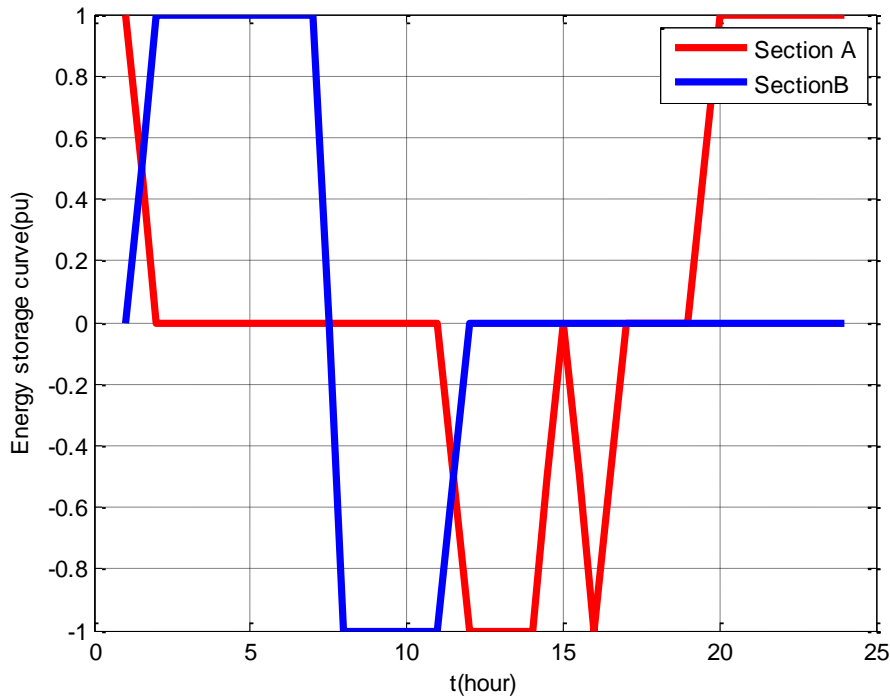
LTC ها و بانک‌های خازنی با ذخیره‌گرها برای یک بهره‌برداری نرم‌تر جهت دستیابی به اهداف مدنظر هماهنگ می‌شوند. ذخیره‌گر جهت مجزا سازی زمان تولید و مصرف انرژی استفاده می‌شود. سایز و موقعیت ذخیره‌گرها در جدول ۴ نمایش داده شده است. ولتاژ پرینیت ۲۴ ساعته سیستم تحت نفوذ ۳۰ درصد و پیک بار ۱۲ مگاوات در شکل ۷ نمایش داده شده است. LTC ها از نقاط تنظیم تغییری نداشته‌اند که به خاطر هماهنگی مناسب بوده است. پنج سناریو در اینجا مدنظر قرار می‌گیرد. اولین سناریو شامل غیرفعال کردن ادوات تنظیمی بوده و بر اساس آن مقادیر ثبت می‌شود. خروجی‌های ولتاژ در این حالت به زیر مقادیر مجاز افت می‌کند. زمانی که LTC در سناریوی دوم فعال می‌شود، مشخصه ولتاژ بهتر می‌شود اما همچنان زیر حدود مجاز ولتاژ است. زمانی که در سناریوی سوم SVR ها نیز فعال شدند، مقادیر ولتاژ در رنج مجاز قرار می‌گیرد ولی در بعضی از ساعات روی مرز حدود قرار دارد. هرگونه افزایش بار در سیستم سبب خروج از رنج مجاز ولتاژ می‌شود. در سناریوی چهارم، روشن شدن سوئیچ بانک‌های خازنی سبب بهبود مشخصه ولتاژ می‌شود. این کار سیستم توزیع را ایمن می‌نماید و مشخصه ولتاژ را صاف‌تر می‌کند. خازن‌ها اثر بسیار چشمگیری بر روی توان جاری شده راکتیو می‌گذارند. بنابراین این بانک‌های خازنی افت ولتاژ را به‌طور قابل توجهی جبران نموده و ولتاژ را در نزدیکی یک پرینیت حفظ می‌کنند. شایان ذکر است که LTC و SVR کل مشخصه ولتاژ را بالا می‌برند، درحالی‌که بانک‌های خازنی ولتاژ را در نزدیکی موقعیت‌هایشان بهبود می‌دهند. درنهایت، مجموع ذخیره انرژی ۲/۴۸۷ مگاواتی در فیدر در موقعیت‌های مشخص شده قرار می‌گیرد. سیستم ذخیره‌گر به دو بخش تقسیم می‌شود، زیرا ماکزیمم نرخ شارژ و دشارژ هر پنج ساعت است. بخش ۱ شامل ذخیره‌گرهای شین‌های ۸۱ و ۷۸ می‌شود. در بخش ۱، ذخیره‌گر برای دشارژ از ۲ تا ۷ صبح و شارژ از ۷ تا ۱۱ فعال می‌شود که در شکل ۹ با رنگ آبی نمایش داده شده است. بخش ۲ شامل تجمیع ذخیره‌گر در شین‌های ۶۷ و ۹۱ است که در ساعت ۱ و بین ساعات ۲۰ تا ۲۴ دشارژ شده و از ۱۱ تا ۱۴ و ساعت ۱۶ شارژ می‌شود که در شکل ۹ با رنگ قرمز نمایش داده شده است. هر دو بخش ۱ و ۲ مربوط به ذخیره‌گر، در ساعت ۱۵ و بین ۱۷ تا ۱۹ در حالت بدون استفاده است. ذخیره‌گر انرژی مشخصه ولتاژ را تقویت می‌نماید و بین

۰/۹۸۴ و ۱/۰۱ پر یونیت نگه می‌دارد که در شکل ۸ نمایش داده شده است. تجمع ذخیره‌گرها ارتقای مشخصه ولتاژ را تضمین می‌نماید، مخصوصاً زمانی که ولتاژ در شب پایین است. انحراف ولتاژ بدون ذخیره‌گر برابر با ۰/۰۶۳ پر یونیت است در حالی که با ذخیره‌گر به مقدار ۰/۰۱۸ می‌رسد. در شکل ۸ نیز مقایسه بین روش پیشنهادی و PSO انجام شده که نتایج حاکی از بهبود مناسب روش ژنتیک بوده است.

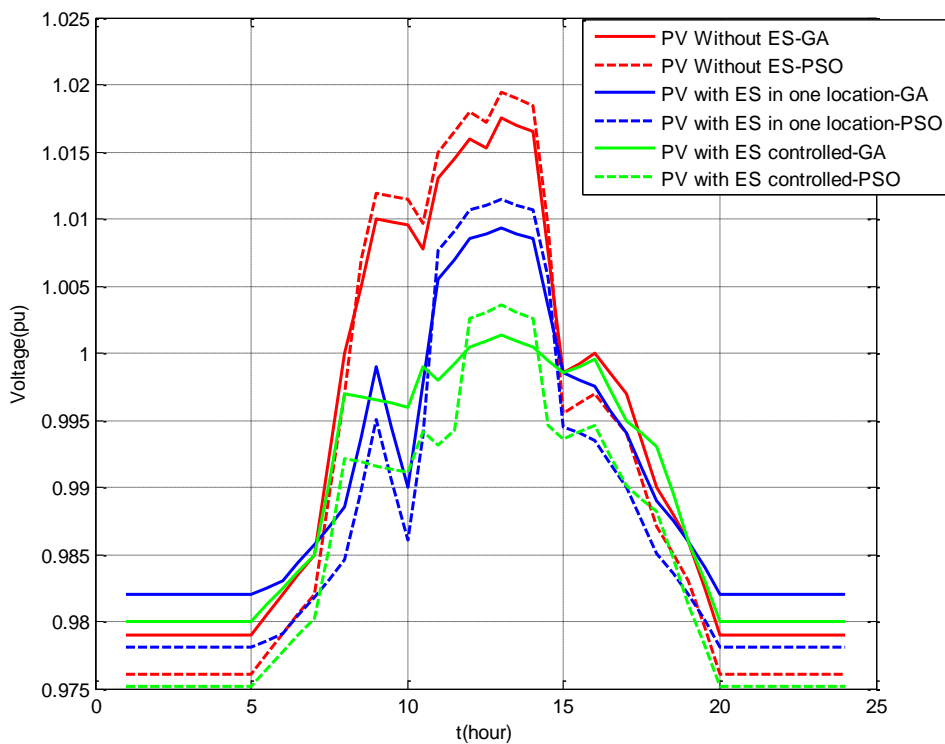
در ادامه به توزیع بهینه برحسب تخصیص ذخیره‌گرها می‌پردازیم. اثر ذخیره‌گر انرژی بر روی کاهش افت ولتاژ در این بخش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. کاربرد DES و LES در یک موقعیت تکی بررسی می‌شود. DES در موقعیت‌ها مطابق جدول ذخیره‌گرها توزیع می‌شود در حالی که LES فقط در شین ۸۱ قرار دارد. توان اسمی ذخیره‌گر ۲/۴۸۷ مگاوات است که در فیدر با سطح نفوذ فوتولتائیک ۳۰ درصد توزیع شده است در این شرایط پیک بار نیز ۱۲ مگاوات است. اثر حضور ذخیره‌گر بر روی مشخصه ولتاژ در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در یک حالت فوتولتائیک بدون ذخیره‌گر استفاده شده که مینیمم ولتاژ ۰/۹۷۹ و ماکزیمم ولتاژ ۱/۰۱۷ پر یونیت را نتیجه داده است. مشخصه ولتاژ DES تجمع شده با فوتولتائیک نیز حالت دیگری است که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است که در این حالت مینیمم و ماکزیمم ولتاژ به ترتیب ۰/۹۸۴ و ۱/۰۰۱ پر یونیت و تلفات توان ۵۸۷٫۷ کیلووات است. نتیجه نصب LES با ظرفیت مشابه در شین ۸۱ نیز در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. در این حالت مینیمم ولتاژ و ماکزیمم ولتاژ به ترتیب ۰/۹۸۱ و ۱/۰۰۷ پر یونیت و تلفات ۵۸۷/۹ کیلووات است. DES در کم کردن افزایش ولتاژ بهتر از LES عمل می‌نماید. DES قادر به نزدیک کردن مشخصه ولتاژ به یک پر یونیت و با انحرافات ولتاژ کمتر است. در حالی که LES به‌طور چشمگیری انرژی را در ساعت ۸ و ۱۰ کاهش داده است و نمی‌تواند به‌طور مناسبی بین ساعات ۱۱ تا ۱۴ شارژ را انجام دهد. این موضوع نشان می‌دهد که بهره‌برداری شارژ و دشارژ DES بهتر از LES است. DES در واقع نزدیک‌تر به شین‌های با تغییرات ولتاژ بیشتر قرار می‌گیرد. این موضوع منجر به بهره‌برداری بهتر و امنیت بهتر شبکه می‌شود. همچنین مقایسه روش‌های پیشنهادی ژنتیک و PSO نشانگر آن است که روش ژنتیک روش مناسبی بوده و مشخصه ولتاژ در این حالات نیز بهتر از مقادیر PSO است.



شکل ۸: مشخصه ولتاژ در حالات مختلف با استفاده از هماهنگی ادوات کنترلی و روش پیشنهادی



شکل ۹: منحنی برنامه‌ریزی ذخیره‌گر در استراتژی هماهنگی



شکل ۱۰: بررسی اثر موقعیت ذخیره‌گر بر روی مشخصه ولتاژ

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای تنظیم ولتاژ توسط ذخیره‌گرها، تولید متغیر منابع تولید پراکنده و ادوات کنترلی ارائه شده. فرض گردید که منابع فوتوولتائیک متغیر در موقعیت‌های مختلف و پراکنده به سیستم توزیع متصل می‌گردند. برای هماهنگی میان ادوات مختلف استراتژی مطلوبی ارائه شد. هماهنگی‌ها شامل پیکربندی فیدرها، مشخصه تقاضا، نقاط تنظیمی تپ چنجرهای

ترانسفورماتورها، تنظیمات بانک‌های خازنی و ذخیره‌گرها است. روش پیشنهادی یک پلت فرم مشترک ارائه داده است که زمان‌بندی بانک‌های خازنی شانت و تپ چنجرهای ترانسفورماتورها را از شرایط کنونی سیستم هماهنگ می‌سازد تا مشخصه ولتاژ سیستم ضمن کمینه‌سازی تلفات در بازه زمانی بهره‌برداری حفظ شود. روش پیشنهادی ذخیره‌گرها را نیز برای نرم کردن خروجی نوسانی تولید خور شیدی در بهره‌برداری ساعتی برنامه‌ریزی می‌نماید. مسئله در یک فرمت بهینه سازی چند دوره‌ای فرمول‌بندی می‌شود که شامل متغیرهای گسسته است. روش بهینه‌سازی ژنتیک برای حل مسئله و دستیابی به راه‌حل بهینه یعنی مینیمم تغییرات ولتاژی و حداقل تلفات فیدرها استفاده گردید.

روش پیشنهادی در شبکه آزمون ۱۲۳ شین IEEE در محیط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی گردید. نتایج نشان می‌دهد که تجمیع منابع فوتوولتائیک تلفات انرژی را کاهش داده و تلفات سیستم توزیع با افزایش سایز فوتوولتائیک کاهش می‌یابد. نتایج همچنین مشخص می‌کند که با افزایش سطح نفوذ منابع فوتوولتائیک، ولتاژ بیشتر افزایش می‌یابد و به تعداد تغییر تپ و تغییرات SVR بیشتری برای حفظ ولتاژ نیاز است. پنج سناریو موردبررسی قرار گرفت. اولین سناریو شامل غیرفعال کردن ادوات تنظیمی بوده و بر اساس آن مقادیر ثابت شد. زمانی که LTC در سناریوی دوم فعال گردید، مشخصه ولتاژ بهتر شد اما همچنان زیر حدود مجاز ولتاژ است. زمانی که در سناریوی سوم SVRها نیز فعال شدند، مقادیر ولتاژ در رنج مجاز است ولی در بعضی از ساعات روی مرز حدود قرار دارد. هرگونه افزایش بار در سیستم سبب خروج از رنج مجاز ولتاژی شد. در سناریوی چهارم، روشن شدن سوئیچ بانک‌های خازنی سبب بهبود مشخصه ولتاژ شدند. این کار سیستم توزیع را ایمن می‌نماید و مشخصه ولتاژ را صاف‌تر می‌کند. خازن‌ها اثر بسیار چشمگیری بر روی توان جاری شده راکتیو گذاشت. از این‌رو این بانک‌های خازنی افت ولتاژ را به‌طور قابل‌توجهی جبران نموده و ولتاژ را در نزدیکی یک پریونیت حفظ کردند. همچنین LTC و SVR کل مشخصه ولتاژ را افزایش دادند، درحالی‌که بانک‌های خازنی، ولتاژ را در نزدیکی موقعیت‌هایشان بهبود بخشیدند.

مراجع

- [1] M.H. Amini, M.P. Moghaddam, O. Karabasoglu , "Simultaneous allocation of electric vehicles' parking lots and distributed renewable resources in power distribution network," *Sustainable Cities and Society*, vol.28,no.1,pp.332-342,2017, doi:10.1016/j.scs.2016.10.006.
- [2] M. Aryanezhad, M. Joorabian, E. Ostadaghaee, "A novel simplified approach to complexity of power system components including nonlinear controllers based model reduction," *Int J Electr Power Energy Syst*, vol.73, 2015, doi:10.1016/j.ijepes.2015.05.013.
- [3] X. Li, T. Borsche, G. Andersson, "PV integration in Low-Voltage feeders with Demand Response," *IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1-6, doi:10.1109/PTC.2015.7232251.
- [4] H. Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu, C.N. Rasmussen, "Review of energy storage system for wind power integration support," *Appl Energy*, vol.137, pp.545-553,2015, doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.103.
- [5] M. Farrokhifar, "Optimal operation of energy storage devices with RESs to improve efficiency of distribution grids: technical and economical assessment," *Int J Electr Power Energy Syst*, vol.74, pp.153-161,2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.07.029>.
- [6] M. Chamana and B. H. Chowdhury, "Optimal Voltage Regulation of Distribution Networks With Cascaded Voltage Regulators in the Presence of High PV Penetration," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 1427-1436, July 2018, doi: 10.1109/TSTE.2017.2788869.
- [7] Y. Guo, Q. Wu, H. Gao, X. Chen, J. Østergaard and H. Xin, "MPC-Based Coordinated Voltage Regulation for Distribution Networks With Distributed Generation and Energy Storage System," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1731-1739, Oct. 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2869932.
- [8] C. Jamroen, A. Pannawan and S. Sirisukprasert, "Battery Energy Storage System Control for Voltage Regulation in Microgrid with High Penetration of PV Generation," in *International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2018.8541888.

- [9] M. Khadem, M. Esmailbeig, "Optimize the Number, Locating, and Sizing of D-STATCOM and DGs Using GA Algorithm," *Journal of Communication Engineering*, vol. 11, no.41, pp. 29-42, 2021 (in Persian).
- [10] M. Khadem, M. Najafi, "Demand Planning and Transmission Network Development in the Capacity Market Using Microgrids," *Journal of Communication Engineering*, vol. 11, no.41, pp. 43-58, 2021 (in Persian).
- [11] S. Naseri, M. Najafi, M. Esmailbeig, "Economic Dispatch Problem for Minimizing Cost and Improving Reliability Considering Uncertainty," *Journal of Communication Engineering*, vol. 11, no.41, pp. 77-91, 2021 (in Persian).
- [12] T. A. Nguyen, R. Rigo-Mariani, M. A. Ortega-Vazquez and D. S. Kirschen, "Voltage Regulation in Distribution Grid Using PV Smart Inverters," *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2018.8586453.
- [13] T. Cui, Y. Shen, L. Liang, B. Zhang, H. Guo and J. Zuo, "Real-Time Voltage Regulation of Distributed Power Grids with Wind Power Integration," in *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2018, pp. 2102-2107, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8602299.
- [14] J. Liua, Y. Li, C. Rehtanz, Y. Cao, X. Qiao, G. Lina, Y. Songc, C. Sun, "An OLTC-inverter coordinated voltage regulation method for distribution network with high penetration of PV generations," *Electrical Power and Energy Systems*, vol.113,no.1,2019, doi:10.1016/j.ijepes.2019.06.030.
- [15] I. Bendato, A. Bonfiglio, M. Brignone, F. Delfino, F. Pampararo, R. Procopio, "A real-time energy management system for the integration of economical aspects and system operator requirements: definition and validation," *Renew Energy*, vol.102, 2017, doi:10.1016/j.renene.2016.10.061.
- [16] J. Krata, T.K Saha., R. Yan, "Model-driven real-time control coordination for distribution grids with medium-scale photovoltaic generation," *IET Renew Power Gener*, vol.11,no.12,2017,doi:10.1049/iet-rpg.2017.0096.
- [17] M. Nick, M. Hohmann, R. Cherkaoui and M. Paolone, "Optimal location and sizing of distributed storage systems in active distribution networks," in *IEEE Grenoble Conference*, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2013.6652514.
- [18] W. Chang, "The state of charge estimating methods for battery: a review," *International Scholarly Research Notices*, vol. 2013, doi:10.1155/2013/953792.
- [19] N. Watrin, B. Blunier and A. Miraoui, "Review of adaptive systems for lithium batteries State-of-Charge and State-of-Health estimation," in *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITEC.2012.6243437.
- [20] J. Chiasson and B. Vairamohan, "Estimating the state of charge of a battery," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 465-470, May 2005, doi: 10.1109/TCST.2004.839571.
- [21] K. Soon, C. Moo, Y. Chen, Y. Hsieh, "Enhanced coulomb counting method forestimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries," *Appl.Energy*, vol.86,no.9,2009, doi:10.1016/j.apenergy.2008.11.021.
- [22] W. H. Kersting, "Radial distribution test feeders," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 975-985, Aug. 1991, doi: 10.1109/59.119237.
- [23] M. Aryanezhad, "Management and coordination of LTC, SVR, shunt capacitor and energy storage with high PV penetration in power distribution system for voltage regulation and power loss minimization," *Electrical Power and Energy Systems*, vol.100,pp.178-192, 2018, doi:10.1016/j.ijepes.2018.02.015.

Using Genetic Optimization Algorithm in Coordination of Capacitor Banks, Transformer Tap Changers and Storage Devices in the Presence of Solar Systems

Ismail Azarkish^{1*}, Mostafa Esmael Beag²

1*: Master of Electrical Engineering, Islamic Azad University Bushehr Branch, Bushehr, Iran,
Esmael.azarkish64@gmail.com

2: Assistant Professor, Islamic Azad University Bushehr branch, Bushehr, Iran, me_beag@yahoo.com

ABSTRACT:

The use of renewable energy sources imposes new challenges on the electricity grid. This is mainly due to the variable nature and uncertainty of this type of resources. When the generation of renewables exceeds local demand, it may cause a reverse power flow in the feeder distribution. Reverse power flow may cause voltage rise and improper operation of voltage regulators. In this paper, a method for voltage regulation is proposed by using storage devices, variable generation of distributed generation sources and control devices. A strategy has been proposed for coordination between the various voltage regulating device. In the coordination method, the aim is to improve the system voltage profile while minimizing losses during the operation period. Genetic optimization method has been used to solve the problem and achieve the optimal solution, ie minimum voltage changes and minimum feeder losses. The proposed method is implemented in IEEE 123 bus test network in MATLAB software environment. Analysis of the results showed that the presense of photovoltaic sources reduces energy losses and the losses of the distribution system decrease with increasing photovoltaic size. The results also show that as the penetration level of photovoltaic sources increases, the voltage increases further and more tap changing and SVR changes are required to maintain the voltage. It was also proved that turning on the capacitor bank switch improves the voltage profile and the use of storage devices maximizes system security.

KEYWORDS: Coordination of Voltage devices, SVR, Photovoltaic Resources, Capacitor Bank