

## Optimization of Centralized Control of Volt/Var in Transmission Systems Based on Economic Dispatch and Harmony Search Algorithm

Kamal Rouhollahi<sup>1</sup>, *MSC Student*, Mohammad Mahdi Rezaei<sup>1</sup>, *Assistant Professor*, Seyed Mohammad Madani<sup>2</sup>, *Associated Professor*

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Faculty of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

### Abstract:

Maintaining the voltage profile of the power system within the appropriate bound has been a key factor for the proper operation of system equipment, especially during disturbances. However, due to the uncertainty of the load powers and the limitation in equipment ratings, achieving this goal has become a challenge. High voltage substations play an important role in voltage control, because these substations can be a primary connection point between the high voltage transmission network and the distribution system. The nature of local voltage control, the variety of control tools and the interaction between them, have made this type of control difficult. In this paper, a centralized voltage/reactive power control method is presented based on phasors measured by PMUs installed in grid substations. In this method, the tap changing of transformers and step switching of capacitor banks have been determined by the central controller based on system voltages and network equations. In addition, the appropriate values of the operating point of the generators have been carried out based on economic dispatch in each period of optimization. The consistent and efficiency of the proposed method have been investigated through simulation in MATLAB software environment.

**Keywords:** Power systems optimization, centralized voltage/reactive power control, economic load dispatch, harmony search algorithm.

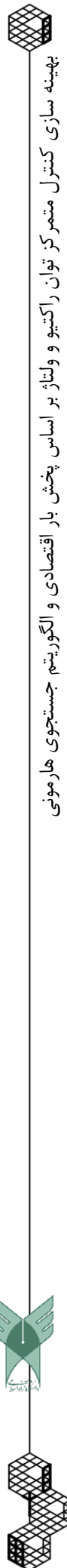
**Received:** 17 August 2022

**Revised:** 16 October 2022

**Accepted:** 01 November 2022

**Corresponding Author:** Dr. Mohammad Mahdi Rezaei, mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1968162.1038>



## فناوری‌های نوین در مهندسی برق و سیستم انرژی سبز

### بهینه‌سازی کنترل متمرکز توان راکتیو و ولتاژ در شبکه های انتقال، بر اساس پخش بار اقتصادی و الگوریتم جستجوی هارمونی

کمال روح الهی<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد، محمدمهدی رضایی<sup>۱</sup>، استادیار، سیدمحمد مدنی<sup>۲</sup>، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

**چکیده:** حفظ پروفیل ولتاژ در سطح مناسب برای هرباس در سیستم قدرت، یک عامل کلیدی برای عملکرد مناسب تجهیزات سیستم قدرت بویژه در هنگام بروز اختلال است. با این حال، با توجه به عدم قطعیت بار و محدودیت در عملکرد شبکه، دستیابی به این هدف به یک چالش تبدیل شده است. پست‌های فشارقوی در کنترل ولتاژ نقش مهمی ایفا می‌کنند؛ زیرا این پست‌ها می‌توانند یک نقطه اتصال اولیه بین شبکه انتقال با ولتاژ بالا و سیستم توزیع باشند. ماهیت کنترل محلی ولتاژ، تنوع ابزار کنترل و تعامل میان آنها باعث شده است که این نوع کنترل دشوار باشد. در این مقاله، یک روش کنترل متمرکز ولتاژ/توان راکتیو در سیستم‌های قدرت با استفاده از فازورهای اندازه‌گیری شده توسط مانند واحدهای اندازه‌گیری فازوری (PMU) نصب شده در پست‌های شبکه ارائه شده است. در این روش، کنترل کننده مرکزی بر اساس ولتاژهای شبکه و همچنین معادلات شبکه، علاوه بر تعیین تپ ترانسفورماتورها و پله بانکهای خازنی، با انجام پخش بار بهینه، مقادیر مناسب نقطه کار ژنراتورها را نیز بطور بهینه تعیین کند. صحت و کارایی روش پیشنهادی از طریق شبیه سازی در محیط نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفته است.

**واژه های کلیدی:** بهینه‌سازی سیستم های قدرت، کنترل متمرکز ولتاژ/توان راکتیو، پخش بار اقتصادی، الگوریتم جستجوی هارمونی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۰

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدمهدی رضایی، mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir

10.30486/teeges.2022.1968162.1038/DOI: <http://dx.doi.org>





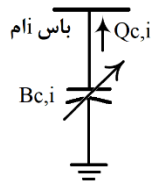
بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، با توجه به عدم قطعیت‌های متعددی که نقطه کار این سیستم‌ها را مدام جابجا می‌کند، نیازمند ارائه روش‌های کنترل مناسب است [۱،۲]. کنترل ولتاژ، توان راکتیو و جریانهای خط از جمله مهمترین فعالیتهای بهره‌برداری از سیستمهای قدرت مدرن به شمار می‌روند. این کنترل به عنوان کنترل "ولتاژ/توان راکتیو" یا "Volt/Var" شناخته می‌شود. هدف اصلی این کنترل را می‌توان به طور کلی تلاش برای بهبود امنیت، کیفیت توان و کاهش تلفات در نظر گرفت [۳،۴]. امنیت سیستم به سطوح ولتاژ و ذخایر توان راکتیو کافی برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ و حفظ یکپارچگی سیستم در هنگام وقوع حوادث غیرمترقبه نیاز دارد. کیفیت توان و کاهش تلفات نیز نیازمند حفظ ولتاژ تمام باس‌های سیستم در محدوده مناسب و اطمینان از جریان‌های راکتیو مناسب خط بطوری که منجر به حداقل تلفات انتقال شود، می‌باشد.

مشکل اساسی کنترل ولتاژ نحوه حفظ این کمیت با عملکرد تجهیزات تنظیم کننده است [۵]. شرکت‌های برق منطقه‌ای، کنترل ولتاژ را با تزریق توان راکتیو به شبکه انتقال توسط منابع توان راکتیو مانند بانک‌های خازن قابل سوئیچ‌زنی یا بانک‌های راکتور، و بانک‌های ترانسفورماتور دارای تپ زیر بار ( $OLTC^1$ )، اعمال می‌کنند. کنترل ولتاژ ارتباط نزدیکی با کنترل توان راکتیو دارد بطوریکه با کنترل مناسب آن می‌توان اهداف فوق الذکر را محقق کرد. در سال‌های اخیر، کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه فشار قوی به دلیل نیاز به استفاده کارآمدتر از زیرساخت‌های انتقال، ورود تجهیزات جدید مانند  $PMU^2$  و افزایش تجهیزات مبتنی بر الکترونیک قدرت، به طور فزاینده‌ای ضروری شده است. برخلاف کنترل فرکانس که یک پدیده در سطح سیستم است و به یک کنترل متمرکز مانند کنترل تولید خودکار ( $AGC^3$ ) نیاز دارد، کنترل ولتاژ و توان راکتیو یک مشکل محلی است. ماهیت محلی مشکل کنترل ولتاژ، تنوع تجهیزات کنترلی و تعامل بین آنها این کار را بطور ویژه‌ای دشوار می‌کند.

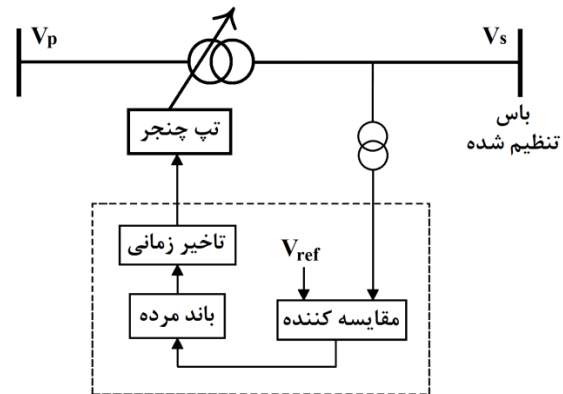
روش‌های ریاضی مختلفی تاکنون برای حل مساله کنترل بهینه Volt/Var پیشنهاد شده است که می‌توان به برنامه‌ریزی نیمه معین، برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی خطی، رویکرد مبتنی بر روش نیوتن، روش‌های نقطه داخلی، برنامه‌ریزی خطی فازی و روش کمینه سازی بدون محدودیت متوالی، اشاره کرد [۶،۷]. این روش‌ها می‌توانند قیود نابرابری را اعمال کنند و خواص همگرایی بالایی دارند. اما، از آنجا که این روش‌ها به تنظیمات اولیه متکی هستند، نمی‌توانند نتیجه بهینه واقعی را ایجاد کنند و ممکن است در نقاط کمینه محلی توقف کنند. علاوه بر این، هر روش باید با استفاده از یک نوع خاص از فرموله سازی نمایش داده شود، بنابراین این روشها نمی‌توانند به طور یکپارچه با متغیرهای عدد صحیح و گسسته کنار بیایند. در نتیجه، استفاده از روش‌های فرا ابتکاری برای غلبه بر اشکالات ذکر شده اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد [۸-۱۱].

در [۶]، یک روش کنترلی برای تغییر تپ ترانسفورماتورهای OLTC و بانک‌های خازنی بمنظور عملکرد بهینه سیستم قدرت، با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز جستجوی شبکه‌های اجتماعی ارائه شده است. یک روش بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی در [۱۲]، با تغییر استراتژی حرکت عنکبوت‌های نر و ماده به نسبت مناسب، پیشنهاد شده است. در [۱۳]، روش‌های بهینه‌سازی تجمع ذرات و الگوریتم گرگ‌های خاکستری ترکیب شده‌اند. در [۱۴]، مساله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن نفوذ منابع تجدیدپذیر با عدم قطعیت به دلیل نوسانات آب و هوا فرموله شده است. در این مرجع، از یک روش مبتنی بر بهینه‌سازی جستجوی آنتن سوسک، با در نظر گرفتن بارگذاری‌های ساعتی زمان واقعی، استفاده شده است. بمنظور حل مساله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، از روش‌های جستجوی تکاملی، جستجوی تفاضلی در [۱۵،۱۶] استفاده شده است. در [۱۷،۱۸]، یک مدل بهبود یافته از روش تکامل تفاضلی ارائه شده است که در آن، عامل جهش به جای ثابت بودن، به صورت پویا تغییر می‌کند. در [۳]، از الگوریتم جستجوی گرانشی برای بهبود پروفیل ولتاژ، پایداری ولتاژ و به حداقل رساندن تلفات توان استفاده شده است. در [۱۹] نیز، برنامه‌ریزی بهینه منابع توان راکتیو برای تقویت سیستم‌های قدرت در شرایط احتمالی ارائه شده است. این الگوریتم‌ها همگی توانسته‌اند مسائل بهینه‌سازی را به شکل قابل قبولی حل کنند. اما، نکته‌ای که وجود دارد این است که هم تپ ترانسفورماتور و هم پله‌های بانک خازنی ورودی‌های کنترلی گسسته هستند. بنابراین روش‌های پیوسته به سادگی قادر نیست به راه حل سراسری واقعی دستیابی پیدا کند.





شکل (۱-ب): مدل بانک خازنی [۲۷]



شکل (۱-الف): شمایی کلی از یک ترانسفورماتور OLTC [۲۶]

در زمینه بهینه‌سازی، برای یافتن حل بهینه‌سازی سراسری، الگوریتم فراابتکاری دیگری که از زیست انسان الهام گرفته شده الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA<sup>4</sup>) است [۲۰، ۲۱]. این الگوریتم، حل مسئله بهینه‌سازی را با تلاش برای رسیدن به یک هارمونی بهینه و زیبا شبیه‌سازی می‌کند. در این روش، هارمونی موسیقی مشابه با بردار جواب بهینه‌سازی و ابتکارات نوازندگان مشابه با متغی‌رهای جستجوی الگوریتم در نظر گرفته شده‌اند. الگوریتم HSA در مقایسه با دیگر روشهای بهینه‌سازی عددی برتری‌هایی دارد که از جمله آن می‌توان به توانایی کار با متغی‌رهای گسسته و احتمال بسیار کمتر به دام افتادن در نقاط بهینه موضعی اشاره نمود. همچنین این الگوریتم از برخی ویژگی‌های سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری مانند حفظ بردارهای قبلی، حفظ حافظه هارمونی از شروع تا پایان و ارزیابی چندین بردار در یک زمان نیز استفاده می‌کند. اما در مقایسه با آن‌ها پیش نیازهای ریاضی کمتری به کار برده و توانایی حل مسائل مختلف بهینه‌سازی را دارد [۲۲-۲۴].

در اغلب مطالعات انجام شده، اثر متقابل تغییرات توان اکتیو تولیدی ژنراتورها بر پروفیل ولتاژ و توزیع توان راکتیو سیستم صرف نظر شده است. در این مقاله، یک روش بهینه کنترل ولتاژ و توان راکتیو با استفاده از فازورهای اندازه گیری شده توسط PMUهای نصب شده در پست‌های شبکه انتقال ارائه شده است. در این روش، یک کنترل کننده مرکزی بر اساس ولتاژهای شبکه، علاوه بر تعیین تپ ترانسفورماتورها و مقادیر مناسب پله بانکهای خازنی، با انجام پخش بار بهینه، نقطه کار ژنراتورها را نیز بطور بهینه تعیین می‌کند. بمنظور حل مساله بهینه‌سازی، از روش جستجوی هارمونی استفاده شده است. این روش کارایی بسیار مناسبی برای یافتن راه حل بهینه سراسری بویژه در مسائل بهینه‌سازی گسسته دارد. اگر چه هدف اصلی در این مقاله کنترل مناسب ولتاژ و توان راکتیو است، عملکرد بهینه سیستم قدرت بدون بهینه‌سازی پخش توان اکتیو یا همان پخش بار بهینه امکان پذیر نیست. آنچه این مقاله را از اغلب مطالعات مشابه متمایز می‌کند، بهینه‌سازی همزمان توان های اکتیو و راکتیو سیستم قدرت است. کارایی روش پیشنهادی از طریق شبیه سازی در یک سیستم قدرت ۱۴ باس IEEE در نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- کنترل توان راکتیو و ولتاژ در سیستم انتقال

در سیستم‌های انتقال، توان‌های اکتیو و راکتیو وابستگی کمی به یکدیگر دارند و می‌توان آنها را بطور تقریبی مستقل از یکدیگر در نظر گرفت. کنترل توان راکتیو بیشتر وابسته به اندازه ولتاژ باس‌ها می‌باشد. بنابراین کنترل مناسب توان راکتیو می‌تواند باعث بهبود پروفیل ولتاژ شده و در نتیجه، کیفیت توان سیستم‌های قدرت را ارتقاء دهد. در پستهای فشارقوی، ترانسفورماتورهای دارای تپ‌چنجر و بانکهای خازنی ابزارهای اصلی کنترل ولتاژ و توان راکتیو به شمار می‌روند. در ادامه به معرفی این تجهیزات پرداخته شده است.

### ۲-۱- کنترل ولتاژ با استفاده از ترانسفورماتورهای دارای تپ چنجر

استفاده از ترانسفورماتورهای دارای تپ‌چنجر زیر بار (OLTC)، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای کنترل ولتاژ در پستهای فشارقوی می‌باشد. در این روش، تنظیم کننده ولتاژ اتوماتیک با ارسال فرمان تغییر تپ و در نتیجه، تغییر نسبت تبدیل ترانسفورماتور، ولتاژ سمت فشار ضعیف را کنترل می‌کند. سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای تپ دار معمولاً در سمت فشار قوی دارای نسبت تبدیل متغیر می‌باشد که با تغییر پله‌ای این نسبت می‌توان ولتاژ سمت فشار ضعیف را در یک محدوده مشخص تغییر داد. شکل (۱-الف) شمای کلی از





یک ترانسفورماتور OLTC را نشان می‌دهد [۲۶]. در رابطه (۱)، معادله حالت مانای ترانسفورماتور دارای تپ ارائه شده است [۲۶].

$$V_s = \frac{1}{a} V_p - \frac{aZS}{V_p^*} \quad (1)$$

که در آن  $a$  نسبت تبدیل ترانسفورماتور،  $V_p$  و  $V_s$  به ترتیب ولتاژ اولیه و ثانویه،  $Z_t$  امپدانس سیم‌پیچ و  $S$  بار ترانسفورماتور است. از رابطه (۱) می‌توان مشاهده کرد که ولتاژ ثانویه  $V_p$  به نسبت تبدیل  $a$  وابسته است و از این رو با تغییر آن، می‌توان ولتاژ ثانویه  $V_p$  را تنظیم کرد. با افزایش تپ می‌توان ولتاژ فشار ضعیف ترانس را کاهش و بالعکس با کاهش تپ می‌توان ولتاژ فشار ضعیف را افزایش داد و از این طریق ولتاژ را کنترل کرد.

## ۲-۲- کنترل توان راکتیو بر اساس بانکهای خازنی

در پستهای فشارقوی، مجموعه‌ای از بانکهای خازنی به باس فشار ضعیف متصل هستند که با ورود یا خروج پله‌ای آنها می‌توان توان راکتیو اصطلاحاً تزریقی به شبکه را کنترل نمود. در رابطه (۲)، توان تزریقی توسط بانک خازنی به باس  $i$  ارائه شده است [۲۷].

$$Q_{ci} = B_{ci} V_i^2 \quad (2)$$

با ورود پله‌های بیشتری از بانکهای خازنی به مدار، توان راکتیو تزریقی شبکه افزایش و با خروج پله‌های بانک خازنی از مدار، توان راکتیو کاهش می‌یابد و به ترتیب، موجب افزایش و کاهش ولتاژ می‌گردد. کلیدزنی و ورود و خروج پله‌ای بانک خازنی در پستهای فشارقوی معمولاً توسط رله‌های کنترل VAR انجام می‌شود.

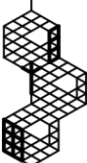
## ۳- بهینه‌سازی کنترل متمرکز توان راکتیو و ولتاژ

سیستم‌های قدرت متشکل از چندین ژنراتور، پست فشارقوی و خطوط انتقال هستند که توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بارهای سیستم را تامین می‌کنند. توان‌های اکتیو و راکتیو بارهای سیستم مقادیر نامعینی هستند که بسته به شرایط و عوامل مختلفی مدام در حال تغییر می‌باشند. بنابراین می‌توان گفت سیستم قدرت، یک سیستم دینامیکی است که نقطه کار حالت مانای آن مدام در حال تغییر می‌باشد. بنابراین بهینه‌سازی و بهره‌برداری بهینه از این سیستم مستلزم آن است که در فواصل زمانی مشخص، شرایط جدید سیستم مورد پایش و ارزیابی قرار گیرد و متغیرهای حالت اصلی سیستم چنان کنترل شوند که علاوه بر قرارگیری آنها در محدوده مجاز، توابع هدفی مانند تلفات و پروفیل ولتاژ بهینه گردند. اگر چه هدف اصلی در این مقاله کنترل مناسب ولتاژ و توان راکتیو است، عملکرد بهینه سیستم قدرت بدون بهینه‌سازی پخش توان اکتیو یا همان پخش بار اقتصادی امکان پذیر نیست. آنچه این مقاله را از اغلب مطالعات مشابه متمایز می‌کند، بهینه‌سازی همزمان توان‌های اکتیو و راکتیو سیستم قدرت است. شکل (۲) فلوجارت روش پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود فرآیند بهینه‌سازی در یک دوره ۲۴ ساعته و با فواصل زمانی یک ساعته انجام می‌شود. اما لازم به ذکر است این فواصل زمانی و دوره مورد مطالعه کلی و دلخواه است و جزء فرض‌های اصلی مسئله به شمار نمی‌رود.

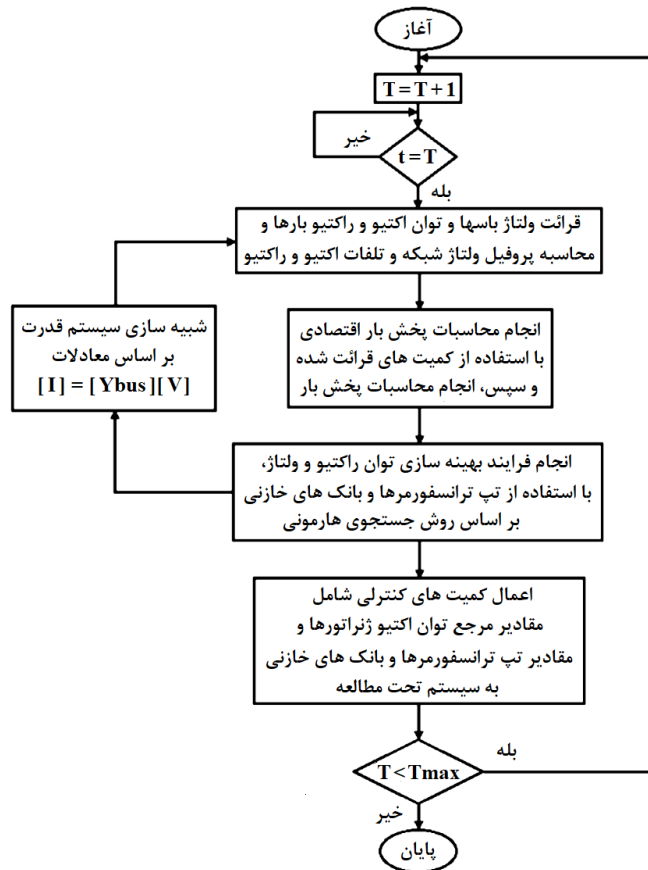
### ۳-۱- روش جستجوی هارمونی HSA

هنگام نواختن موسیقی، نوازنده نُت‌ها را با فرکانس مشخص می‌نوازد که این مجموعه باهم یک هارمونی را تشکیل می‌دهند. اگر هارمونی شکل گرفته زیبا باشد، در حافظه نوازندگان ذخیره شده و احتمال اینکه در تلاش بعدی یک هارمونی زیبا نواخته شود، افزایش خواهد یافت. هنگامی که یک نوازنده نُت را می‌نوازد، از یکی از سه اصل زیر پیروی می‌کند: (۱) نُتی را از حافظه خود انتخاب کرده و می‌نوازد. (۲) نُتی را که مجاور آنچه در حافظه دارد می‌نوازد. (۳) یک نُت را به صورت تصادفی از بازه مجاز انتخاب کرده و می‌نوازد. قوانین مشابهی برای انتخاب مقادیر متغیرها در HSA تعریف شده‌اند. به این ترتیب که این مقادیر یا از حافظه انتخاب می‌شود، یا از مقادیر مجاور آنچه در حافظه وجود دارد (تنظیم فرکانس) انتخاب می‌شود و یا یک مقدار تصادفی مجاز، که همان تنوع بخشی است، می‌تواند در نظر گرفته شود. این سه قانون را می‌توان به کمک ۲ پارامتر "در نظر گرفتن نرخ حافظه هارمونی" ( $HMCR^5$ ) و "نرخ تنظیم فرکانس" ( $PAR^6$ ) اعمال کرد [۲۳، ۲۴].

روند بهینه‌سازی توسط الگوریتم HSA در ۶ مرحله صورت می‌گیرد که عبارت اند از: الف) تعریف مسئله بهینه‌سازی، مدل-سازی آن و مقداردهی اولیه پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی، شامل اندازه حافظه HMS، نرخ حافظه هارمونی HMCR، نرخ



تنظیم قطعات PAR، پهنای باند BW و تعداد تکرار Nimax؛ (ب) مقدار دهی تصادفی حافظه هارمونی ( $HM^7$ )؛ (ج) انتخاب ماتریس ( $HSAM^8$ ) با تعداد سطر HMS از بین سطرهای ماتریس HM و محاسبه تابع هدف به ازای هر سطر ماتریس HSAM و مرتب کردن سطرهای آن بر اساس مقدار تابع هدف هر سطر؛ (د) تولید یک هارمونی جدید بطور تصادفی و بر اساس یکی از سه روش: (۱) انتخاب یک سطر از ماتریس HM، (۲) انتخاب بهترین بردار ماتریس HSAM و (۳) ایجاد یک بردار جدید در محدوده مجاز؛ (ه) به روزرسانی دوباره ماتریس HSAM با توجه به مقادیر تابع هدف ماتریس جدید؛ و (و) تکرار گام‌های (د) و (ه) تا بر آورده شدن شرط همگرایی الگوریتم [۲۳، ۲۴].



شکل (۲): فلوجارت روش پیشنهادی

### ۲-۳- روش پیشنهادی برای کنترل توان راکتیو و ولتاژ

در روش پیشنهادی، فرآیند محاسبات از یک نقطه کار مشخص سیستم آغاز می‌شود. فرض بر آن است که همه پست‌های اصلی سیستم انتقال به PMU مجهز است و فازور ولتاژ باس‌ها را می‌توان قرائت کرد. با قرائت فازور ولتاژ باس‌ها و توان‌های اکتیو و راکتیو بارها، تمامی کمیت‌های دیگر مانند توان راکتیو ژنراتورها، توان خطوط و تلفات سیستم قابل محاسبه خواهند بود. بر اساس مقادیر جدید بارهای سیستم، ابتدا محاسبات پخش بار اقتصادی انجام می‌شود و سهم هر ژنراتور در تامین توان اکتیو سیستم به صورت بهینه تعیین می‌شود. پس از آن بر اساس توان‌های جدید نیروگاه‌ها و بارهای سیستم، محاسبات پخش بار انجام می‌شود و ولتاژ باس‌های سیستم و کمیت‌های دیگر مانند توان راکتیو ژنراتورها تخمین زده می‌شوند. اکنون نوبت بهینه‌سازی توان راکتیو و ولتاژ می‌رسد. برای انجام این فرآیند بر اساس موقعیت کنونی و محدوده قابل بهره‌برداری تپ ترانسفورماتورها و بانک‌های خازنی، مقادیر این کمیت‌های گسسته با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم جستجوی هارمونی HSA چنان تعیین می‌شود که تابع هدف (۳)، با رعایت قیود (۴) تا (۶)، کمینه شود.



$$F_{cost} = k_p P_{loss} + k_q Q_{loss} + k_v \sum_{i=1}^n (1 - |V_i|)^2 \quad (3)$$

$$V_i^{min} \leq V_i(t) \leq V_i^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{bus} \quad (4)$$

$$Q_j^{min} \leq Q_j(t) \leq Q_j^{max}, \quad j = 1, 2, \dots, N_c \quad (5)$$

$$Tap_x^{min} \leq Tap_x(t) \leq Tap_x^{max}, \quad x = 1, 2, \dots, N_t \quad (6)$$

جدول (۲): مشخصات ترانسفورماتورها و بانک خازنی

ظرفیت هر پله	تعداد پله ها	ظرفیت	تجهیز قابل کنترل
۱ مگاوار	۴۵	۴۵ مگاوار	بانک خازنی باس ۹
۰.۰۱۱ پریونیت	۳۰	±/۱۵	تپ ترانسفورماتور ۷-۴
۰.۰۱۵۵ پریونیت	۲۰	±/۱۰	تپ ترانسفورماتور ۹-۴
۰.۰۱۷ پریونیت	۲۰	±/۱۰	تپ ترانسفورماتور ۶-۵

جدول (۱): مشخصات باسهای سیستم ۱۴ باسه

شماره باس	نوع باس: PQ=1 PV=2 Ref=3	توان اکتیو (MW)	توان راکتیو (MVAR)	ماکزیمم ولتاژ (p.u)	مینیمم ولتاژ (p.u)
۱	۳	۰	۰	۱.۰۶	۰.۹۴
۲	۲	۲۱.۷	۱۲.۷	۱.۰۶	۰.۹۴
۳	۲	۹۴.۲	۱۹	۱.۰۶	۰.۹۴
۴	۱	۴۷.۸	۳.۹-	۱.۰۶	۰.۹۴
۵	۱	۷.۶	۱.۶	۱.۰۶	۰.۹۴
۶	۲	۱۱.۲	۷.۵	۱.۰۶	۰.۹۴
۷	۱	۰	۰	۱.۰۶	۰.۹۴
۸	۲	۰	۰	۱.۰۶	۰.۹۴
۹	۱	۲۹.۵	۱۶.۶	۱.۰۶	۰.۹۴
۱۰	۱	۹	۵.۸	۱.۰۶	۰.۹۴
۱۱	۱	۳.۵	۱.۸	۱.۰۶	۰.۹۴
۱۲	۱	۶.۱	۱.۶	۱.۰۶	۰.۹۴
۱۳	۱	۱۳.۵	۵.۸	۱.۰۶	۰.۹۴
۱۴	۱	۱۴.۹	۵	۱.۰۶	۰.۹۴

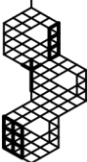
جدول (۳): مقادیر پارامترهای به کار رفته در روش HSA

۳۰	HMS	حافظه هارمونی
۰.۵	HMCR	سرعت بررسی حافظه هارمونی
۰.۵	PAR	سرعت تنظیم قطعات
۲	bw	پهنای باند
۵۰۰	Nimax	حداکثر تعداد تکرار
۰.۰۰۱	emax	حداکثر خطای مجاز

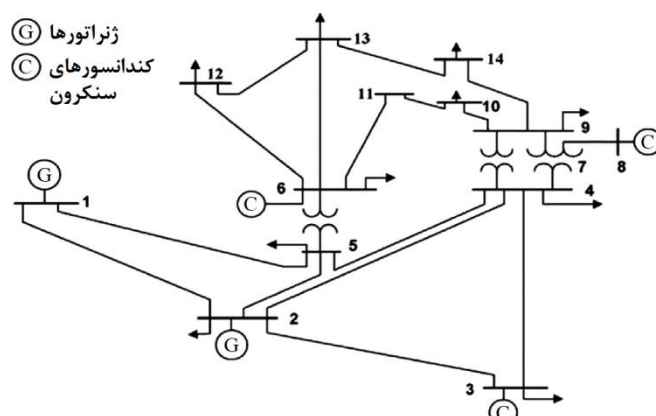
که در آن،  $k_p$ ،  $k_q$  و  $k_v$  ضرایب وزنی هستند که می توان با استفاده از آنها مسئله بهینه سازی چند هدفه را در قالب یک مسئله بهینه سازی تک هدفه تحلیل نمود.  $V_i(t)$ ،  $Q_j(t)$  و  $Tap_x(t)$  نیز به ترتیب اندازه ولتاژ باس  $\lambda$ ام، توان راکتیو خازن  $\lambda$ ام و تپ ترانسفورماتور  $\lambda$ ام در زمان  $t$  می باشند. در روش HSA یک ماتریس بزرگ به نام HSAM چنان تشکیل می شود که هر سطر آن شامل مقادیر تصادفی از موقعیت تپ ترانسفورماتورها و بانک های خازنی و در انتها مقدار تابع هدف ناشی از آن باشد. به عبارت دیگر برای تعیین ستون آخر هر سطر ماتریس HSAM می بایست موقعیت تپ ها و بانک های خازنی به محاسبات پخش بار اعمال شود و با استفاده از نتایج پخش بار مقدار تابع هدف در رابطه (۱) مورد محاسبه قرار گیرد. تعداد سطرهاى ماتریس HSAM همان جمعیت اولیه جستجو است. پس از تشکیل، سطرهاى این ماتریس بر اساس مقادیر ستون آخر مرتب می شود. پس از آن، با ایجاد یک بردار جدید، مشابه سطرهاى ماتریس HSAM، که مقادیر تپ ترانسفورماتورها و بانک های خازنی به صورت ترکیبی از بهترین سطر ماتریس HSAM و مقادیر تصادفی است، ستون آخر بردار مذکور با آخرین (بدترین) سطر ماتریس HSAM مقایسه می شود. در صورتی که تابع هدف بردار مذکور، از آخرین سطر ماتریس HSAM بهتر باشد، سطر آخر با بردار مذکور جایگزین می شود. این فرآیند تا آنجا ادامه می یابد که تعداد تکرار مشخص شده به اتمام برسد و یا مقدار متوسط ستون آخر ماتریس HSAM به ستون آخر ماتریس اول همگرا شود. پس از اتمام فرآیند بهینه سازی، کمیت های کنترلی مانند توان اکتیو ژنراتورها و مقادیر بهینه تپ ترانسفورماتورها و بانک های خازنی برای یک ساعت به سیستم قدرت اعمال می شود و این فرآیند تا پایان دوره زمانی مورد مطالعه ادامه می یابد.

#### ۴- شبیه سازی و تحلیل نتایج

در این بخش، روش کنترل و بهینه سازی ارائه شده در این مقاله برای یک سیستم قدرت نمونه مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، سیستم قدرت ۱۴ باس IEEE در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است [۱،۲]. در شبیه سازی های انجام شده از

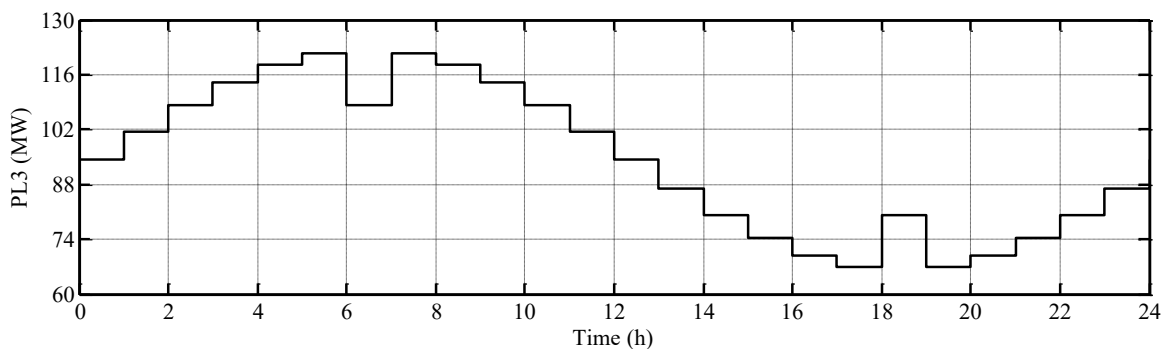


جعبه ابزار MATPOWER استفاده شده است [۲۵]. این جعبه ابزار، یک نرم افزار لایه باز نوشته شده در محیط نرم افزار MATLAB و شامل پارامترها و داده‌های سیستم‌های قدرت نمونه است، که با استفاده از آن محاسباتی مانند پخش بار می‌تواند به سرعت انجام شود. سیستم تحت مطالعه شامل ۱۴ باس، ۱۵ خط انتقال، ۲ ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه و یک ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه است. این سیستم همچنین شامل ۵ ژنراتور سنکرون می‌باشد که در بین آنها ژنراتورهای ۱ و ۲ به ترتیب به صورت اسلک و PV کنترل می‌شوند و مابقی به عنوان کندانسور سنکرون کار می‌کنند. توان مینا در این سیستم ۱۰۰ MVA است. در جدول (۱) پارامترهای باس‌های سیستم مورد مطالعه ارائه شده است. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، همه باس‌ها به جز باس‌های ۱، ۷ و ۸ دارای بار می‌باشند. مقادیر توانهای اکتیو و راکتیو بارها در حالت نامی نیز در جدول (۱) ارائه شده است. ترانسفورماتورهای این سیستم دارای تپ چنجر با قابلیت تغییر زیر بار (OLTC) هستند. علاوه بر این، یک بانک خازنی با ظرفیت ۴۵ مگاوار به باس شماره ۹ متصل است که در حالت عادی ۱۹ مگاوار آن در مدار قرار دارد. مشخصات ترانسفورماتورهای OLTC و بانکهای خازنی سیستم در جدول (۲) ارائه شده است.

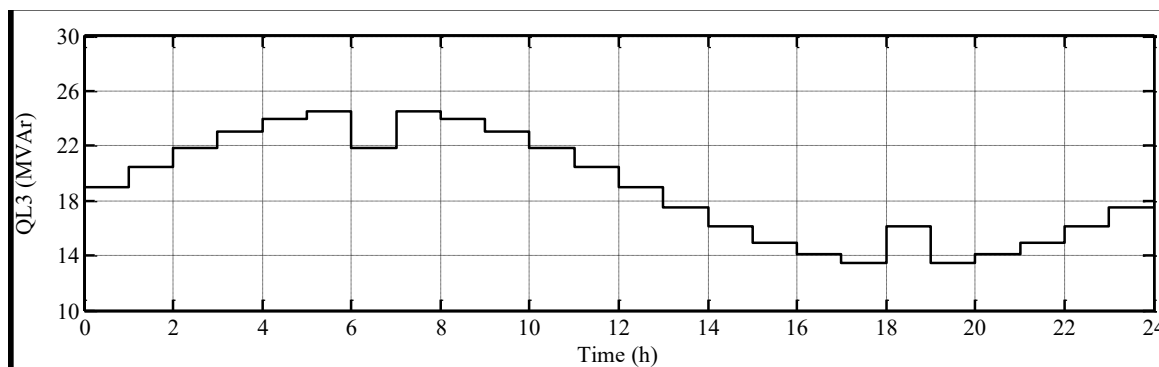


شکل (۲): نمودار تکخط سیستم تحت مطالعه [۱-۲]

(الف)



(ب)



شکل (۳): تغییرات توانهای اکتیو و راکتیو باس ۳





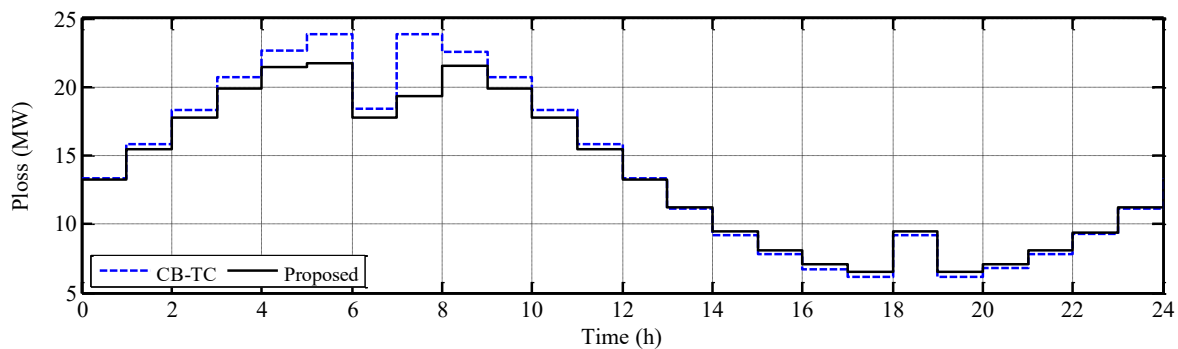


به منظور به چالش کشیدن روش پیشنهادی، بارهای سیستم در یک دوره ۲۴ ساعته چنان تغییر داده شده است که علاوه بر تغییرات پیوسته بین ۷۰٪ تا ۱۳۰٪ مقدار نامی، یک افزایش و یک کاهش ناگهانی نیز با میزان تغییر ۵۰٪ داشته باشند. برای سادگی ضریب توان بارها ثابت فرض شده است و بر اساس آن هم توان راکتیو و هم توان اکتیو بارها تغییر داده شده است. شکل (۳) تغییرات توان های اکتیو و راکتیو بار متصل به باس ۳ را بعنوان نمونه نشان می دهد.

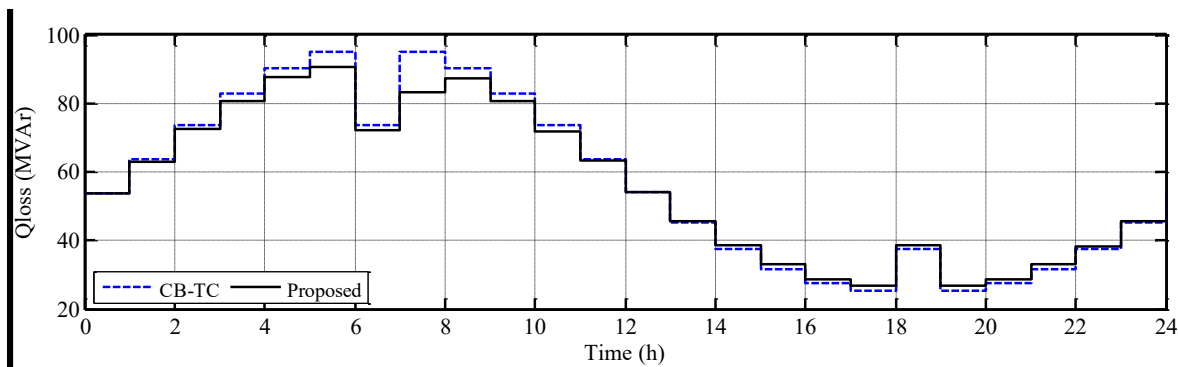
همانطور که مشاهده می شود هم توان اکتیو و هم توان راکتیو دارای تغییرات پیوسته از ۷۰٪ تا ۱۳۰٪ مقدار نامی است. این توان ها در شروع دوره ۲۴ ساعته مقدار نامی دارند و در انتهای دوره نیز به مقدار نامی خود باز می گردند. شایان ذکر است که این تغییرات توان بار تنها در شبیه سازی سیستم ۱۴ باسه لحاظ شده است و سیستم کنترلی و بهینه سازی از آن مستقل می باشد. به عبارت دیگر روش کنترل و بهینه سازی پیشنهادی بر اساس اندازه گیری ولتاژها و توانهای بار عمل می کند و تغییرات بار در پله های زمانی بعدی برای آن مجهول است. در جدول (۳) پارامترهای به کار رفته در روش HSA ذکر شده است.

به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، نتایج حاصل از این روش که برای سادگی در نمودارهای رسم شده با عبارت "Proposed" مشخص شده است، با روش کنترلی که در آن تنها تپ ترانسفورماتورها و بانک خازنی بهینه شده و پخش بار بهینه انجام نشده و برای سادگی با "CB-TC" مشخص شده است، مقایسه می گردد. شکل (۴) نمودار تلفات اکتیو و راکتیو سیستم را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، در روش پیشنهادی، به ویژه هنگامی که توان بارها افزایش یافته است، تلفات کمتری در سیستم بوجود آمده است. پایدارتر شدن شبکه و همچنین کاهش هزینه ها، از مزایای کاهش تلفات می باشد.

(الف)



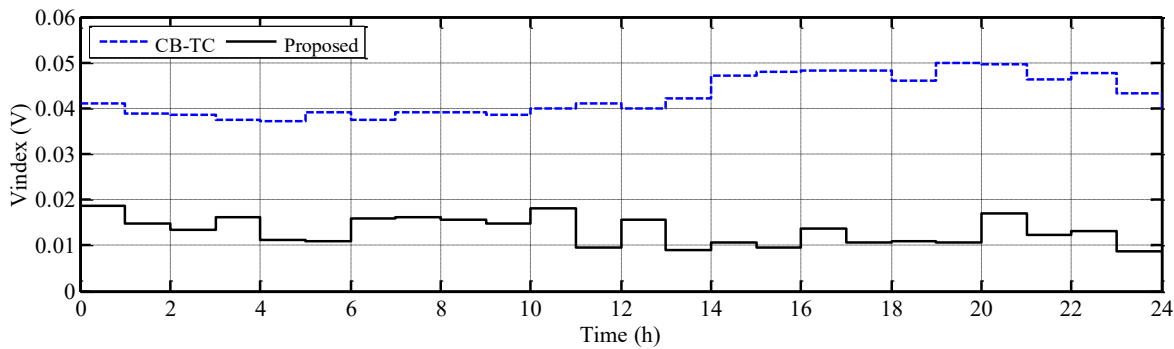
(ب)



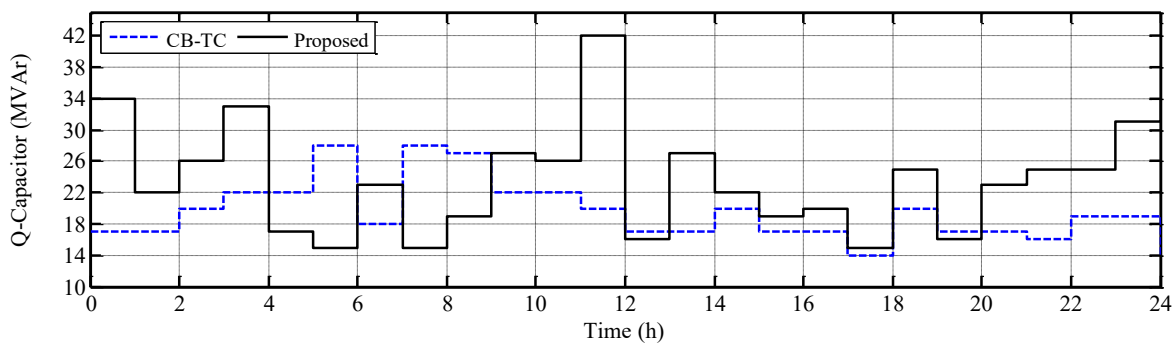
شکل (۴): نمودار تلفات اکتیو و راکتیو

شکل (۵) شاخص پروفیل ولتاژ شبکه را در دوره ۲۴ ساعته مورد مطالعه نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، پروفیل ولتاژ در روش پیشنهادی مسطح تر است و نزدیکی بیشتری با مقدار ۱ پریونیت دارد. نکته شایان ذکر این است که در روش پیشنهادی مسئله بهینه سازی چند هدفه با استفاده از یک تابع هدف ترکیبی به مسئله یک هدفه تبدیل شده است. به همین دلیل هنگامی که بار سیستم در کمترین مقادیر خود قرار می گیرد، از آنجا که هدف تنها کاهش تلفات نیست، بلکه بهبود پروفیل ولتاژ نیز مد نظر است، مقدار تلفات روش پیشنهادی به مقدار ناچیزی از تلفات روش CB-TC بیشتر شده است. اما به طور کلی، علاوه بر پروفیل ولتاژ بهتر، روش پیشنهادی تلفات انرژی اکتیو و راکتیو کمتری نسبت به روش CB-TC دارد.

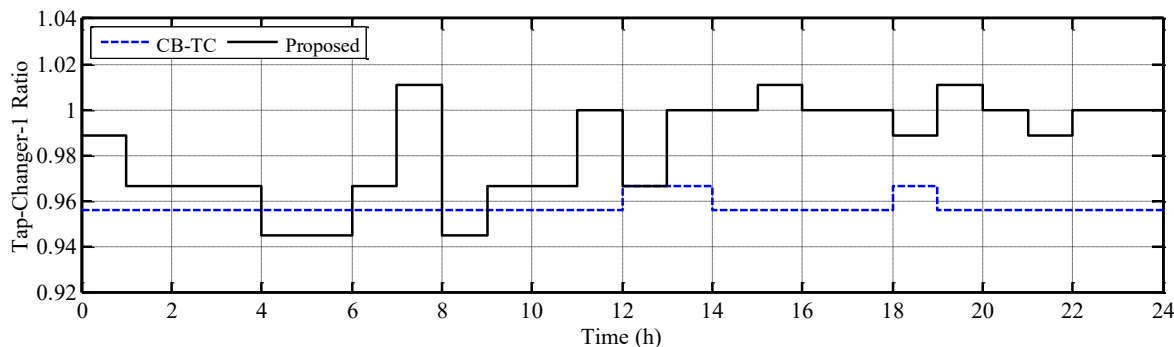




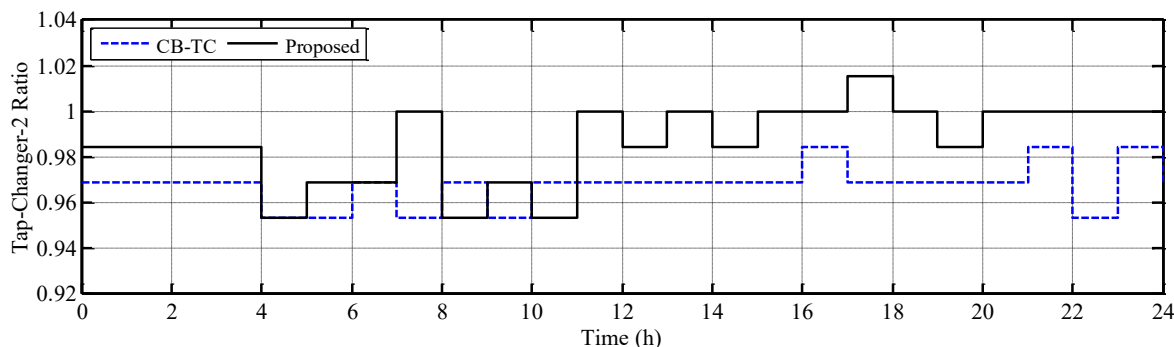
شکل (۵): شاخص پروفیل ولتاژ شبکه را در دوره ۲۴ ساعته



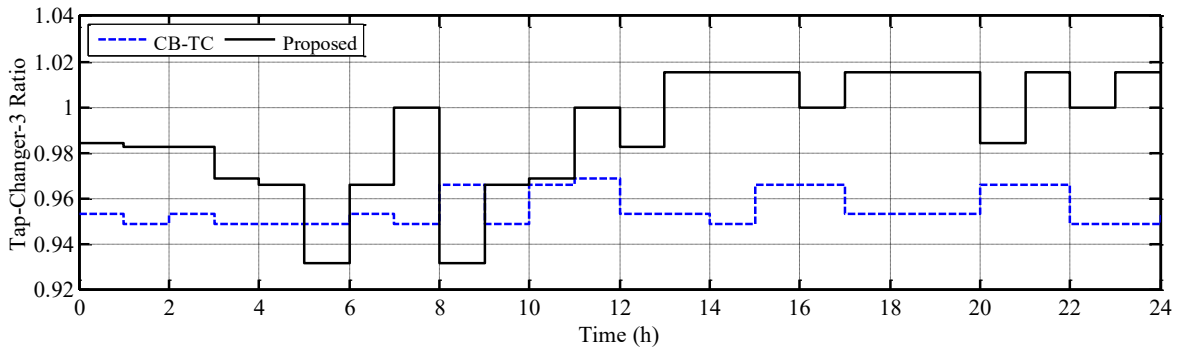
شکل (۶): تغییرات توان راکتیو بانک خازنی متصل به باس ۹



شکل (۷-الف): تغییرات تپ ترانسفورماتورهای سیستم (۱)



شکل (۷-ب): تغییرات تپ ترانسفورماتورهای سیستم (۲)

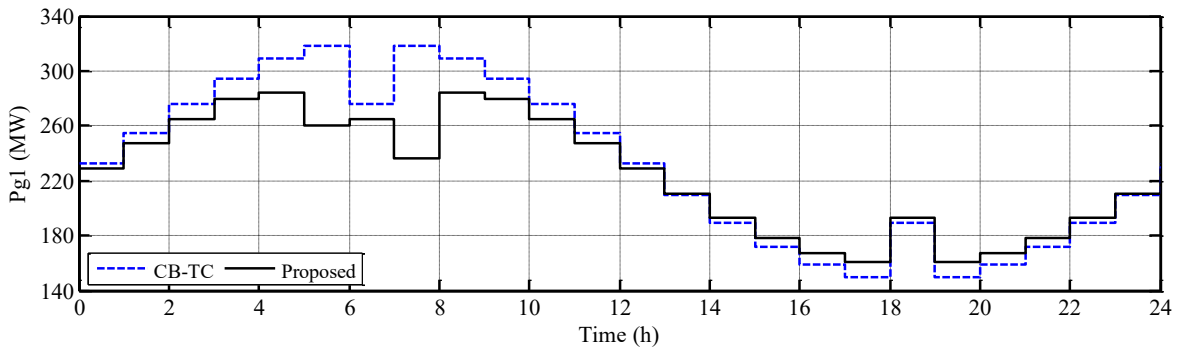


شکل (۷-ج): تغییرات تپ ترانسفورماتورهای سیستم (۳)

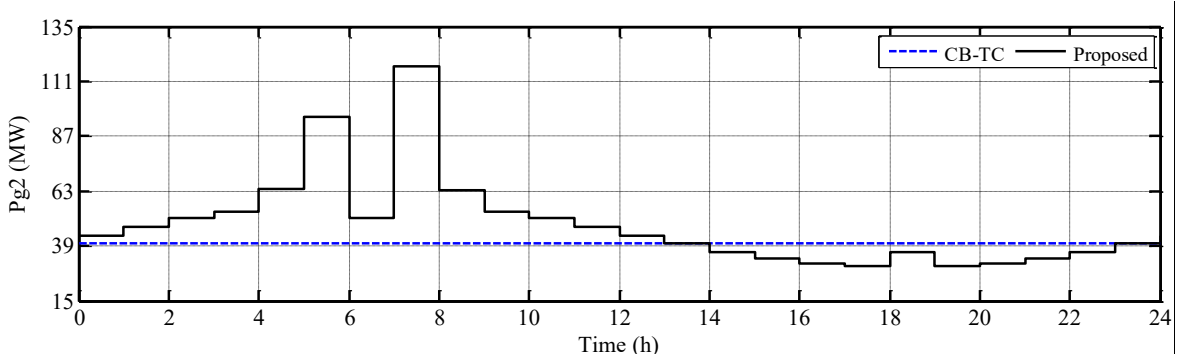
شکل (۶) تغییرات توان راکتیو بانک خازنی متصل به باس ۹ و شکل (۷) تغییرات تپ ترانسفورماتورهای سیستم را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، تعداد کلیدزنی‌ها در روش پیشنهادی اندکی بیشتر از روش CB-TC است اما دامنه تغییرات آن وسیع‌تر است. دلیل این پدیده این است که در روش پیشنهادی با تغییر نقطه کار ژنراتورها و بهینه‌سازی پخش توان راکتیو، نقطه کار سیستم دستخوش تغییرات بیشتری می‌شود و بنابراین به اعمال کنترلی بیشتری نیاز دارد.

شکل (۸) تغییرات توان اکتیو ژنراتورهای ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در روش پیشنهادی ژنراتور ۲ مشارکت بیشتری در تامین توان اکتیو شبکه دارد. دلیل افزایش تولید توان اکتیو در ساعات پنجم و هفتم در ژنراتور ۲ این است که با افزایش توان اکتیو بارهای سیستم و نزدیک شدن سهم توان ژنراتور اول به مقدار حداکثر توان خود، به دلیل اینکه در محدوده مذکور هزینه تولید ژنراتور اول افزایش می‌یابد، سهم ژنراتور دوم در این ساعت بیش از پیش افزایش یافته است.

(الف)

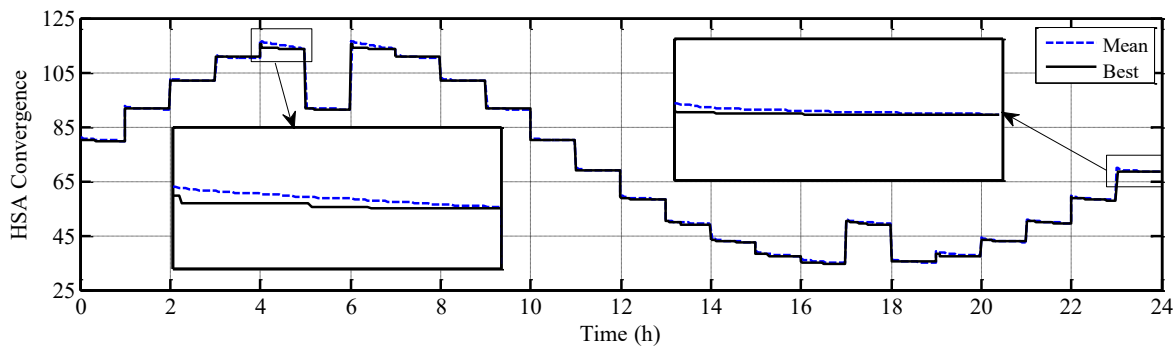


(ب)



شکل (۸): تغییرات توان اکتیو ژنراتورهای ۱ و ۲

شکل (۹) نمودار همگرایی روش بهینه‌سازی جستجوی هارمونی را نشان می‌دهد. در این نمودار مقدار متوسط تابع هدف بین تمامی جمعیت جستجو بصورت خط چین و مقدار تابع هدف به ازای بهترین عضو جمعیت بصورت خط تو پر رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در تمامی پله‌های زمانی، مقدار متوسط تابع هدف جمعیت جستجو، به سمت مقدار بهینه همگرا شده است.



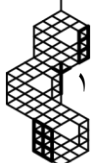
شکل (۹): نمودار همگرایی روش بهینه‌سازی جستجوی هارمونی

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای کنترل متمرکز توان راکتیو و ولتاژ سیستم‌های قدرت ارائه شده است. در این روش بر اساس توان‌های بار و ولتاژ باس‌های سیستم که با استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری PMU قرائت می‌شوند، موقعیت بهینه تپ ترانسفورماتورها و بانک‌های خازنی چنان تعیین می‌شود که علاوه بر بهبود پروفیل ولتاژ شبکه، تلفات توان اکتیو و راکتیو سیستم نیز کمینه گردند. علاوه بر این، پس از جابجایی نقطه کار سیستم ناشی از تغییرات بارها، با انجام محاسبات پخش بار بهینه نقطه کار ژنراتورها اصلاح می‌شوند تا از نظر پخش توان اکتیو شرایط واقعی‌تری در شبکه بوجود آید و فرآیند کنترل توان راکتیو و ولتاژ کارایی بهتری را به نمایش بگذارد. به منظور بررسی اثرگذاری روش پیشنهادی، شبکه نمونه ۱۴ باس IEEE در نرم افزار MATLAB مورد شبیه سازی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی توانسته است ضمن کاهش تلفات اکتیو و راکتیو شبکه، پروفیل ولتاژ را نیز تا حد زیادی بهبود دهد.

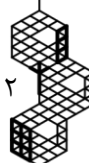
## مراجع

- [1] A.L. Tabrizchi, M.M. Rezaei, and Sh. Shojaeian. "Probabilistic analysis of small-signal stability in power systems based on direct polynomial approximation." *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 28, 2021, e100557, doi: 10.1016/j.segan.2021.100557
- [2] A.L. Tabrizchi and M. M. Rezaei. "Probabilistic small-signal stability analysis of power systems based on Hermite polynomial approximation." *SN Applied Sciences*, vol. 3, no. 9, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04765-4
- [3] S.M. Koloushani, M. Nasri, and M. M. Rezaei, "Strategic management of stochastic power losses in smart transmission grids." *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 29, no. 8, e12032, 2019, doi: 10.1002/2050-7038.12032
- [4] P.W. Sauer, and M. A. Pai, *Power system dynamics and stability*, vol. 101, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2017.
- [5] A. Sotoudeh, J. Soltani, & M.M. Rezaei, "A Robust Control for SCIG-Based Wind Energy Conversion Systems Based on Nonlinear Control Methods." *Journal of Control Automation and Electrical Systems*, vol. 32, pp. 735–746, 2021. doi.org/10.1007/s40313-021-00705-0
- [6] R. El-Sehiemy, A. Elsayed, A. Shaheen, E. Elattar, and A. Ginidi. "Scheduling of generation stations, OLTC substation transformers and VAR sources for sustainable power system operation using SNS optimizer." *Sustainability*, vol. 13, no. 21, 2021, doi: 10.3390/su132111947
- [7] S. Tahanzadeh, F. Zandi, B.Fani, M. Dashtipour, E. Adib and E. Rokrok, "Improvement of Conventional Droop Methods Performance during the Fault Occurrence in an Islanded Micro-Grid Using the Concept of Virtual Impedance." *Technovations in Electrical Engineering & Green Energy System*, vol. 1, no. 1, pp. 13-35, 2022, doi: 10.30486/teeges.2022.691006
- [8] S.M. Naji-Esfahani, S.H. Zahiri and M. Delshad, "Modeling and Analysis of SEPIC Converter Stability by Gray Wolf Multi-Objective Algorithm." *Technovations in Electrical Engineering & Green Energy System*, vol. 1, no. 2, pp. 29-44, 2022, doi:10.30486/teeges.2022.1957809.1006





- [9] J. Ebrahimi, M. Abedini, and M.M. Rezaei. "A two-step approach to energy management in smart micro-grids aimed at improving social welfare levels and the demand side management effect." *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, vol. 9, no. 3, pp. 56-67, 2020.
- [10] J. Ebrahimi, M. Abedini, and M.M. Rezaei. "Optimal scheduling of distributed generations in microgrids for reducing system peak load based on load shifting." *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 23, 2020, doi: 10.1016/j.segan.2020.100368
- [11] J. Ebrahimi, M. Abedini, M.M. Rezaei and M. Nasri. "Optimum design of a multi-form energy in the presence of electric vehicle charging station and renewable resources considering uncertainty." *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 23, 2020, doi: 10.1016/j.segan.2020.100375
- [12] T.T. Nguyen, "A high performance social spider optimization algorithm for optimal power flow solution with single objective optimization." *Energy*, vol. 171, pp. 218-240, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.01.021
- [13] M. Riaz, A. Hanif, S.J. Hussain, M.I. Memon, M.U. Ali, A. Zafar, "An optimization-based strategy for solving optimal power flow problems in a power system integrated with stochastic solar and wind power energy." *Appl. Sci.* vol. 11, 2021, doi: 10.3390/app11156883
- [14] Z. Wang, C.L. Anderson, "A progressive period optimal power flow for systems with high penetration of variable renewable energy sources." *Energies*, vol. 14, 2021, doi: 10.3390/en14102815
- [15] Y. Amrane, M. Boudour, M. Belazzoug, "A new optimal reactive power planning based on differential search algorithm." *Int J Electr Power Energy Syst*, vol. 64, pp. 551-561, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.07.060
- [16] A.M. Shaheen, R.A. El-Sehiemy, S.M. Farrag, "A novel adequate bi-level reactive power planning strategy." *Int J Electr Power Energy Syst*, vol. 78, pp. 897-909, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.12.004
- [17] K.R. Vadivelu, G.V. Marutheswar, "Soft computing technique based reactive power planning using combining multi-objective optimization with improved differential evolution." *Int Electric Eng J*, vol. 5, no. 10, pp. 1576-1585, 2014.
- [18] J.P. Roselyn, D. Devaraj, S.S. Dash, "Multi objective differential evolution approach for voltage stability constrained reactive power planning problem." *Int J Electric Power Energy Syst*, vol. 59, pp. 155-165, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.02.013
- [19] H. Liu, V. Krishnan, J.D. McCalley, A. Chowdhury, "Optimal planning of static and dynamic reactive power resources." *IET Gener Transm Distrib*, vol. 8, no. 12, pp. 1916-1927, 2014, doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0081
- [20] H. Suyono, R.N. Hasanah, and E.P. Widyananda. "Power system optimization of static VAR compensator using novel global harmony search method." *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, vol. 8, no. 1 pp. 26-32, 2019, doi:10.18178/ijeetc.8.1.26-32
- [21] L.D. Le, D.N. Vo, S.T. Huynh, T.M. Nguyen-Hoang, and P. Vasant. "A hybrid differential evolution and harmony search for optimal power flow with FACTS devices." *International Journal of Operations Research and Information Systems (IJORIS)*, vol. 11, no. 3, pp. 39-65, 2020, doi: 10.4018/IJORIS.2020070103
- [22] T. Zhang and Z.W. Geem. "Review of harmony search with respect to algorithm structure." *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 48, pp. 31-43, 2019, doi: 10.1016/j.swevo.2019.03.012
- [23] H. Izadfar and S.J. Tabatabaei. "A Harmony Search-Based Approach for Real-Time Volt & Var Control in Distribution Network by Considering Distributed Generations Units." *Modeling and Simulation in Electrical and Electronics Engineering* vol. 1, no. 1, pp. 37-42, 2021, doi: 10.22075/MSEEE.2018.803.1037
- [24] M. Nazari, B. Mohammadi-Ivatloo, S. Asadi, J.H. Kim, and Z.W. Geem. "Harmony search algorithm for energy system applications: an updated review and analysis." *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 31, no. 5, pp. 723-749, 2018, doi: 10.1080/0952813X.2018.1550814
- [25] N.C. Yang, and E.W. Adinda. "Matpower-Based Harmonic Power Flow Analysis for Power Systems with Passive Power Filters." *IEEE Access*, vol. 9, pp. 167322-167331, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135496
- [26] A. N. Hasan, and N. Tshivhase. "Voltage regulation system for OLTC in distribution power systems with high penetration level of embedded generation." *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 29, no. 7, e12111, 2019. doi: 10.1002/2050-7038.12111
- [27] A.A. Eladl, M.I. Basha, and A.A. ElDesouky. "Multi-objective-based reactive power planning and





voltage stability enhancement using FACTS and capacitor banks.” Electrical Engineering, vol. 104, pp. 3173–3196, 2022. doi: 10.1007/s00202-022-01542-3

---

- <sup>1</sup> On-Load Tap Changer
- <sup>2</sup> Phasor Measurement Unit
- <sup>3</sup> Automatic Generation Control
- <sup>4</sup> Harmony Search Algorithm
- <sup>5</sup> Harmony Memory Consideration Rate
- <sup>6</sup> Pitch Adjustment Rate
- <sup>7</sup> Harmony Memory
- <sup>8</sup> Harmony Search Algorithm Matrix

