

یک روش جدید جهت پیش‌بینی مسیر پاسخ ولتاژها در کنترل بهینه و هماهنگ ولتاژ

فرید کربلایی^۱، استادیار؛ حمیدرضا شهبازی^۲، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - f_karbalaei@srutu.edu

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - hr.shahbazi@srutu.edu

چکیده: در این مقاله به بررسی مسئله کنترل بهینه و هماهنگ ولتاژ در سیستم‌های قدرت، پرداخته می‌شود. روش کنترلی رایج در این مسئله، کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل است. یک گام اصلی در کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل در مسئله کنترل هماهنگ ولتاژ، پیش‌بینی مسیر پاسخ ولتاژها می‌باشد. در این مقاله، یک روش جدید جهت پیش‌بینی مسیر پاسخ ولتاژها مبتنی بر دو نقطه ارائه می‌شود. این دو نقطه عبارتند از ۱- لحظه بلافاصله بعد از اعمال اقدامات کنترلی و ۲- حالت ماندگار سیستم بعد از اعمال اقدامات کنترلی. روش جدید بر این اصل استوار است که در مسئله کنترل هماهنگ ولتاژ، مسیر تغییرات پاسخ ولتاژها به اقدامات کنترلی یک مسیر یکنواخت است. همچنین روش کنترلی مورد استفاده در این مقاله یک روش تطبیقی و انعطاف‌پذیر است. ویژگی تطبیقی، به کنترل‌پذیری سیستم با تغییر در نقطه کار اشاره دارد. منظور از ویژگی انعطاف‌پذیری، حل مسئله بهینه‌سازی به صورت چندهدفه با الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه SPEA2 و تهیه یک مجموعه از پاسخ‌های نامغلوب است که این امکان را به بهره‌بردار سیستم می‌دهد تا با توجه به شرایط اقتصادی و عملیاتی، به کمک تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر ماتریس اولویت، بهترین اقدامات کنترلی را تعیین و به سیستم قدرت اعمال کند.

واژه‌های کلیدی: کنترل هماهنگ ولتاژ، پیش‌بینی مسیر مبتنی بر دو نقطه، بهینه‌سازی چندهدفه، SPEA2، تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره.

A New Approach for Predicting Voltage Response Trajectory in Optimal Coordinated Voltage Control

F. Karbalaei¹, Assistant Professor; H. Shahbazi², PhD Student

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, Email: f_karbalaei@srutu.edu

2- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, Email: hr.shahbazi@srutu.edu

Abstract: In this paper we deal with the optimal coordinated voltage control issue. A common control procedure for this problem is the model predictive control. A major step toward model predictive control in coordinated voltage control issue is the prediction of voltage response trajectory. This paper presents a new technique to predict the trajectory of voltage response based on two points. These two points are as follow: 1- The moment immediately after applying control actions 2- The steady state of the system after applying these actions. The new method is based on this principle that in coordinated voltage control the direction of voltage response alterations based on control measures is monotonic. The control method utilized in this paper is adaptive and flexible. The adaptive feature refers to controllability of system with a change at the operating point. By flexibility feature, we mean solving an optimization problem with a multiobjective SPEA2 optimization algorithm and providing a set of nondominated solutions which enable system operator to determine and apply the best control actions based on economic and operational conditions aided by a multiple criteria decision-making technique based on a priority matrix.

Keywords: Coordinated voltage control, two-point-based trajectory prediction, multi-objective optimization, strength pareto evolutionary algorithm, multiple criteria decision-making technique.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۴

نام نویسنده مسئول: فرید کربلایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

پایداری ولتاژ، یکی از مهم‌ترین مسائل در سیستم‌های قدرت می‌باشد. بر اساس تعریف IEEE/CIGRE، پایداری ولتاژ عبارت است از توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ حالت ماندگار قابل قبول در تمامی شین‌ها، بعد از اینکه سیستم قدرت دچار یک اغتشاش نسبت به شرایط اولیه مورد بهره‌برداری شد [۱]. بعد از وقوع ناپایداری ولتاژ، ولتاژ نقاط ناپایدار به سرعت و با شدت زیاد افت می‌کند و در صورت عدم اعمال به‌موقع اقدامات کنترلی مناسب، سقوط ولتاژ به سایر نقاط شبکه نیز منتقل می‌شود. بررسی خاموشی‌های گسترده در سراسر دنیا، مؤید این موضوع است که علت آغازگر اکثر این خاموشی‌ها، سقوط ولتاژ می‌باشد [۲]. این خاموشی‌ها علاوه بر اینکه خسارات اقتصادی زیادی را به دنبال دارد موجب نارضایتی مردم از شبکه برق نیز خواهد شد. بنابراین شناسایی سریع شرایط ناپایدار در شبکه و انجام اقدامات کنترلی مناسب، نقش پررنگی در افزایش کیفیت و امنیت شبکه خواهد داشت.

جهت جلوگیری از وقوع پدیده ناپایداری ولتاژ می‌توان از یک آرایش هماهنگ و مناسب تجهیزات کنترلی در سیستم قدرت استفاده کرد. امروزه کنترل هماهنگ ولتاژ با موفقیت در کشورهای فرانسه، ایتالیا، بلژیک و سوئیس اجرا شده است [۳-۷]. اولین بار روش کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل (MPC^۱) برای حل مسئله کنترل هماهنگ ولتاژ در [۸] مطرح شد و این موضوع در [۹-۲۰] بهبود یافت. همچنین، MPC در [۲۱، ۲۲] به ترتیب برای بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت در حضور نیروگاه‌های بادی و برای سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه به کار برده شده است.

معادلات سیستم‌های قدرت جبری-دینامیکی می‌باشد و ماهیت متغیرهای کنترلی آن، ترکیبی از متغیرهای گسسته و پیوسته است. بنابراین، مسئله کنترل بهینه و هماهنگ ولتاژ (OCVC^۲) به یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده تبدیل می‌شود. در [۸، ۹] برای حل این مسئله بهینه‌سازی، به ترتیب از روش درخت جستجو و جستجوی ابتکاری استفاده شده است که هر دو، الگوریتم ساده‌ای دارند و از سرعت بالایی در سیستم‌های قدرت کوچک برخوردار می‌باشند. اما در سیستم‌های قدرت بزرگ، با افزایش متغیرهای کنترلی، عمق فضای جستجو به صورت نمایی افزایش می‌یابد و سرعت حل این الگوریتم‌ها به شدت کاهش می‌یابد. در [۱۰] از روش نقطه درونی برای حل OCVC استفاده شده است و در [۱۱] از روش برنامه‌ریزی تکاملی شبه‌گرایان استفاده شده است که در این دو روش، احتمال همگرایی به نقطه بهینه محلی زیاد است. در [۱۲، ۱۳] از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی ایمن و تجمع ذرات استفاده شده است. مقاله [۱۴] از الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه^۳ جهت تعیین میزان بهینه حذف بار برای کنترل اضطراری ولتاژ در سیستم‌های قدرت استفاده کرده است. هرچند در این روش‌ها احتمال رسیدن به پاسخ بهینه اصلی زیاد است اما زمان حل، به شدت افزایش می‌یابد.

در [۱۴-۱۸] تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، تک‌هدفه می‌باشد. در این مقالات تابع هدف اصلی، ردیابی ولتاژ مرجع می‌باشد و تعداد اقدامات کنترلی، میزان حذف بار و قیود سیستم با استفاده از توابع جریمه در همان تابع هدف، کنترل می‌شوند. در [۲۰-۱۵] مسئله به‌صورت چندهدفه مورد بررسی قرار گرفته است و این اختیار به بهره‌بردار سیستم داده می‌شود تا با توجه به شرایط، بهترین انتخاب را از دیدگاه اقتصادی و عملکردی داشته باشد. در این مقالات، مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با سه تابع هدف ردیابی ولتاژ مرجع، کمترین اقدامات کنترلی و کمترین میزان حذف بار با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژن جهش‌یافته حل می‌شود [۱۵، ۱۶]. به دلیل زمان‌بر بودن این الگوریتم، در [۲۰-۱۷]، ابتدا خطاهای سیستم قدرت به دو دسته خطاهای قابل پیش‌بینی و غیرقابل پیش‌بینی، تقسیم می‌شود، سپس برای خطاهای قابل پیش‌بینی که شامل خروج یک خط و یا یکی از مولدهای شبکه می‌باشد، مسئله OCVC به‌صورت برون‌خط حل می‌شود و مجموعه پاسخ‌های نامغلوب حاصل، در پایگاه دانش سیستم ذخیره می‌شود. سپس، اگر همین خطا در شبکه قدرت رخ دهد با استفاده از یک سیستم کنترل تطبیقی، که شامل یک جستجوی محلی کوچک می‌باشد پاسخ‌های بهینه به‌دست آمده در حالت برون‌خط، در این مرحله به‌روز شده و بهره‌بردار سیستم با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM^۴) مبتنی بر ماتریس اولویت [۱۷]، اقدامات کنترلی مناسب را به سیستم قدرت اعمال می‌کند. اما اگر خطای رخ داده شده در سیستم، جزء خطاهای غیرقابل پیش‌بینی باشد با استفاده از سیستم یادگیری برخط که در [۲۰] معرفی شده است پاسخ‌های بهینه حاصل می‌شود. مزیت الگوریتم فوق، سرعت مناسب در حل مسئله OCVC، توانایی کنترل سیستم در برابر خطاهای پیش‌بینی نشده و سازگاری با تغییر نقطه کار سیستم می‌باشد.

در [۲۳] بیان می‌شود که مسئله ناپایداری ولتاژ در ابتدا عمدتاً یک مسئله محلی است و اگر اقدامات کنترلی مناسب سریعاً صورت پذیرد می‌توان با کمترین اقدامات کنترلی، از انتقال خطا به سایر نواحی جلوگیری کرد. لذا در [۲۳، ۲۴] به کمک کنترل غیرمتمرکز، با استفاده از ماتریس ادمیتانس سیستم و با توجه به مفهوم فاصله الکتریکی، ابتدا سیستم قدرت به چند ناحیه تقسیم می‌شود و سپس برای هر ناحیه یک شاخص عملکرد تعریف می‌شود. هرگاه شاخص عملکرد تجمعی در ناحیه‌ای بیشتر از عدد یک شود متغیرهای کنترلی آن ناحیه فعال شده و به سیستم اعمال می‌شوند و هرگاه شاخص عملکرد ناحیه‌ای صفر شد اقدامات کنترلی متوقف می‌شود. اقدامات کنترلی در این مقالات شامل اضافه شدن خازن و حذف بار می‌باشد. مزیت این روش در سرعت بالای آن است و همچنین فقط از متغیرهای کنترلی موجود در هر ناحیه، برای کنترل خطا در همان ناحیه استفاده می‌شود. اما در [۲۳] اقدامات کنترلی بدون هیچ‌گونه بهینه‌سازی و در [۲۴] اقدامات کنترلی با توجه به ماتریس حساسیتی که معرفی شده است به سیستم اعمال می‌شوند

امکان به بهره‌بردار سیستم داده می‌شود تا از تنوع بیشتری در به‌کارگیری اقدامات کنترلی بهره‌مند باشد.

در [۱۵-۲۰] و [۲۶، ۲۷] برای حل OCVC، از MPC استفاده شده است. نوآوری دیگر این مقاله، معرفی یک روش پیش‌بینی مسیر در الگوریتم MPC است. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی مسیر در MPC وجود دارد که عبارت‌اند از ۱- حل کامل مجموعه معادلات غیرخطی سیستم ۲- روش اویلر ۳- خطی‌سازی حول نقطه تعادل. حل کامل مجموعه معادلات غیرخطی، دقیق‌ترین روش موجود می‌باشد اما بسیار کند و زمان‌بر است. دو روش اویلر و خطی‌سازی، علی‌رغم برخورداری از یک سرعت مناسب، از دقت کافی در پیش‌بینی مسیر برخوردار نمی‌باشند. با توجه به اینکه مسیر تغییرات بلندمدت ولتاژ، یکنواخت می‌باشد. لذا در این مقاله، روش جدیدی برای پیش‌بینی مسیر، مبتنی بر دو نقطه (۱- بلافاصله بعد از اعمال اقدامات کنترلی و ۲- حالت ماندگار سیستم بعد از اعمال اقدامات کنترلی) معرفی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش مبتنی بر دو نقطه در قیاس با دو روش خطی‌سازی و اویلر از دقت خوبی برخوردار است و چون برای تعیین مسیر، به انجام محاسبات تنها در دو نقطه نیاز دارد از سرعت مناسبی نیز برخوردار است.

ساختار این مقاله به این صورت است که در بخش اول، موضوع کنترل بهینه و هماهنگ ولتاژ به همراه مدل سیستم و توابع هدف بیان می‌شود. بخش دوم، به معرفی الگوریتم SPEA2 و تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر ماتریس اولویت اختصاص دارد. در بخش سوم الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله OCVC شرح داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم بیان می‌گردد و نتیجه‌گیری حاصل از این مقاله نیز در بخش پنجم ارائه می‌شود.

۲- کنترل بهینه و هماهنگ ولتاژ

مفهوم کنترل هماهنگ ولتاژ به استفاده هماهنگ از منابع کنترل توان راکتیو سیستم به صورت هم‌زمان اشاره دارد. همان‌گونه که عنوان شد در این مقاله، برای حل مسئله OCVC از MPC استفاده می‌شود.

برای اینکه سیستم کنترلی پیشنهادی از انعطاف‌پذیری لازم برخوردار باشد می‌بایست در MPC، مجموعه اقدامات کنترلی بهینه از حل یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به دست آیند تا مجموعه‌ای از پاسخ‌های خوب نامغلوب در اختیار بهره‌بردار قرار گیرد و او با توجه به شرایط حاکم بر سیستم قدرت، بهترین پاسخ را تعیین و به سیستم اعمال کند. در ادامه اجزا و ساختار یک سیستم OCVC شرح داده می‌شود.

۲-۱- مدل سیستم

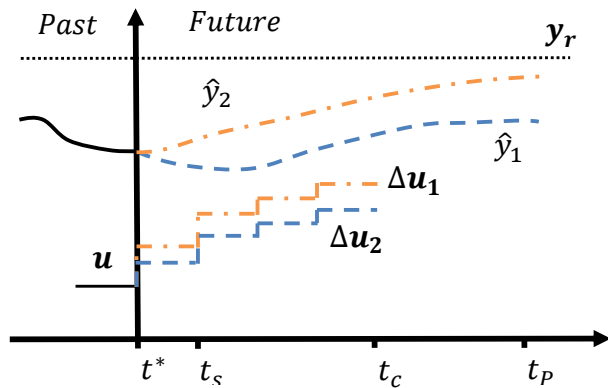
مدل سیستم قدرت در OCVC شامل دسته‌ای از معادلات جبری و دینامیکی است که به صورت روابط (۱) و (۲) بیان می‌شود.

$$\dot{x} = f(t, x, y, u) \quad (1)$$

و به دلیل عدم حل مسئله OCVC این احتمال وجود دارد تا اقدامات بهینه به سیستم اعمال نشود.

در [۲۵] از روش معرفی شده در دو مقاله [۲۴، ۲۳] برای کنترل ولتاژ در سیستم‌های قدرت به هم پیوسته و چندناحیه‌ای استفاده شده است. لازم به ذکر است روش معرفی شده در [۲۵] مبتنی بر کنترل توزیع شده می‌باشد. یک سیستم کنترلی توزیع شده مبتنی بر سیستم‌های چند عاملی و MPC در [۲۶] برای کنترل ولتاژ در سیستم‌های قدرت چندناحیه‌ای ارائه شده است. در [۲۷] از MPC توزیع شده برای حل مسئله کنترل اضطراری ولتاژ در سیستم‌های قدرت بزرگ و به هم پیوسته استفاده شده است. در این مقاله سیستم قدرت از تعدادی زیرناحیه تشکیل شده است و برای هر زیرناحیه یک سیستم کنترلی MPC در نظر گرفته شده است. پیش‌بینی مسیر در این مقاله به روش اویلر انجام می‌شود.

بنابر آن چه که بیان شد می‌توان مقالات موجود در زمینه کنترل اضطراری و هماهنگ ولتاژ را به سه گروه تقسیم کرد که عبارت‌اند از ۱- مقالات مبتنی بر کنترل متمرکز [۹-۲۰]، ۲- مقالات مبتنی بر کنترل غیرمتمرکز [۲۴، ۲۳] و ۳- مقالات مبتنی بر کنترل توزیع شده [۲۵-۲۷]. در کنترل متمرکز، تمامی سیستم قدرت پایش می‌شود و اطلاعات آن به یک واحد کنترلی ارسال می‌شود و با توجه وضعیت کلی سیستم، اقدامات کنترلی بهینه توسط یک واحد پردازش شکر تعیین و به سیستم اعمال می‌شود. مزیت این سیستم کنترلی، تعیین اقدامات کنترلی بهینه با کمترین تعداد در سیستم قدرت می‌باشد، اما از معایب آن می‌توان به سرعت پایین آن و وابستگی این روش به اطلاعات کل سیستم قدرت اشاره داشت. در کنترل غیرمتمرکز، سیستم قدرت به تعدادی زیر سیستم تقسیم می‌شود و برای هر زیر سیستم، یک واحد کنترلی مجزا در نظر گرفته می‌شود. در این روش کنترلی، واحدهای کنترلی هر زیر سیستم، کاملاً جداگانه و مستقل از سایر زیر سیستم‌ها عمل می‌کنند. از مزایای کنترل غیرمتمرکز در قیاس با کنترل متمرکز می‌توان به سرعت بالای این روش اشاره داشت. همچنین در کنترل غیرمتمرکز، متغیر کنترلی در هر زیر سیستم تنها بر اساس اطلاعات و داده‌های همان زیر سیستم تعیین می‌شوند. کنترل توزیع شده به مانند کنترل غیرمتمرکز است اما واحدهای کنترلی همسایه با یکدیگر اطلاعات تبادل می‌کنند. این روش در قیاس با روش غیرمتمرکز دقیق‌تر می‌باشد اما پیچیدگی اجرایی بیشتری دارد. در این مقاله تمرکز ما بر بهبود روش‌های کنترل متمرکز مبتنی بر MPC می‌باشد. در این مقاله، پایه و اساس روش پیشنهادی جهت حل مسئله OCVC، بر مبنای روش معرفی شده در [۱۵-۲۰] می‌باشد. در [۱۵-۲۰] برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژن جهش‌یافته^۵ به کار گرفته شده است اما، در این مقاله الگوریتم SPEA2^۶ که بر پایه مفهوم تسلط و بهینگی می‌باشد، استفاده می‌شود. ویژگی اصلی این الگوریتم، حفظ پراکندگی مناسب در میان پاسخ‌های نامغلوب تولیدی است. لذا، این



شکل ۱: اصول عملکرد MPC

جهت تعیین \hat{y} در [۸] سه روش الف) حل کامل مجموعه معادلات غیرخطی (۱) و (۲) ب) خطی سازی حول نقطه تعادل و ج) روش اویلر معرفی شده است که در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.

الف) حل کامل مجموعه معادلات غیرخطی (۱) و (۲)

در این روش \hat{y} در بازه پیش‌بینی t_p ، از حل مجموعه روابط (۱) و (۲) در تمامی لحظات به دست می‌آید. لذا این روش دقیق‌ترین روش بوده اما بسیار زمان‌بر می‌باشد.

ب) خطی‌سازی حول نقطه تعادل

در این روش لحظه t^* و قبل از اعمال اقدامات کنترلی، به‌عنوان نقطه کار سیستم در نظر گرفته می‌شود و در ادامه روابط (۱) و (۲) حول این نقطه خطی می‌شوند. لذا مجموعه روابط (۱) و (۲) به شکل (۷) و (۸) در خواهد آمد.

$$\Delta \dot{x} = \frac{df}{dx} \Delta x + \frac{df}{dy} \Delta y + \frac{df}{du} \Delta u \quad (7)$$

$$0 = \frac{dg}{dx} \Delta x + \frac{dg}{dy} \Delta y + \frac{dg}{du} \Delta u \quad (8)$$

در این روش، به‌دلیل حل مجموعه روابط خطی به جای روابط غیرخطی، سرعت پیش‌بینی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد اما دقت پیش‌بینی مسیر پایین می‌باشد.

ج) روش اویلر

در مسئله کنترل هماهنگ ولتاژ، تغییرات ولتاژها به اقدامات کنترلی به‌صورت یکنواخت است لذا می‌توان \hat{y} را به‌مانند خطی تصور کرد که از دو نقطه ۱- بلافاصله بعد از اعمال اقدامات کنترلی به سیستم (نقطه جهش) و ۲- t_p ثانیه بعد از اعمال اقدامات کنترلی به سیستم (نقطه پیش‌بین) عبور می‌کند. در این روش ابتدا با حل روابط (۱) و (۲) مقدار متغیرهای جبری (y^*) و حالت (x^*) بلافاصله بعد از جهش محاسبه می‌شوند. سپس با کمک رابطه (۹) مقدار تغییرات متغیرهای حالت در زمان $t^* + t_p$ به دست می‌آید.

$$0 = g(x, y, u) \quad (2)$$

که در آن x متغیر حالت، y متغیرهای جبری خروجی و u پارامترهای کنترلی سیستم می‌باشند.

با توجه به اینکه بررسی مسئله ناپایداری ولتاژ بلندمدت مدنظر می‌باشد، معادلات شبه حالت دینامیکی مولدها جهت بررسی رفتار سیستم کفایت می‌کند [۸]. از این رو معادلات دیفرانسیلی سیستم، تنها معادلات دینامیکی بارها می‌باشند. در این مقاله از مدل بار مجتمع نمایی^۷ [۱۵، ۱۶] استفاده شده است که روابط آن به‌صورت (۳) الی (۶) می‌باشند.

$$d\dot{x}_{i,p} / dt = -x_{i,p} / T_{i,p} + P_{i,0} (V_i^{\alpha_s} - V_i^{\alpha_t}) \quad (3)$$

$$P_{i,d} = (1 - n_{i,d} D_{shed}) (x_{i,p} / T_{i,p} + P_{i,0} V_i^{\alpha_t}) \quad (4)$$

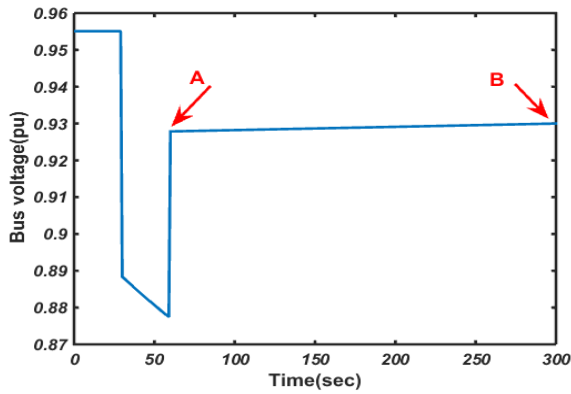
$$d\dot{x}_{i,q} / dt = -x_{i,q} / T_{i,q} + Q_{i,0} (V_i^{\beta_s} - V_i^{\beta_t}) \quad (5)$$

$$Q_{i,d} = (1 - n_{i,d} D_{shed}) (x_{i,q} / T_{i,q} + Q_{i,0} V_i^{\beta_t}) \quad (6)$$

در این روابط، V_i ولتاژ بار i ام است. $x_{i,p}$ و $x_{i,q}$ متغیرهای حالت پیوسته‌ای هستند که با تغییر آن‌ها، بازیابی توان اکتیو و راکتیو در شین بار i حاصل می‌شود. $P_{i,d}$ و $Q_{i,d}$ مشخصه‌های واقعی بار i ام هستند که مقدار توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی بار را در هر لحظه به‌صورت تابعی از ولتاژ و متغیرهای حالت نشان می‌دهند. ضریب D_{shed} بیانگر اندازه گام حذف بار است که در این مقاله، برابر با ۰/۰۵ پروبیت در هر شین بار در نظر گرفته می‌شود و $n_{i,d}$ تعداد گام‌های حذف بار در شین i می‌باشند. ضرایب $T_{i,p}$ و $T_{i,q}$ به ترتیب ثابت زمانی‌های بازیابی توان‌های اکتیو و راکتیو بار هستند. $\alpha_s, \alpha_t, \beta_s, \beta_t$ نیز ثابت‌هایی هستند که میزان وابستگی توان‌های اکتیو و راکتیو بار را در حالت‌های ماندگار و گذرا به ولتاژ نشان می‌دهند. در این مقاله پارامترهای کنترلی شامل سوسپیتانس خازن، تپ ترانسفورماتورها، ولتاژ مرجع مولدها و مقدار حذف بار می‌باشد.

۲-۲-۲ MPC

در شکل ۱ اصول یک MPC نشان داده شده است. t^* ، زمان فعال شدن MPC است. t_s, t_c, t_p به ترتیب طول زمان نمونه‌برداری، مدت‌زمان اعمال اقدامات کنترلی و بازه زمانی پیش‌بینی می‌باشند. در MPC ابتدا در زمان t^* از متغیرهای حالت x و خروجی y نمونه‌برداری می‌شود. سپس با استفاده از مقادیر نمونه‌برداری شده، برای هر آرایش از اقدامات کنترلی (u_1, u_2, \dots)، خروجی سیستم \hat{y} پیش‌بینی می‌شود. خروجی پیش‌بینی شده با خروجی مرجع y_r مقایسه می‌شود و هر کدام از خروجی‌ها که به خروجی مرجع نزدیک‌تر باشد اقدام کنترلی مربوط به آن، به‌عنوان ورودی u به سیستم اعمال می‌گردد. در OCVC، \hat{y} همان ولتاژ شین‌ها می‌باشد.



شکل ۲: پیش‌بینی مسیر به روش مبتنی بر دو نقطه بعد از اعمال اقدامات کنترلی

در این روش، بهره‌بردار سیستم این آزادی عمل را دارد تا با توجه به شرایط سیستم، بهترین مد کنترلی را از دیدگاه بهره‌برداری و اقتصادی انتخاب و به سیستم اعمال کند. این توابع هدف به شرح زیر می‌باشند:

$$J_{\sum Vi} = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^N \int_{t^*}^{t^*+t_p} |V_{i,t} - V_{iref}| dt + \sum_{j=1}^{N_G} \int_{t^*}^{t^*+t_p} (PF \times Viol) dt \right) \quad (13)$$

$$J_{act} = \text{Min} \left(n_c + \sum_{j=1}^{N_G} \int_{t^*}^{t^*+t_p} (PF \times Viol) dt \right) \quad (14)$$

$$J_{load} = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^{N_L} n_{i,d} + \sum_{j=1}^{N_G} \int_{t^*}^{t^*+t_p} (PF \times Viol) dt \right) \quad (15)$$

که v_{it} ولتاژ شین i در زمان t و ولتاژ مرجع شین i می‌باشد که برابر با ۱ پریونیت در نظر گرفته می‌شود. t_p بازه پیش‌بین و t^* لحظه اعمال اقدامات کنترلی است. همچنین n_c تعداد اقدامات کنترلی اعمالی به سیستم و $n_{i,d}$ تعداد گام حذف بار در هر شین بار i می‌باشد. همچنین به دلیل عملکرد محدودکننده سیستم تحریک مولد، بیشینه ولتاژ سیستم تحریک مولدها برابر با ۲ پریونیت در نظر گرفته شده است و به صورت یک ضریب جریمه به توابع هدف، اضافه شده است که $Viol$ بیانگر میزان نقض قید ولتاژ سیستم تحریک مولدها می‌باشد. N تعداد شین‌های سیستم قدرت، N_G تعداد شین‌های مولدی، N_L تعداد شین‌های بار و PF ضریب جریمه می‌باشد که در این مقاله برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

در شمارش تعداد اقدامات کنترلی، تغییرات ولتاژ مرجع مولدها به عنوان اقدام کنترلی در نظر گرفته نمی‌شود، زیرا این امر هیچ هزینه‌ای برای بهره‌بردار سیستم ندارد. بنابراین تعداد تغییرات در سوسپاناس خازن‌ها، تپ مولدها و حذف بار، تعیین‌کننده تعداد اقدامات کنترلی می‌باشند.

الگوریتم پیشنهادی جهت حل این مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم SPEA2 می‌باشد [۲۸، ۲۹]. این الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی

$$\Delta x = t_p \times f(t, x^*, y^*, u^*) \quad (9)$$

u^* مجموعه اقدامات کنترلی اعمالی به سیستم در لحظه t^* می‌باشد. سپس با حل (۱۰)، مقدار متغیرهای جبری در زمان $t^* + t_p$ نیز به دست خواهد آمد.

$$0 = g(x^* + \Delta x, y_p, u^*) \quad (10)$$

\hat{y} خطی است که از دو نقطه y^* و y_p در بازه t_p عبور کند که معادله آن به شکل (۱۱) خواهد بود.

$$\hat{y} = y_p + \frac{t}{t_p} (y_p - y^*) \quad t \in [t^*, t^* + t_p] \quad (11)$$

در این روش نیز، چون محاسبات لازم برای تعیین \hat{y} تنها در دو نقطه انجام می‌شود بسیار سریع بوده اما به دلیل تقریب به کار برده شده در تعیین متغیرهای حالت در زمان $t^* + t_p$ کمی خطا دارد. لذا در ادامه روش پیشنهادی مقاله برای پیش‌بینی مسیر، تحت عنوان پیش‌بینی مسیر مبتنی بر دو نقطه ارائه می‌شود.

د) پیش‌بینی مسیر مبتنی بر دو نقطه

مسیر پیشنهادی بر این اصل استوار است که مسیر تغییرات ولتاژ به‌ازای اعمال اقدامات کنترلی، در OCVC یکنواخت می‌باشد و هیچ‌گونه نوسانی در طول این مسیر دیده نمی‌شود. لذا می‌توان با اغماض از طول مسیر تغییرات ولتاژ، در پیش‌بینی مسیر، مسیر تغییرات ولتاژ را به مانند یک خط پیش‌بینی کرد. در روش مبتنی بر دو نقطه، همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود پیش‌بینی مسیر بر اساس معادله خطی است که از دو نقطه ۱- وضعیت سیستم بعد از اعمال اقدامات کنترلی (A) و ۲- وضعیت حالت ماندگار سیستم بعد از اعمال اقدامات کنترلی (B)، عبور می‌کند. متغیرهای حالت به دلیل ماهیت دینامیکی، دچار جهش نمی‌شوند و مقدار ماقبل جهش خود را حفظ می‌کنند. بنابراین برای به دست آوردن A، تنها کافی است تا رابطه (۲) حل شود. نقطه B نیز از حل حالت ماندگار سیستم به دست می‌آید. لذا از حل روابط (۱) و (۲) به شرط آنکه در رابطه (۱)، مشتق‌ها برابر با صفر در نظر گرفته شوند، مقدار B حاصل می‌شود. بنابراین \hat{y} برابر خواهد بود با:

$$\hat{y} = y_A + \frac{y_B - y_A}{4\tau} (t - t_A) \quad (12)$$

τ ثابت زمانی می‌باشد که در این مقاله مقدار آن با توجه به ثابت زمانی بارها، برابر با ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در این روش، به مانند روش اولی، معادلات سیستم قدرت تنها در دو نقطه حل می‌شود. لذا، سرعت پیش‌بینی مسیر بسیار زیاد می‌باشد.

۳-۲- بهینه‌سازی چندهدفه

برای اینکه روش پیشنهادی از انعطاف‌پذیری لازم با توجه به اولویت‌های کنترلی، برخوردار باشد مسئله OCVC در این مقاله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مدنظر قرار گرفته است.

که در عمل $S(i)$ معرف تعداد جواب‌هایی می‌باشد که مغلوب i شده‌اند. رابطه (۱۶) نحوه‌ی محاسبه $S(i)$ را نشان می‌دهد.

$$S(i) = \left| \left\{ j \mid j \in P_i \cup \bar{P}_i \wedge i \succ j \right\} \right| \quad (16)$$

مبرهن است که در رابطه فوق \cup نماد اجتماع دو مجموعه P و \bar{P} و علامت \succ مرتبط با رابطه‌ی غلبه در پارتو می‌باشد. لذا، مقدار خام برازش عضو i طبق رابطه‌ی (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$R_{(i)} = \sum_{j \in P_i + \bar{P}_i \wedge i \succ j} S_{(j)} \quad (17)$$

به بیان دقیق‌تر برای هر عضو i ، فاصله تا تمام اعضای جمعیت اصلی آرشیو (در فضای هدف) محاسبه شده و در لیستی ذخیره می‌گردد. پس از مرتب کردن لیست به‌صورت صعودی، k امین درایه‌ی لیست، معرف فاصله‌ی مورد نظر بوده و آن را با نماد S_i^k نشان می‌دهند. k نیز از رابطه (۱۸) حاصل می‌شود.

$$k = \sqrt{N + \bar{N}} \quad (18)$$

در نهایت تراکم عضو i به‌صورت رابطه (۱۹) محاسبه خواهد شد.

$$D_{(i)} = \frac{1}{S_i^k + 2} \quad (19)$$

پس از انجام مرحله‌ی فوق میزان برازش نهایی از تجمیع مقادیر برازش خام و تراکم به دست خواهد آمد.

$$F_{(i)} = R_{(i)} + D_{(i)} \quad (20)$$

در این مقاله از مکانیزم معروف به تورنمنت دودویی جهت انتخاب والدین برای تولید جمعیت جدید استفاده شده است. نحوه به‌روز کردن آرشیو به‌گونه‌ای است که در تمام مدت اجرای الگوریتم، اندازه آرشیو ثابت است و همچنین، روش کم کردن اندازه آرشیو به کار گرفته شده از حذف شدن جواب‌های مرزی ممانعت می‌نماید. در زمان انتخاب محیطی، قدم اول کپی کردن تمامی اعضای نامغلوبی (که برازشی کمتر از یک دارا می‌باشند) از آرشیو و جمعیت اصلی، به آرشیو نسل بعد می‌باشد. شکل ریاضی این روند در (۲۱) ارائه شده است.

$$\bar{P}_{t+1} = \left\{ i \mid i \in P_t + \bar{P}_t \wedge f_{(i)} \succ 1 \right\} \quad (21)$$

اگر صف متشکل از پاسخ‌های نامغلوب، دقیقاً به‌اندازه آرشیو باشد $(|\bar{P}_{t+1}| = N)$ مرحله انتخاب محیطی کاملاً انجام شده است، در غیر این صورت امکان وقوع دو حالت وجود دارد: اول اینکه آرشیو بسیار کوچک باشد $(\bar{P}_{t+1} < N)$ و یا اینکه آرشیو خیلی بزرگ باشد $(\bar{P}_{t+1} > N)$. در حالت اول بهترین‌های مجموعه $\left\{ \bar{N} - |\bar{P}_{t+1}| \right\}$ که مسلماً مغلوب می‌باشند به آرشیو جدید اضافه می‌گردند. روند کار بدین‌صورت است که در ابتدا لیستی متشکل از $P_t + \bar{P}_t$ به‌صورت صعودی مرتب می‌گردد (این ترتیب، بر اساس مقادیر برازش اعضا می‌باشد) و سپس به تعداد $(N - \bar{P}_t)$ تا از بهترین اعضای لیست مرتب شده به آرشیو \bar{P}_{t+1} کپی می‌شوند. در حالت دوم (زمانی که سایز آرشیو از \bar{N} بزرگ‌تر می‌گردد)، از تکنیک‌های کم کردن سایز آرشیو استفاده می‌شود تا زمانی که

بر مفاهیم تسلط و بهینگی است و ویژگی اصلی آن، تهیه یک مجموعه متنوع از پاسخ‌های بهینه نامغلوب می‌باشد.

۲-۴- الگوریتم SPEA2

مشخصه‌های کلی این الگوریتم به شرح زیر است:

- ورودی‌ها: اندازه جمعیت برابر N فرض می‌شود.
- اندازه آرشیو برابر \bar{N} فرض می‌شود.
- تعداد نسل‌ها برابر با T فرض می‌شود.
- خروجی‌ها: گروهی از جواب‌های نامغلوب است A نامیده می‌شود.

مراحل این الگوریتم را می‌توان به شرح زیر نام برد:

گام یک: آماده‌سازی

تولید جمعیت اولیه P_0 و تولید مجموعه آرشیو \bar{P}_0 و در نظر گرفتن \bar{P}_0 به‌صورت تهی.

گام دوم: تخصیص برازش^۸

محاسبه مقادیر برازش برای اعضای مجموعه P_t و مجموعه \bar{P}_t .

گام سوم: انتخاب محیطی^۹

در این مرحله تمامی اعضای نامغلوب عضو P_t و \bar{P}_t در داخل مجموعه \bar{P}_{t+1} کپی می‌شوند. در صورتی‌که سایز \bar{P}_{t+1} از مقدار \bar{N} بیشتر شد، تعداد اعضای آن به کمک روش‌های برش کم خواهد شد و در غیر این صورت اگر سایز \bar{P}_{t+1} از مقدار \bar{N} کمتر شد، این بار تعداد اعضای \bar{P}_{t+1} با استفاده از اعضای مغلوب مجموعه P_t و آرشیو \bar{P}_t زیاد می‌شود تا به \bar{N} برسد.

گام چهارم: شرط توقف الگوریتم

اگر تعداد تکرارها (t) از تکرار بیشینه (T) بیشتر شد، A برابر با اعضای نامغلوب آرشیو \bar{P}_{t+1} ، قرار داده شد و الگوریتم متوقف می‌شود.

گام پنجم: انتخاب برای ترکیب^{۱۰}

انجام عملیات انتخاب تورنمنت دودویی^{۱۱} به همراه جایگشت^{۱۲} بر روی اعضای آرشیو \bar{P}_{t+1} برای پر نمودن مخزن ترکیب.

گام ششم: پراکنده‌سازی^{۱۳}

در این مرحله که مرحله نهایی می‌باشد عملگر ترکیب و جهش بر اعضای داخل مخزن ترکیب اعمال گشته و جمعیت جدید حاصل از اعمال این عملگرها در مجموعه \bar{P}_{t+1} قرار داده خواهد شد و خواهیم داشت $t = t + 1$.

برای ارزیابی کیفیت یک پاسخ از تابع برازش استفاده می‌شود. برای جلوگیری از یکی شدن مقدار برازش اعضایی که توسط اعضای یکسانی از آرشیو مغلوب شده‌اند، روش SPEA2، هم اعضای جمعیت اصلی (P) و هم اعضای آرشیو (\bar{P}) را در محاسبه برازش هر عضو دخیل می‌نماید. در واقع هر عضو فرضی i که می‌تواند عضوی از آرشیو \bar{P}_t و یا جمعیت اصلی P_t باشد را به مقدار مقاومت^{۱۴} $S(i)$ نسبت می‌دهند،

جدول ۲: ماتریس اولویت M

	$J_1 = J_{\sum v_i}$	$J_2 = J_{act}$	$J_3 = J_{load}$
$J_1 = J_{\sum v_i}$	m_{11}	m_{12}	m_{13}
$J_2 = J_{act}$	m_{21}	m_{22}	m_{23}
$J_3 = J_{load}$	m_{31}	m_{32}	m_{33}

۲- پاسخ بهینه را در یک فضای جستجوی بزرگ مشخص کند. ۳- پاسخ بهینه را با سرعت مناسبی تعیین کند. ۴- توانایی تطبیق با تغییر در شرایط بهره‌برداری سیستم را داشته باشد. ۵- تا حد ممکن از حذف بار مشترکین، برای کنترل سیستم استفاده نکند. ۶- انعطاف‌پذیری مناسب داشته باشد تا بهره‌بردار سیستم با توجه به شرایط، بهترین انتخاب را داشته باشد (بهینه‌سازی چندهدفه). ۷- باید عملکرد مناسبی در برابر خطاهای پیش‌بینی نشده سیستم داشته باشد. ۸- قابلیت کاربرد در سیستم‌های قدرت بزرگ را داشته باشد. برای برآورده‌سازی هر ۸ شرط، OCVC باید از الگوریتمی جامع با سرعتی مناسب در تعیین پاسخ بهینه برخوردار باشد. در این راستا، در این مقاله، تمامی رخدادهای یک سیستم قدرت به مانند [۱۹، ۲۰]، به دو بخش رخدادهای قابل پیش‌بینی و غیرقابل پیش‌بینی تقسیم می‌شوند. خطای قابل پیش‌بینی شامل خروج یک خط یا یک مولد از سیستم می‌باشد. هر خطای دیگر در شبکه و یا ترکیبی از چند خطای قابل پیش‌بینی، یک خطای غیرقابل پیش‌بینی می‌باشد. برای هر خطای قابل پیش‌بینی، مسئله OCVC به صورت برون‌خط حل می‌شود. در حل برون‌خط، تعداد جمعیت اولیه الگوریتم OCVC برابر با ۱۰۰ و تعداد تکرار نیز ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. در نهایت با حل مسئله بهینه‌سازی یک دسته از پاسخ‌های خوب نامغلوب (A) حاصل شده و در پایگاه دانش سیستم به همراه مکان خطا، ثبت می‌شود. حال اگر یک خطای غیرقابل پیش‌بینی در سیستم رخ بدهد تنها ۱۰ عدد از پاسخ‌های ذخیره شده در پایگاه دانش، فراخوانی می‌شوند. در این انتخاب، اولویت با پاسخ‌هایی است که تا حد ممکن بدون حذف بار، به کنترل سیستم پرداخته‌اند. همچنین این ۱۰ پاسخ به کمک مفهوم فاصله ازدحامی انتخاب می‌شود [۳۰]. به دلیل احتمال تغییر در نقطه کار سیستم، یک جستجوی محلی کوچک در ۱۰ تکرار پیرامون این ۱۰ پاسخ، به صورت برخط صورت می‌گیرد و در نهایت، پاسخ‌های نامغلوب بهینه تعیین می‌شود و بهره‌بردار با کمک ماتریس اولویت M ، بهترین پاسخ را تعیین و به سیستم اعمال می‌کند [۱۹]. لذا این روش یک روش تطبیقی می‌باشد. لازم به ذکر است که در حل برون‌خط، پیش‌بینی مسیر تغییرات ولتاژ با استفاده از حل کامل معادلات سیستم انجام می‌شود و در حالت برخط برای افزایش سرعت عملکرد، پیش‌بینی مسیر پاسخ ولتاژها، با استفاده از مدل پیشنهادی مبتنی بر دو نقطه انجام می‌شود. هرگاه یک خطای غیرقابل پیش‌بینی در شبکه رخ دهد در گام نخست، مکان خطا مشخص می‌شود سپس، از اطلاعات موجود در پایگاه دانش مرتبط با این مکان، استفاده شده و یک فضای جستجوی کوچک شکل می‌گیرد [۲۰]. سپس الگوریتم یادگیری برخط که در [۲۰] معرفی شده است پاسخ مناسب را از میان این فضای جستجو تعیین می‌کند. در

$\left| \bar{P}_{i+1} \right| = \bar{N}$. لذا با انجام این مراحل، پراکندگی پاسخ‌ها در جبهه پارتو این الگوریتم بسیار خوب خواهد بود.

۲-۵- تکنیک MCDM

پس از تعیین یک دسته از جواب‌های نامغلوب A ، بهره‌بردار سیستم، با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)، بهترین پاسخ را تعیین و به سیستم اعمال می‌کند. این تکنیک به صورت کامل در [۱۸] شرح داده شده است. با ۳ تابع هدف و پاسخ بهینه نامغلوب، پاسخ‌ها با استفاده از رابطه (۲۲) رتبه‌بندی می‌شوند و سرانجام، پاسخ با رتبه یک به سیستم اعمال می‌شود:

$$r_i = \sum_{j=1}^3 w_j a_{ijn} \quad (22)$$

که r_1, \dots, r_n رتبه نهایی پاسخ‌های نامغلوب A_1, \dots, A_n (جدول ۱) می‌باشند. w_1, \dots, w_3 به ترتیب بیانگر اهمیت نسبی توابع هدف $J_1 = J_{\sum v_i}, J_2 = J_{act}$ و $J_3 = J_{load}$ هستند که با رابطه (۲۴) به دست می‌آیند. a_{ijn} مقدار نرمالایز شده a_{ij} می‌باشد و مقدار پاسخ A_i در تابع هدف J_j می‌باشد. از رابطه (۲۳) به دست می‌آید:

$$a_{ijn} = \frac{\Gamma(a_{ij} - a_{wj})}{(a_{bj} - a_{wj})} + 1 \quad (23)$$

منظور از نرمالایز شده، قرارگیری مقادیر a_{ijn} در بازه ۱ تا ۱۰۰ می‌باشد. بدین منظور، $\Gamma = 99$ فرض می‌شود. a_{wj} و a_{bj} به ترتیب بهترین و بدترین مقدار تابع هدف J_j می‌باشد.

جدول ۱: یک دسته از جواب‌های نامغلوب

	$J_1 = J_{\sum v_i}$	$J_2 = J_{act}$	$J_3 = J_{load}$
A_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}
A_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}
...
A_i	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}
...
A_n	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}

برای تعیین w_j ابتدا باید ماتریس اولویت M (جدول ۲) را شکل داد. در این ماتریس $m_{ij} = 1/m_{ji}$ و $m_{ii} = 1$ می‌باشند. درایه m_{ij} بیانگر این موضوع می‌باشد که تابع هدف J_i ارزشی m_{ij} برابر تابع هدف J_j دارد. به عنوان مثال اگر m_{23} برابر با ۳ فرض شود اهمیت تابع هدف J_2 سه برابر تابع هدف J_3 می‌باشد. در این صورت خواهیم داشت:

$$Mw = \lambda_{max} w \quad (24)$$

که λ_{max} مقدار ویژه بیشینه ماتریس اولویت M و w بردار ویژه مربوط به این مقدار ویژه است.

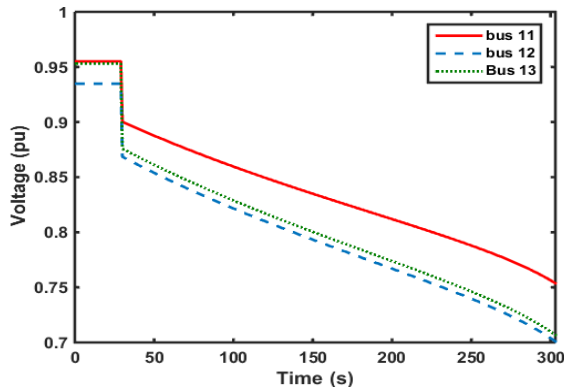
۳- الگوریتم کنترل تطبیقی و بهینه هماهنگ ولتاژ پیشنهادی

ویژگی‌های یک OCVC خوب عبارت‌اند از: ۱- همه قیدهای بهره‌برداری سیستم را در نظر بگیرد.

عملکرد سیستم پیشنهادی در برابر یک خطای غیرقابل پیش‌بینی نشان داده می‌شود.

۴-۱- سناریو ۱

در این سناریو مولد شین ۳۲ در ثانیه ۳۰ از مدار خارج می‌شود. این خطا یک خطای قابل پیش‌بینی می‌باشد. با خروج این مولد و بدون سیستم کنترلی همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود فروپاشی ولتاژ در شبکه رخ می‌دهد.



شکل ۲: عملکرد سیستم با خروج مولد ۳۲، بدون سیستم کنترلی

شکل ۳، چهار روش پیش‌بینی مسیر غیرخطی، خطی، اویلر و مسیر پیشنهادی مبتنی بر دو نقطه را نشان می‌دهد. در تمامی مسیرها، متغیرهای کنترلی در ثانیه ۶۰، بدون حل مسئله OCVC به سیستم اعمال شده است. مقادیر این متغیرهای کنترلی برای هر ۱۰ خازن برابر با $0/3$ پریونیت و ولتاژ مرجع مولدها $1/05$ پریونیت در نظر گرفته شده است. مقدار اختلاف این ۳ روش با مسیر غیرخطی کامل در زمان‌های ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ در جدول ۳ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود خطای پیش‌بینی مسیر نسبت به روش غیرخطی، در دو روش خطی و اویلر، زیاد است و با گذشت زمان به مقدار آن نیز افزوده می‌شود درحالی‌که این خطا، برای روش پیشنهادی بسیار کم می‌باشد. جدول ۴، زمان محاسباتی هر روش بیان شده است و دقت در نتایج آن بیانگر این موضوع است که روش خطی بیشترین سرعت را دارد و سرعت دو روش اویلر و پیشنهادی، به دلیل انجام محاسبات تنها در دو نقطه برای پیش‌بینی مسیر، در قیاس با روش غیرخطی کامل بسیار بالا می‌باشد. لذا با توجه به نتایج حاصل، در دو سناریوی ۲ و ۳، به دلیل سرعت و دقت مناسب روش پیشنهادی، پیش‌بینی مسیرها برای تعیین بهترین اقدامات کنترلی با روش پیشنهادی مبتنی بر دو نقطه انجام می‌شود.

جدول ۳: مقدار خطای تعیین مسیر پاسخ ولتاژها نسبت به روش غیرخطی

زمان (ثانیه)	خطی	اویلر	روش پیشنهادی
۶۰	۰/۰۰۱۱	۰	۰
۹۰	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۸	-۰/۰۰۱۲
۱۲۰	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۲۷	-۰/۰۰۱۲
۱۵۰	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۵۰	-۰/۰۰۰۸

الگوریتم یادگیری برخط جمعیت اولیه ۱۰ و با ۱۰ تکرار در نظر گرفته می‌شود. در پایان، پاسخ‌های بهینه حاصله، در پایگاه دانش سیستم ذخیره شده و هرگاه این خطا مجدد در سیستم رخ دهد به‌عنوان یک خطای قابل پیش‌بینی شناسایی می‌گردد.

مراحل الگوریتم تطبیقی و بهینه هماهنگ ولتاژ پیشنهادی در حالت برخط به شرح زیر می‌باشد:

گام ۱: شناسایی مکان خطا.

گام ۲: فراخوانی داده‌های مرتبط با مکان خطا در پایگاه دانش.

گام ۳: انتخاب ۱۰ عدد از پاسخ‌های موجود در پایگاه دانش به کمک مفهوم فاصله ازدحامی.

گام ۴: حل مسئله بهینه‌سازی به کمک جستجوی محلی و یادگیری برخط و تعیین A .

گام ۵: به‌کارگیری سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره بر مبنای ماتریس اولویت M و تعیین متغیرهای کنترلی.

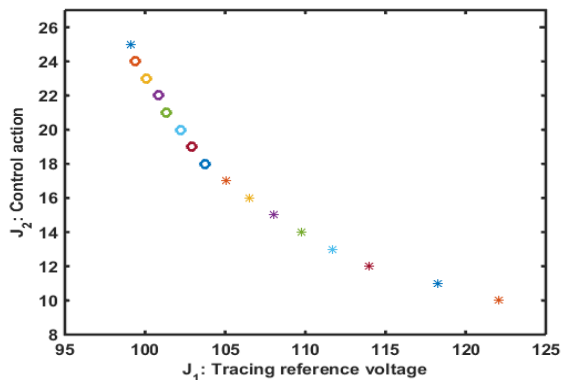
گام ۶: اعمال متغیرهای کنترلی منتخب به سیستم و ذخیره A در پایگاه دانش سیستم.

۴- شبیه‌سازی

جهت بررسی عملکرد OCVC پیشنهادی، سیستم ۳۹ شین New England مورد بررسی قرار گرفته است [۳۱]. این سیستم ۱۰ مولد دارد. ولتاژ مرجع هر مولد، به‌عنوان یک پارامتر کنترلی در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند از $0/9$ تا $1/1$ پریونیت تغییر کند. بیشینه ولتاژ سیستم تحریک هر مولد برابر با ۲ پریونیت در نظر گرفته شده است. همچنین در این سیستم ۱۰ خازن در شین‌های ۳، ۴، ۷، ۸، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۲۱ و ۲۶ فرض شده است که در گام $0/15$ پریونیت از صفر تا $0/3$ پریونیت متغیر می‌باشند. در این سیستم ۲۱ شین بار وجود دارد لذا ۲۱ موقعیت حذف بار می‌تواند در نظر گرفت که گام حذف بار در هر شین $0/05$ پریونیت در نظر گرفته شده است. بیشینه مقدار حذف بار در هر شین تا ۶۰ درصد بار پایه آن شین در نظر گرفته شده است. α_i ، β_i و β_s به ترتیب صفر، $2/5$ ، صفر و $1/5$ در نظر گرفته شده است. سه ترانسفورماتور تپ‌دار در خطوط ۱۱-۱۲، ۱۲-۱۳ و ۱۹-۲۰ وجود دارد که حد پایین و بالای تپ‌ها به ترتیب $0/9$ و $1/1$ می‌باشد و تپ‌ها در پله $0/01$ پریونیت تغییر می‌کنند. لازم به ذکر است مقدار ولتاژ مرجع همه مولدها و مقدار همه خازن‌ها در حالت پایه، به ترتیب برابر با ۱ و صفر پریونیت در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها با یک کامپیوتر ۵ هسته‌ای و پردازنده $2/86$ گیگاهرتزی انجام شده است.

در این بخش سه سناریو مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سناریو اول، به مقایسه میزان سرعت و دقت روش‌های پیش‌بینی مسیر پاسخ ولتاژها پرداخته می‌شود. هدف سناریوی دوم، بررسی میزان سازگاری روش پیشنهادی با توجه به تغییر نقطه کار سیستم می‌باشد. همچنین در سناریو دو، اهمیت دو تابع هدف ردیابی ولتاژ مرجع و کمترین اقدام کنترلی در عملکرد سیستم کنترلی بررسی می‌شود. در سناریوی سوم

الگوریتم بهینه‌سازی SPEA2، ۱۴/۵ ثانیه است. این زمان برای الگوریتم ارائه شده در [۲۰-۱۵]، حدود ۱۵/۵ ثانیه می‌باشد.



شکل ۴: مجموعه پاسخ‌های نامغلوب موجود در پایگاه دانش برای خروج مولد ۳۲ با حذف بار صفر

ماتریس اولویت M در دو دیدگاه ردیابی ولتاژ مرجع و اقتصادی به ترتیب در دو جدول ۵ و ۶ نشان داده شده است. مقایسه بین این دو دیدگاه در دو شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. در این دو شکل زمان اعمال اقدامات کنترلی ثانیه‌های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ خواهد بود. در شکل ۵، نقطه کار سیستم قدرت، همان نقطه کار قبلی سیستم که محاسبات برون خط در آن انجام شده است، فرض شده است و در شکل ۶، بار اکتیو و راکتیو هر شین باری، به صورت تصادفی بین ۱ تا ۱/۱ بار پایه در آن شین افزایش یافته است. با دقت در دو شکل ۵ و ۶ نتایج زیر حاصل می‌شود:

- ویژگی تطبیقی روش کنترلی
- انعطاف‌پذیری روش پیشنهادی

در دو شکل ۵ و ۶، تعداد اقدامات کنترلی با ماتریس اولویت ردیابی ولتاژ مرجع به ترتیب ۲۵ و ۲۷ و با ماتریس اولویت اقتصادی ۱۰ و ۱۱ می‌باشد و تعداد گام‌های حذف بار در هر دو نقطه کار، برابر با صفر است.

جدول ۵: ماتریس اولویت M ، ردیابی ولتاژ مرجع

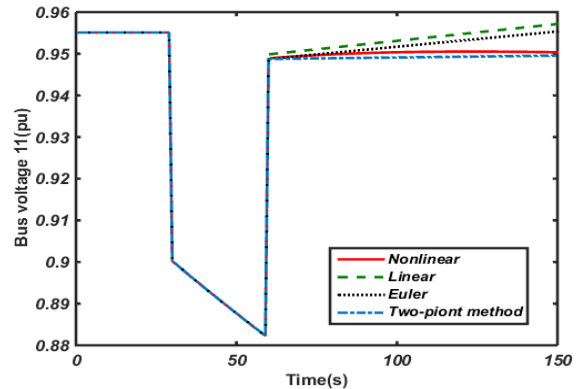
	$J_1 = J_{\sum V_i}$	$J_2 = J_{act}$	$J_3 = J_{load}$
$J_1 = J_{\sum V_i}$	۱	۴	۲
$J_2 = J_{act}$	۰/۲۵	۱	۰/۵
$J_3 = J_{load}$	۰/۵	۲	۱

جدول ۶: ماتریس اولویت M ، دیدگاه اقتصادی

	$J_1 = J_{\sum V_i}$	$J_2 = J_{act}$	$J_3 = J_{load}$
$J_1 = J_{\sum V_i}$	۱	۰/۳۳۳۳	۰/۵
$J_2 = J_{act}$	۳	۱	۱/۵
$J_3 = J_{load}$	۲	۰/۶۶۶۶	۱

جدول ۴: مدت زمان محاسبات تعیین مسیر پاسخ ولتاژها

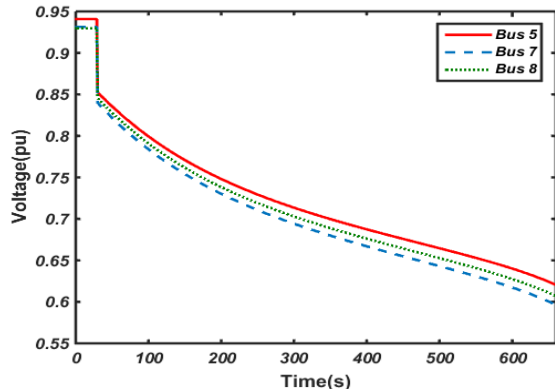
مسیر پیش‌بینی	زمان محاسبات (ثانیه)
غیرخطی	۳/۳۴
خطی	۰/۱۹
اولیتر	۰/۴۶
روش پیشنهادی مبتنی بر دو نقطه	۰/۴۵



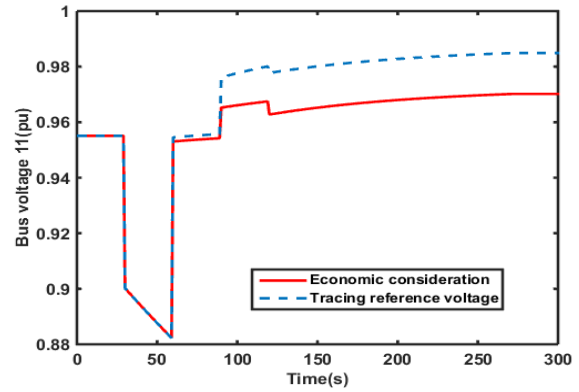
شکل ۳: پیش‌بینی مسیر پاسخ ولتاژ شین ۱۱ به اعمال اقدامات کنترلی

۲-۴- سناریو ۲

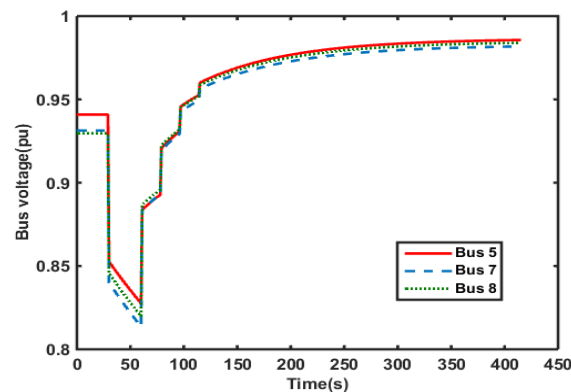
خروج مولد شین ۳۲، یک خطای قابل پیش‌بینی است و مسئله OCVC به صورت برون خط، با جمعیت اولیه ۱۰۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ حل شده است. زمان مورد نیاز در الگوریتم با الگوریتم SPEA2، برای هر تکرار در حالت محاسبات برون خط، حدود ۶۱۰ ثانیه است. این زمان در الگوریتم ارائه شده در [۲۰-۱۵] در حدود ۶۶۰ ثانیه می‌باشد. برتری الگوریتم SPEA2 به سایر الگوریتم‌ها از جمله NSGAI2 در [۲۸، ۲۹] به ازای توابع هدف مختلف اثبات شده است. لذا تمامی محاسبات بخش برون خط و برخط با الگوریتم SPEA2 انجام خواهد شد. پس از حل مسئله به صورت برون خط، یک دسته از پاسخ‌های خوب حاصل می‌شود و در پایگاه دانش سیستم کنترلی ذخیره می‌گردد. در حالت برخط، اولویت بهره‌برداری استفاده از پاسخ‌های بهینه‌ای است که بدون حذف بار، سیستم قدرت را کنترل می‌کند. برای خروج مولد ۳۲، ۱۶ دسته پاسخ نامغلوب در پایگاه دانش وجود دارد که بدون حذف بار به کنترل سیستم می‌پردازند. این پاسخ‌ها، در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. این ۱۶ پاسخ فضای جستجوی سیستم کنترلی را در زمان محاسبات برخط تشکیل می‌دهند. در زمان وقوع این خطا در حالت برخط، جستجویی با جمعیت اولیه ۱۰ و تعداد تکرار ۱۰، در این فضای جستجو در هر بازه کنترل صورت می‌گیرد و در پایان هر جستجو، بهره‌بردار سیستم با استفاده از ماتریس اولویت M ، بهترین پاسخ را تعیین و به سیستم اعمال می‌کند. این ۱۰ پاسخ از میان ۱۶ پاسخ، با توجه به مفهوم فاصله ازدحامی انتخاب می‌شوند که در شکل ۴ با شکل "*" نمایش داده شده است. زمان هر جستجو در حالت برخط، با استفاده از پیش‌بینی مسیر با روش پیشنهادی مبتنی بر دو نقطه، با



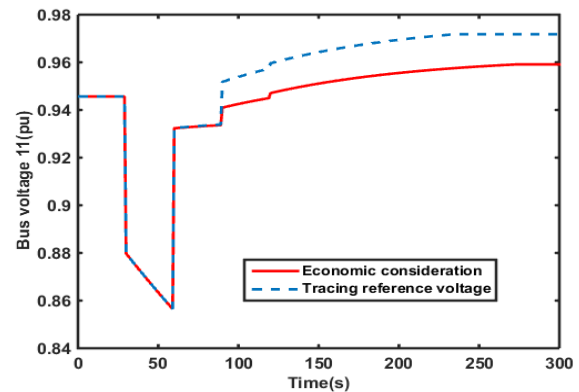
شکل ۷: عملکرد سیستم با خروج هم‌زمان خطوط ۵-۶ و ۶-۷، بدون سیستم کنترلی



شکل ۵: عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی در حالت برخط در خروج مولد ۳۲، در نقطه کار قدیم



شکل ۸: عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی در حالت برخط با خروج هم‌زمان خطوط ۵-۶ و ۶-۷



شکل ۶: عملکرد سیستم کنترلی پیشنهادی در حالت برخط در خروج مولد ۳۲، در نقطه کار جدید

۳-۴- سناریو ۳

در این سناریو دو خط ۵-۶ و ۶-۷ به صورت هم‌زمان از مدار خارج می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود بعد از وقوع این رخداد، در صورت عدم وجود سیستم کنترلی، فروپاشی ولتاژ در شبکه رخ می‌دهد. این رخداد یک خطای غیرقابل پیش‌بینی می‌باشد، بنابراین اطلاعاتی از این خطا در پایگاه دانش سیستم وجود ندارد. در این خطا سه شین ۵، ۶ و ۷ درگیر می‌باشند لذا با مراجعه به پایگاه دانش، اطلاعات مربوط به تمامی خطاهایی که در این سه شین رخ داده است استخراج می‌شوند. این اطلاعات فضای جستجوی اولیه برای خطای مدنظر را در حالت برخط تشکیل می‌دهند.

عملکرد سیستم کنترلی برای این خطای غیرقابل پیش‌بینی در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل کنترل ولتاژ، از دیدگاه ردیابی ولتاژ مرجع که مقادیر آن در جدول ۵ نمایش داده شد، صورت گرفته است. این شکل، ولتاژ شین‌های ۵، ۶ و ۷ را نشان می‌دهد و به خوبی در این شکل، مشاهده می‌شود که بازیابی ولتاژ به خوبی انجام شده است. نکته قابل توجه در شکل ۸، عملکرد سیستم کنترلی در ۴ دوره زمانی می‌باشد. زیرا این خطای غیرقابل پیش‌بینی بود و هیچ اطلاعاتی به صورت مستقیم در پایگاه دانش سیستم برای این خطا وجود نداشت. همچنین در این خطا همان‌گونه که در جدول ۷ مشاهده می‌شود در سه شین ۴، ۷ و ۸ حذف بار صورت گرفته است.

جدول ۷: تعداد گام‌های حذف بار

	60s	90s	120s	150s
$n_{4,d}$	۳	۵	۵	۶
$n_{7,d}$	۴	۵	۵	۵
$n_{8,d}$	۱	۳	۴	۴

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از مطالعه برون خط سیستم و تشکیل پایگاه دانش، جستجوی محلی برخط، MCDM و پیش‌بینی مسیر ولتاژ مبتنی بر دو نقطه، یک OCVC سریع، انعطاف‌پذیر و تطبیقی پیشنهاد شد. همچنین نشان داده شد که روش پیشنهادی مبتنی بر دو نقطه جهت پیش‌بینی مسیر پاسخ ولتاژها در OCVC، نسبت به روش غیرخطی سریع‌تر و از دو روش خطی و اوپلر دقیق‌تر می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها بر روی سیستم ۳۹ شین New England مؤید این موضوع است که سیستم کنترلی پیشنهادی، دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد:

- ۱- حفظ قیود بهره‌برداری سیستم، با به کارگیری MPC و تعریف توابع بهینه‌سازی مناسب که ملزم به حفظ قیود سیستم می‌باشد.
- ۲- توانایی تطبیق با تغییر در نقطه کار بهره‌برداری سیستم، با بهره‌گیری از جستجوی محلی برخط.

- discrete multi-valued PSO algorithm." *ISA transactions* 50.2 (2011): 195-200.
- [14] Singh, Pushendra, et al. "Strategy to optimize the load shedding amount based on static voltage stability using SFLA." *Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE), Biennial International Conference on.* IEEE, 2016.
- [15] Ma, H. M., K. F. Man, and David J. Hill. "A jumping genes scheme for multi-objective coordinated voltage control." *Industrial Informatics, IEEE International Conference on.* IEEE, 2006.
- [16] Ma, H. M., Kai-Tat Ng, and Kim F. Man. "Multiobjective coordinated power voltage control using jumping genes paradigm." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55.11 (2008): 4075-4084.
- [17] Ma, H. M., Kai-tat Ng, and Kim F. Man. "A multiple criteria decision-making knowledge-based scheme for real-time power voltage control." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 4.1 (2008): 58-66.
- [18] Ma, Haomin, Sufang Chen, and Yinghui Zhang. "Knowledge-based learning for emergency voltage control." *Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), Sixth International Conference on.* IEEE, 2015.
- [19] Ma, Haomin, and David J. Hill. "Adaptive coordinated voltage control—Part I: Basic scheme." *IEEE Transactions on Power Systems* 29.4 (2014): 1546-1553.
- [20] Ma, Haomin, and David J. Hill. "Adaptive Coordinated Voltage Control—Part II: Use of Learning for Rapid Response." *IEEE Transactions on Power Systems* 29.4 (2014): 1554-1561.
- [۲۱] م. دارابیان، ا. جلیلودن، کنترل پیش‌بین با رویکرد بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت در حضور مزارع بادی با استفاده از سیستم ذخیره ساز انرژی ابرخازنی و SSSC، مهندسی برق (دانشکده فنی دانشگاه تبریز): تابستان ۱۳۹۵، دوره ۴۶، شماره ۲ (پیاپی ۷۶)؛ از صفحه ۵۹ تا صفحه ۷۳.
- [۲۲] س. و. قوشخانه‌ای، ع. الفی، طراحی کنترل پیش‌بین برای سیستم‌های عملیات از راه دور دوطرفه نامعین، تابستان ۱۳۹۶، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحه ۶۴۱-۶۵۱.
- [23] Islam, Sk Razibul, Danny Sutanto, and Kashem M. Muttaqi. "Coordinated decentralized emergency voltage and reactive power control to prevent long-term voltage instability in a power system." *IEEE Transactions on Power Systems* 30.5 (2015): 2591-2603.
- [24] Islam, Sk Razibul, Kashem M. Muttaqi, and Danny Sutanto. "A decentralized multiagent-based voltage control for catastrophic disturbances in a power system." *IEEE Transactions on Industry Applications* 51.2 (2015): 1201-1214.
- [25] Islam, Sk Razibul, Danny Sutanto, and Kashem M. Muttaqi. "A distributed multi-agent based emergency control approach following catastrophic disturbances in interconnected power systems." *IEEE Transactions on Power Systems* 31.4 (2016): 2764-2775.
- [26] Islam, Sk Razibul, Kashem M. Muttaqi, and Danny Sutanto. "Multi-agent receding horizon control with neighbour-to-neighbour communication for prevention of voltage collapse in a multi-area power system." *IET Generation, Transmission & Distribution* 8.9 (2014): 1604-1615.
- [27] Liu, Shuiping, et al. "Distributed model predictive control algorithms for emergency voltage stability control of power systems." *Power and Energy Engineering*
- ۳- انعطاف‌پذیری در کنترل ولتاژ با حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه و استفاده از تکنیک MCDM.
- ۴- عدم حذف بار مشترکین به دلیل تعریف ضرایب مناسب در ماتریس اولویت و حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه.
- لازم به ذکر می‌باشد با وجود تلاش نویسندگان جهت بهبود عملکرد و سرعت کنترل بهینه و هماهنگ ولتاژ، هنوز این روش امکان پیاده‌سازی به صورت واقعی در سیستم‌های قدرت را ندارد. این امر مستلزم توسعه تکنولوژی و قدرت واحد پردازنده رایانه‌ها می‌باشد.

مراجع

- [1] Kundur, Prabha, et al. "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions." *IEEE transactions on Power Systems* 19.3 (2004): 1387-1401.
- [2] Taylor, Carson W., and Dennis C. Erickson. "Recording and analyzing the July 2 cascading outage [Western USA power system]." *IEEE Computer Applications in Power* 10.1 (1997): 26-30.
- [3] Paul, J. P., J. Y. Leost, and J. M. Tesson. "Survey of the secondary voltage control in France: Present realization and investigations." *IEEE Transactions on Power Systems* 2.2 (1987): 505-511.
- [4] Corsi, Sandro, et al. "The coordinated automatic voltage control of the Italian transmission grid-part I: reasons of the choice and overview of the consolidated hierarchical system." *IEEE Transactions on Power Systems* 19.4 (2004): 1723-1732.
- [5] Corsi, Sandro, et al. "The coordinated automatic voltage control of the Italian transmission Grid-part II: control apparatuses and field performance of the consolidated hierarchical system." *IEEE Transactions on Power Systems* 19.4 (2004): 1733-1741.
- [6] Heche, J. V., and J. Deuse. "COORDINATED VOLTAGE CONTROL EXPERIENCE IN BELGIUM." 21, rue d'Artois, F 75008 (2000): 6.
- [7] Geidl, Martin. "Implementation of coordinated voltage control for the swiss transmission system." *MELECON 2010-2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference.* IEEE, 2010.
- [8] Larsson, Mats, David J. Hill, and Gustaf Olsson. "Emergency voltage control using search and predictive control." *International journal of electrical power & energy systems* 24.2 (2002): 121-130.
- [9] Larsson, Mats, and Daniel Karlsson. "Coordinated system protection scheme against voltage collapse using heuristic search and predictive control." *IEEE Transactions on Power Systems* 18.3 (2003): 1001-1006.
- [10] Liu, Mingbo, Wenjie Zheng, and James A. Momoh. "A simultaneous dynamic optimization strategy for coordinated voltage control to enhance the voltage stability of the electric power systems." *North American Power Symposium (NAPS), 2009. IEEE, 2009.*
- [11] Wen, J. Y., et al. "Optimal coordinated voltage control for power system voltage stability." *IEEE Transactions on Power Systems* 19.2 (2004): 1115-1122.
- [12] Li, Yanjun, David J. Hill, and Tiejun Wu. "Optimal coordinated voltage control of power systems-an immune algorithm solution." *Control Conference, 2004. 5th Asian.* Vol. 3. IEEE, 2004.
- [13] Pourjafari, Ebrahim, and Hamed Mojallali. "Predictive control for voltage collapse avoidance using a modified

"SPEA2" دومین کنفرانس بین المللی لجستیک و زنجیره تأمین، تهران، ایران، آذر ۱۳۹۰.

- [30] Deb, K., et al., A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 2002. 6(2): p. 182-197.
- [31] Pai, Anantha. *Energy function analysis for power system stability*. Springer Science & Business Media, 2012.

Conference (APPEEC), 2016 IEEE PES Asia-Pacific. IEEE, 2016.

- [28] Zitzler, Eckart, Marco Laumanns, and Lothar Thiele. "SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm." (2001).

[۲۹] ع. امامی، ح. غلامی، آ. بلوکیان، ج. میرمحمدصادقی، "مسیریابی ناوگان باری با محدودیت پنجره زمانی با الگوریتم ژنتیک و

زیرنویس‌ها

- ⁸ Fitness Assignment
⁹ Environmental Selection
¹⁰ Mating Selection
¹¹ Binary tournament
¹² Replacement
¹³ Variation
¹⁴ Strength

- ¹ Model Predictive Control
² Optimal Coordinated Voltage Control
³ Shuffled Frog Leaping Algorithm
⁴ Multiple Criteria Decision-Making
⁵ Jumping Genes Paradigm Algorithm
⁶ Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2
⁷ Aggregate Exponential Recovery Load Model