بررسی روش‌های کنترل ولتاژ در سیستم‌های قدرت

ماندانا حجتی طباطبایی[۱]، حسن سیاهکلی*[۲]، جواد علمایی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، m.h.tabatabaiee2007@gmail.com

*2- استادیار، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، h.siahkali@tedco.co

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، j_olamaei@azad.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۶

چکیده: ناپایداری ولتاژ از مهمترین مشکلات سیستم‌های قدرت می‌باشد. در سال‌های اخیر نیز با تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، بهره‌برداران سیستم برای حداکثر کردن سود و کم کردن هزینه‌ها، سیستم را در نقطه کاری نزدیک به مرز شرایط پایدار مورد بهره‌برداری قرار می‌دهند. در هنگام وقوع یک رخداد در سیستم قدرت، اگر سیستم قدرت قادر به حفظ ولتاژ در نقاط مختلف خود نباشد، پدیده ناپایداری ولتاژ در سیستم قدرت رخ داده است که می‌تواند منجر به بروز خاموشی گسترده در سیستم شود. این خاموشی‌ها علاوه بر اینکه خسارات اقتصادی زیادی را به دنبال دارد موجب نارضایتی مشترکین از شبکه برق نیز خواهد شد. بنابراین شناسایی ناپایداری ولتاژ در شبکه که به دنبال آن بتوان در مورد اقدامات کنترلی تصمیم‌گیری کرد، نقش مهمی در افزایش کیفیت و امنیت سیستم خواهد داشت. در این مقاله روش‌های مختلف پایداری و کنترل ولتاژ، معرفی، مطالعه و بررسی می شود.

واژه‌های کلیدی: کنترل اضطراری ولتاژ، پایداری ولتاژ، کنترل غیرمتمرکز.

۱- مقدمه

توسعه و تکامل سیستم‌های قدرت منجر به مسائل جدیدی شده است که در سیستم‌های قدرت گذشته اصلا مطرح نبودند. از دیدگاه رفتار دینامیکی، با توجه به اینکه سیستم‌های قدرت در زمره سیستم‌های دینامیکی غیرخطی هستند، پیچیدگی و اهمیت مسائل پایداری در آن‌ها افزایش روز افزون یافته است. از جمله مسایل نسبتا جدیدی که سیستم‌های قدرت توسعه یافته امروزی با آن مواجه هستند، بروز ناپایداری به صورت ناپایداری ولتاژ است. مساله پایداری ولتاژ، زیر مجموعه‌ای از مسائل پایداری سیستم‌های قدرت و مربوط به رفتار دینامیکی آن‌ها در پی وقوع اختلال‌ها می‌باشد. امروزه ناپایداری ولتاژ مشکل اصلی بسیاری از سیستم‌های قدرت است. علت این امر، رشد روز افزون مصرف انرژی و فاصله طولانی بین مراکز تولید و مصرف می-باشد که سبب نزدیک شدن نقطه کار سیستم به سطح حداکثر بارگذاری می‌شود. بررسی خاموشی‌های گسترده‌ای که در کشورهای مختلف جهان به وقوع پیوسته است نشان می‌دهد که علت آغازگر بسیاری از این خاموشی‌ها ناپایداری ولتاژ می باشد[۱، ۲]. به همین علت از ۱۵ سال پیش تاکنون توجه مراکز تحقیقاتی و محققان به این مقوله از پایداری سیستم قدرت بیشتر معطوف شده است و کارهای بسیاری در جهت شناسایی این پدیده و عوامل موثر در آن و ارائه راهکارهای کنترلی عملی جهت جلوگیری از وقوع پدیده ناپایداری ولتاژ انجام گرفته است. این راهکارها را می توان به دو دسته ممانعتی و اضطراری تقسیم‌بندی نمود. کنترل ممانعتی به مجموعه اقداماتی گفته می‌شود که قبل از وقوع هرگونه رخدادی در سیستم قدرت، جهت افزایش حاشیه پایداری ولتاژ سیستم به سیستم قدرت اعمال می‌گردد. منظور از کنترل اضطراری ولتاژ، مجموعه اقداماتی است که بعد از وقوع اختلال در سیستم قدرت، جهت جلوگیری از ناپایداری و فروپاشی ولتاژ انجام می‌شود. در این مقاله قصد داریم تا ضمن بررسی کنترل اضطراری ولتاژ و بیان مدل سیستم قدرت، به مرور تحقیقات انجام شده در این زمینه برای شناسایی و پیشنهاد روش مناسب به منظور کنترل اضطراری ولتاژ با سرعت عمل بالا و برای جلوگیری از

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.5.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021

فروپاشی شبکه در زمـان بـروز اخـتلال و در شـرایط ناپایـداری ولتـاژ بپردازیم.

۲- کنترل ولتاژ

کنترل ولتاژ در سیستم‌های قدرت معمولاً در سه سطح انجام می-شود[۵]. در سطح اول، کنترل به وسیله بازیابی سریع ولتاژ در خروجی تجهیزات کنترل‌کننده ولتاژ مانند مولدها، جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو و کندانسورهای سنکرون انجام می‌شود. در سطح دوم کنترل که به نام کنترل ولتاژ ثانویه معروف است، کنترل ولتاژ به صورت ناحیه‌ای اجرا می‌گردد. در سطح سوم که به نام کنترل ولتاژ ثالثیه معروف است، کنترل ولتاژ به صورت ملی یا بین‌المللی انجام می‌شود یعنی اطلاعات کل سیستم (نه یک بخش آن) مورد استفاده قرار می-گیرد.

کلیه اقداماتی که به منظور کنترل ولتاژ انجام می‌شوند را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم کرد[۳]:

۱- اقداماتی که به منظور اصلاح پروفیل ولتاژ به کار می‌روند.
۲- اقداماتی که با هدف جلوگیری از ناپایداری و سقوط ولتاژ صورت می‌گیرند.

۲-۱- کنترل اضطراری ولتاژ

به منظور بررسی احتمال وقوع ناپایداری‌های ولتاژ، باید اختلال‌های محتمل اعمال گردند و پاسخ سیستم به هر یک از آن ها مورد شبیه-سازی قرار گیرد. سپس باید در موارد ناپایداری، اقدامات مقتضی تعیین و در زمان مناسب اعمال شوند. با بررسی یک به یک اختلال‌های محتمل، سیستم قدرت آمادگی مواجهه با این اختلال‌ها را خواهد داشت. اما به علت گستردگی سیستم قدرت، امکان بررسی تمامی اختلال‌ها در سطوح مختلف بار وجود ندارد. ضمن اینکه تنها حالت‌های دارای یک اختلال مورد بررسی قرار می‌گیرند. بر این اساس، سیستم قدرت احتمالاً در برابر اختلال‌های بررسی نشده و یا بروز همزمان دو یا چند اختلال دچار ناپایداری و سقوط ولتاژ خواهد شد. در این مواقع سیستم قدرت نیازمند اقدامات اضطراری می‌باشد. با وقوع ناپایداری ولتاژ بلندمدت، اقدامات اضطراری باید در سریع‌ترین زمان ممکن تعیین و اعمال شوند تا سیستم قدرت از سقوط ولتاژ و خاموشی‌های گسترده احتمالی نجات یابد. این اقدامات زمانی مفید هستند که به موقع اعمال گردند. هر چه از زمان بروز اختلال بگذرد حفظ ولتاژ سیستم نیازمند اقدامات بیشتری خواهد بود.

۲-۲- مدل سیستم قدرت در مسئله کنترل اضطراری ولتاژ

ساختار مسئله کنترل اضطراری ولتاژ و مدل سیستم قدرت در این مسئله در [۴] به طور کامل شرح داده شده است. مسئله کنترل اضطراری ولتاژ مجموعه‌ای از معادلات جبری و دیفرانسیلی می‌باشد که به صورت معادلات (۱) و (۲) مدل می شود:

$$\dot{x} = f(x, y, u, t) \qquad (۱)$$

$$0 = g(x, y, u) \qquad (۲)$$

که در آن x بیانگر متغیر حالت، y متغیرهای جبری، u متغیر کنترلی و t زمان می‌باشد. در مسئله کنترل اضطراری ولتاژ با توجه به اینکه بررسی مسئله ناپایداری ولتاژ بلندمدت مدنظر می باشد معادلات شبه حالت ماندگار مولدها جهت بررسی رفتار سیستم کفایت می‌کند. یکی از عوامل ناپایداری ولتاژ بلندمدت، وجود بارهای توان ثابت در سیستم قدرت می‌باشد. این بارها دارای طبیعت دینامیک می‌باشند که هنگام کاهش یا افزایش ولتاژ با تغییر متغیرهای حالت آن، توان اولیه‌شان بازیابی می‌گردد. معادلات دینامیکی بار در [۷] به صورت زیر بیان شده است:

$$T_p \frac{dx_p}{dt} = P_S(V) - x_p P_t(V), \qquad (۳)$$
$$P_d = k\, x_p P_t(V)$$

$$T_q \frac{dx_q}{dt} = Q_S(V) - x_q Q_t(V), \qquad (۴)$$
$$Q_d = k\, x_q Q_t(V)$$

$$P_t(V) = V^{\alpha_t}, P_s(V) = P_0 V^{\alpha_s} \qquad (۵)$$

$$Q_t(V) = V^{\beta_t}, Q_s(V) = Q_0 V^{\beta_s} \qquad (۶)$$

در این روابط، V ولتاژ بار و x_p و x_q متغیرهای حالت پیوسته-ای هستند که با تغییر آن‌ها بازیابی توان حاصل می‌شود. P_s و P_t (Q_s و Q_t) به ترتیب مشخصه‌های حالت ماندگار و گذرای توان اکتیو (راکتیو) بار می‌باشند. P_d و Q_d مشخصه‌های واقعی بار هستند که مقدار توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی بار را در هر لحظه به صورت تابعی از ولتاژ و متغیرهای حالت نشان می‌دهند. در این مشخصه‌ها، ضریب k میزان حذف بار را مدل‌سازی می‌کند. ضرایب T_p و T_q به ترتیب ثابت زمانی‌های بازیابی توان‌های اکتیو و راکتیو بار هستند که بسته به عامل بازیابی، در محدوده چند ده ثانیه تا چند دقیقه تغییر می‌کنند. α_s، α_t، β_s و β_t نیز ثابت‌هایی هستند که میزان وابستگی توان‌های اکتیو و راکتیو بار را در حالت‌های ماندگار و گذرا به ولتاژ نشان می‌دهند. همواره α_t و β_t بزرگ‌تر از α_s و β_s می‌باشند یعنی وابستگی بار به ولتاژ در حالت گذرا بیشتر از حالت ماندگار است. α_s و β_s نزدیک به صفر نشان دهنده بار توان ثابت است. اگر α_t و β_t برابر ۲ باشند، kx_p و kx_q دقیقاً برابر با ادمیتانس بخش‌های اکتیو و راکتیو بار می‌شوند. در غیر این صورت نیز

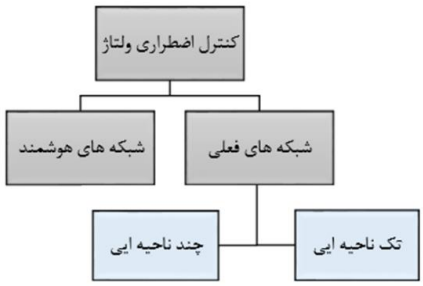
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.5.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی بار در هر ولتاژ مشخص، رابطه مستقیمی با مقادیر x_p و x_q دارند.

در حالت ماندگار مقادیر $P_s(V)$ و $x_pV^{\alpha_t}$ (و همچنین $Q_s(V)$ و $x_qV^{\beta_t}$) با یکدیگر برابر هستند. با وقوع کاهش ولتاژ، به علت بیشتر بودن α_t و β_t نسبت به α_s و β_s، $x_pV^{\alpha_t}$ و $x_qV^{\beta_t}$ کاهش بیشتری نسبت به $P_s(V)$ و $Q_s(V)$ پیدا می‌کند. این موضوع سبب می‌شود که بر طبق رابطه (۲) و (۳)، x_p و x_q افزایش یابند تا توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی بار را مجدداً در حالت ماندگار به مقادیر $kP_s(V)$ و $kQ_s(V)$ برسانند. با توجه به کم‌شدن ولتاژ، مسلماً مقادیر x_p و x_q در حالت ماندگار جدید، بیشتر از مقادیر اولیه آن‌ها خواهند بود.

۳- مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه کنترل اضطراری ولتاژ

مطالعات گذشتگان در زمینه کنترل اضطراری ولتاژ را از دیدگاه‌های متفاوتی می‌توان تقسیم‌بندی کرد. اکثر مقالات، کنترل اضطراری ولتاژ را درسیستم‌های فعلی در نظر گرفته‌اند که خود این مقالات نیز به بررسی موضوع در دو قالب تک ناحیه‌ای و چند ناحیه‌ای پرداخته‌اند. همچنین تعداد بسیار کمی از مقالات، موضوع کنترل اضطراری ولتاژ در شبکه‌های هوشمند را موضوع مورد مطالعه خود قرار داده‌اند. این تقسیم‌بندی در شکل (۱) قابل مشاهده است. در کنترل اضطراری ولتاژ به صورت تک ناحیه‌ای، کل سیستم قدرت را به صورت یک ناحیه متصل به هم در نظر گرفته‌اند و سپس به حل مسئله پرداخته‌اند. از طرفی در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته، نواحی مختلف تمایل کمی برای تبادل داده با یکدیگر دارند بر همین اساس تعدادی از مقالات به بررسی کنترل ولتاژ در این نواحی پرداخته‌اند.



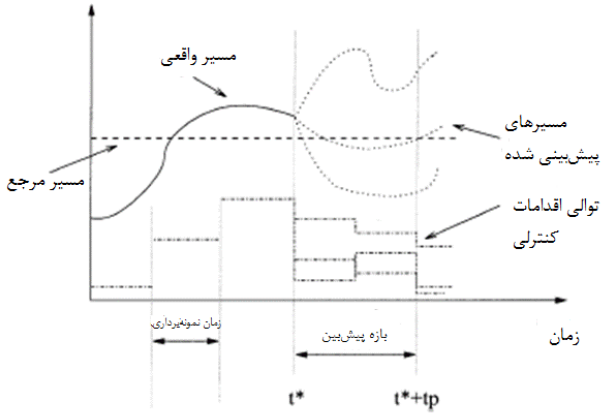
شکل (۱): تقسیم بندی مطالعات گذشتگان در زمینه کنترل اضطراری ولتاژ

تقسیم بندی مطالعات گذشتگان را از دیدگاه دیگری نیز می توان انجام داد که در این مقاله، بررسی موارد ذیل از همین دیدگاه استفاده شده است. در این راستا مطالعات گذشتگان در زمینه کنترل اضطراری ولتاژ به صورت زیر دسته بندی می شود:

۱- کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل (MPC)
۲- کنترل تطبیقی
۳- روش تجزیه

۳-۱- کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل

مقالات [۵، ۶، ۷، ۱۲-۸] از کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل جهت حل مسئله کنترل اضطراری ولتاژ بهره برده‌اند. در تمامی این مقالات شبکه قدرت را به صورت یک ناحیه واحد در نظر گرفته‌اند. عمومی ترین راه مطرح کردن مسائل کنترل فرایند در حوزه زمان استفاده از روش کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل می باشد. بازه کنترلی محدود استفاده شده در این روش که در اکثر مسائل کنترل فرایند صنعتی مطرح می‌شود به راحتی قابل مدیریت می‌باشد. مقاوم بودن روش کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل در مسائل مختلف کنترل فرایند از دیگر ویژگی‌های مثبت این روش است[۱۳]. این روش اساس و پایه بسیاری از مقالات ارائه شده در زمینه کنترل اضطراری ولتاژ می‌باشد. لذا این روش، مزایا و معایب آن به طور کامل بررسی و بیان می‌شود. در کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل، با استفاده از مدل ریاضی سیستم، پاسخ آن به اقدامات مختلف پیش‌بینی می‌شود. این پاسخ در بازه‌ای به نام بازه پیش‌بینی، تعیین می‌گردد. همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، $[t^*, t^*+t_p]$ بازه پیش‌بینی نامیده می‌شود. در این روش، ترکیب‌های مختلف اقدامات کنترلی به عنوان فضای جستجو در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۲) مسیرهای خروجی پیش‌بینی شده برای هر کدام از اعضای فضای جستجو نشان داده شده است. هر کدام از مسیرهایی که به خروجی مرجع نزدیکتر باشد، بهترین مسیر و اقدام مربوط به آن، مناسب ترین اقدام اضطراری خواهد بود. علاوه بر مدت پیش‌بینی، زمان نمونه برداری نیز تعریف می‌گردد که آن فاصله بین دو لحظه ای است که در آن‌ها از وضعیت سیستم نمونه‌برداری می‌شود تا بر اساس آن اقدامات کنترلی جدید محاسبه شوند.



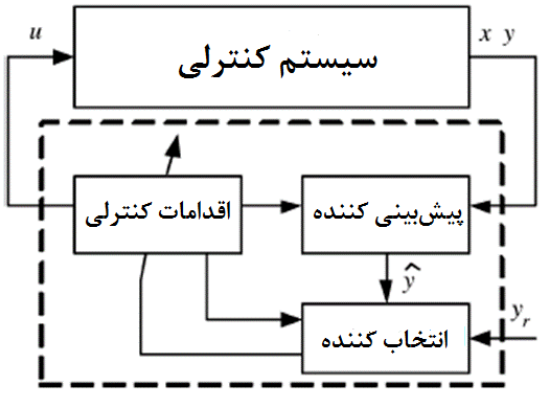
شکل (۲): اساس کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل[۵]

کنترل مبتنی بر پیش‌بینی مدل به طور کلی به سه زیربخش

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.5.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

تقسیم می‌شود. در شکل (۳) این سه زیربخش و نحوه ارتباط آن‌ها نمایش داده شده است.

۱- پیش بینی کننده‌ها
۲- اقدامات کنترلی
۳- انتخاب کننده‌ها



شکل (۳): اجزای مدل کنترل مبتنی بر پیش‌بین [۵]

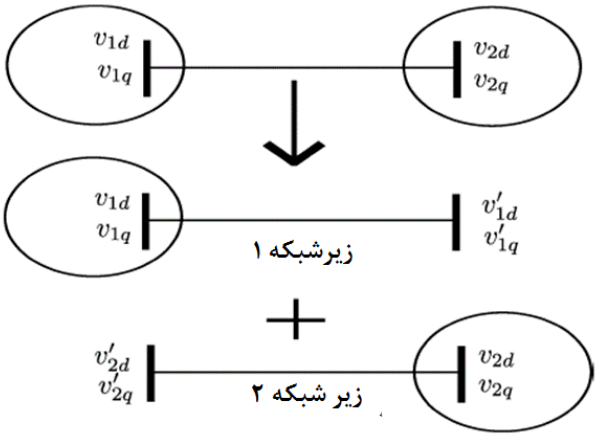
همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود ابتدا از متغیرهای حالت x و خروجی y سیستم نمونه برداری می‌شود. در سیستم قدرت متغیرهای حالت مولد و بارها نمونه‌هایی از متغیرهای حالت و اندازه ولتاژ شین‌ها، خروجی سیستم هستند. با استفاده از مقادیر نمونه برداری شده، برای تمام اعضای مجموعه اقدامات کنترلی، خروجی سیستم $(\hat{y})$ 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 و به عنوان ورودی u به سیستم اعمال می‌شود.

۲-۳- کنترل تطبیقی

منظور از کنترل تطبیقی کنترلری است که بتواند رفتار خود را در پاسخ به تغییرات دینامیکی سیستم در طول فرایند تنظیم کند. همانگونه که پیشتر بیان شد کنترل مبتنی بر مدل پیش‌بین در هنگام وقوع خطا و اغتشاش در شبکه فعال شده و با انجام عمل بهینه‌سازی اقدام کنترلی مناسب را از میان فضای جستجوی ممکن انتخاب می‌کند. به دلیل ماهیت دینامیکی پدیده ناپایداری ولتاژ، زمان اعمال اقدام کنترلی مناسب، امری بسیار مهم و حیاتی می‌باشد. در روش کنترل مبتنی بر مدل پیش‌بین اگر سیستم قدرت بزرگ باشد یا تعداد اقدامات کنترلی سیستم زیاد باشد عمل بهینه‌سازی بسیار زمان‌بر خواهد بود. برای غلبه بر این مشکل مقالات [۱۴, ۱۵]، مطالعه آفلاین شبکه قدرت را پیشنهاد می‌دهند.

۳-۳- روش تجزیه

روش تجزیه در واقع از کنترل مبتنی بر پیش‌بین برای حل مسئله کنترل اضطراری ولتاژ استفاده می‌کند اما به دلیل بزرگ بودن و چند ناحیه‌ای بودن سیستم قدرت و همچنین عدم تمایل به تبادل اطلاعات، حل مسئله بهینه‌سازی معمول در این حالت دشوارتر می‌شود و عمل جستجوی کنترل مبتنی بر پیش‌بین نمی‌تواند به خوبی کل فضای جستجو را کاوش کند. از این رو برای حل مسئله بهینه‌سازی در کنترل اضطراری ولتاژ از روش تجزیه استفاده می‌شود. در این صورت مانند شکل (۴) سیستم قدرت به تعدادی زیرسیستم تقسیم می‌شود. برای هر زیرسیستم کنترل مبتنی بر پیش‌بین با کمک روش تجزیه لاگرانژ به صورت مستقل صورت می‌گیرد[۱۶, ۱۷, ۱۸].



شکل (۴): تجزیه سیستم قدرت به دو زیربخش

در شکل (۴) یک سیستم قدرت به دو زیرسیستم تقسیم می‌شود. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود این دو سیستم در یک خط انتقال و بالطبع پارامترهای مربوط به آن دارای اشتراک می‌باشند. اگر بتوان متغیرهای مشترک موجود در هر زیرمسئله کنترل مبتنی بر پیش‌بین را آزاد کرد آنگاه دو مسئله کنترل مبتنی بر پیش‌بین مجزا خواهیم داشت. این کار با کمک ضرایب لاگرانژ یا متغیرهای دوگانه حاصل می‌شود. مقالات محدودی به بررسی کنترل اضطراری ولتاژ در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای پرداخته‌اند. همه این مقالات نیز روش کنترل مبتنی بر پیش‌بین و تجزیه را برای حل مسئله پیشنهاد کرده‌اند. لذا این مقالات نیز همگی از مشکل روش کنترل مبتنی بر پیش‌بین که همان زمان‌بر بودن می‌باشد برخوردار می‌باشند.

۴- سیستم‌های چند عاملی

سیستم‌های چند عاملی برای سال‌ها در زمینه هوش مصنوعی مورد مطالعه قرار گرفته است. سیستم‌های چند عاملی یک سیستم محاسباتی می‌باشد که در آن تعداد زیادی از عامل‌ها برای رسیدن به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.5.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021

یک هدف خاص با یکدیگر همکاری می‌کنند. مطابق با [۱۹] یک عامل دارای خواص زیر می‌باشد:

۱- یک عامل در یک محیط مشخص عمل می‌کند و کار می‌کند.
۲- عامل‌ها قادر هستند که محیط محلی خود را درک کنند و در این محیط محلی با عامل‌های دیگر همکاری کنند.
۳- عامل‌ها در یک محیط سعی می‌کنند هدف خاصی را تحقق بخشند.
۴- عامل‌ها بر اساس قابلیت‌های یادگیری خود قادرند به تغییرات پاسخ دهند.

تکنولوژی سیستم‌های چند عاملی این فرصت را ایجاد می‌کند تا مسائل مشکل را حل و بهینه کنیم. عامل‌ها با یکدیگر به مانند یک جامعه عمل می‌کنند که هر یک از آن‌ها برای رسیدن به اهداف خاص خود و البته اهداف عمومی با یکدیگر همکاری می‌کنند. این همکاری عامل‌ها در این محیط مشابه افرادی می‌باشند که در نواحی مختلف یا شین‌های متفاوت با یکدیگر همکاری می‌کنند تا ولتاژ همه شین‌ها در زمان وقوع رخداد در شبکه در محدوده مجاز باقی بماند. عموماً هنگامی که از سیستم‌های چند عاملی برای حل یک مسئله استفاده می‌شود چهار عنصر زیر باید تعریف شود[۱۹]:

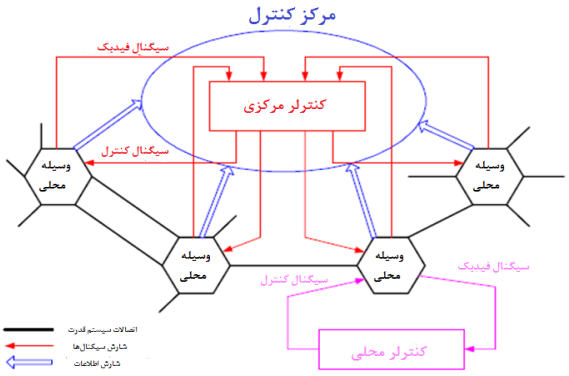
۱- مفهوم و هدف هر عامل در سیستم‌های چند عاملی
۲- محیطی که در آن عامل‌ها زندگی می‌کنند.
۳- مفهوم یک محیط محلی
۴- دسته‌ای از قوانین که روابط بین عامل‌ها، بر اساس آن تعریف می‌شود.

در [۲۰, ۲۱] دلایل و اصول استفاده از سیستم‌های چند عاملی شرح داده شده است. در [۲۶, ۲۵-۲۲] از سیستم‌های چند عاملی برای کنترل ولتاژ در شبکه قدرت استفاده شده است.

دو ساختار کلی جهت کنترل در سیستم‌های قدرت موجود است که عبارتند از:

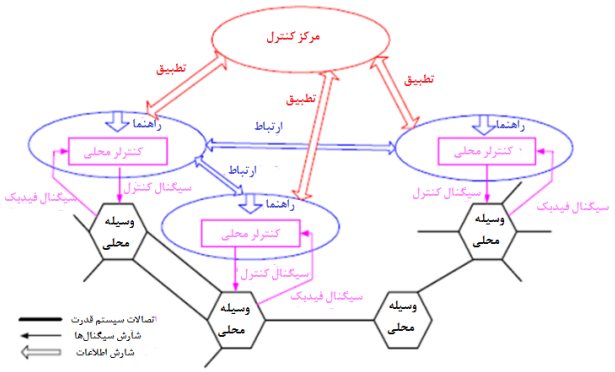
۱- کنترل متمرکز
۲- کنترل غیرمتمرکز

در کنترل متمرکز، سیگنال‌های فیدبک از تمامی تجهیزات محلی به مرکز ارسال می‌شوند و فرامین کنترلی از مرکز به تجهیزات محلی ارسال می‌گردند. بنابراین سیگنال‌های فیدبک و فرامین کنترلی می‌بایست مسیر طولانی را طی کنند که این امر کنترل سریع و آنلاین شبکه را با مشکل مواجه می‌کند. در واقع به دلیل سرعت پایین کنترل متمرکز، از آن در فرایندهای کنترلی کند استفاده می‌شود. با خصوصی شدن شبکه‌های برق در سالیان گذشته و انتظار تغییرات گسترده در بهره‌برداری و مدیریت سیستم‌های قدرت، کنترل سیستم‌های قدرت به سمت کنترل غیرمتمرکز سوق داده شده است. در شکل(۵) شمای کلی دو سیستم کنترلی متمرکز و غیرمتمرکز در سیستم قدرت نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در کنترل غیرمتمرکز، هر وسیله محلی توسط یک کنترل محلی که با رنگ بنفش نمایش داده شده است کنترل می‌گردد. در این حالت فرامین کنترلی ارسالی به هر وسیله محلی با توجه به سیگنال‌های ارسالی از همان وسیله بدست می آید که این وضعیت در سیستم قدرت نمی‌تواند چندان جالب به نظر آید، زیرا در سیستم قدرت وضعیت هر تجهیز محلی بر روی سایر تجهیزات نیز تاثیرگذار است. لذا سیستم کنترلی دیگری در سیستم قدرت ارایه شده است که از آن تحت عنوان هماهنگی چندین کنترل غیرمتمرکز یاد می‌کنند که ساختار آن در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل (۵): شمای کلی کنترل متمرکز و غیرمتمرکز در سیستم قدرت[۲۷]

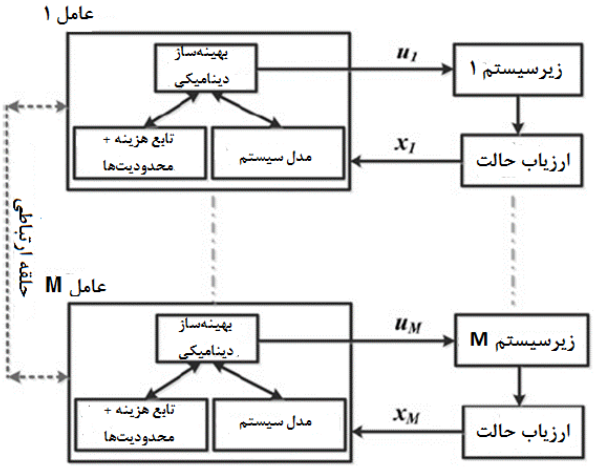
در سیستم کنترلی هماهنگ کنترلرهای غیرمتمرکز، همانگونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود کنترلرهای محلی بعد از اینکه اطلاعات را از تجهیزات محلی خودی دریافت کردند با سایر تجهیزات محلی همسایه به تبادل اطلاعات می‌پردازند و سیگنال کنترلی را به تجهیز ارسال می‌کنند. برای اینکه عملکرد کل سیستم بهینه گردد یک سیستم کنترلی مرکزی ناظر بر عملکرد تمامی کنترل کننده‌های محلی می‌باشد. این کنترل مرکزی با اطلاعاتی که از تمامی کنترل کننده‌های محلی دریافت می‌کند هماهنگی و حالت بهینه کل سیستم را فراهم می‌نماید.



شکل (۶): هماهنگی چندین کنترل غیرمتمرکز[۲۷]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.5.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

در [۲۶] کـه شـکل آن در (۷) نمـایش داده شـده اسـت، از سـاختار عملکرد هماهنگ کنترل‌های غیرمتمرکز استفاده می‌شود. در این مقاله ابتدا یک سیستم قدرت M ناحیه‌ای به M زیرناحیه تقسیم مـی‌شـود. در هر زیرناحیه یک کنترل مبتنی بر پیش‌بین انجام می‌شود تا اقدامات کنترلی بهینه در آن زیرناحیه بدسـت آیـد. امـا از آنجـا کـه دو ناحیـه همسایه از طریق یک یا چند خط انتقال با یکدیگر در ارتباطند بنابراین عامل موجود در ناحیه از طریق خط موجـود بـا همسـایه خـود تبـادل اطلاعات می‌کند تا اقدامات کنترلی بدست آمده در هر یک از دو ناحیه بهینه شود. در نهایت کنترل مرکزی، اقدامات کنترلی بدسـت آمـده از نواحی مختلف را در یک کنترل مبتنی بر پیش‌بـین سراسـری در کـل سیستم قرار می‌دهد تا وضعیت بهینه کل سیستم را بررسی کند.



شکل (۷): مدل استفاده از سیستم های چند عاملی در کنترل اضطراری ولتاژ[۲۶]

۵- نتیجه

امروزه صنعت برق را مـی تـوان یکـی از پایـه‌هـای اصـلی اقتصـادی و صنعتی هر کشوری دانست. نیاز به انرژی الکتریکی با پیشرفت و رشـد فناوری، صنایع و جمعیت به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته اسـت. شبکه‌های برق فعلی از جنبه‌های مختلفـی نیازمنـد بهبـود مـی‌باشـد. بسیاری از مشکلات فعلی شبکه برق را می‌توان با ارتقـاء سیسـتم‌هـای کنترلی و نظارتی دقیق‌تر برطرف نمود تا به فاکتور اصلی رضـایتمندی مشتریان، یعنی جلوگیری از قطع برق رسید. همانگونه که عنـوان شـد ناپایداری ولتاژ از مهمترین مشکلات سیستم‌های قدرت است. به گونه-ای که، دلیل بسیاری از خاموشی‌های سراسری که در اروپا و آمریکا در سالیان گذشته رخ داده‌اند فروپاشی ولتاژ شـبکه مـی‌باشـد. در هنگـام وقوع یک رخداد در سیستم قدرت، اگر سیستم قدرت قـادر بـه حفـظ ولتاژ در نقاط مختلف خود نباشد، پدیـده ناپایـداری ولتـاژ در سیسـتم قدرت رخ داده است. بعد از وقوع ناپایداری ولتاژ، ولتاژ نقاط ناپایدار بـه سرعت افت می‌کند و در صورت عدم اعمال به موقع اقـدامات کنترلـی مناسب، سقوط ولتاژ به سایر نقاط شبکه نیز منتقل می‌گردد. امـا اگـر یک سیستم کنترلی دقیق، هوشمند و سـریع در شـبکه قـدرت وجـود داشته باشد با وقوع اختلال در سیسـتم، مـی‌تـوان بـا انجـام اقـدامات کنترلی مناسب، از وقوع خاموشی سراسری در سیستم جلوگیری کـرد. همچنین با توجه به تغییراتی که در ساختار شبکه‌های قدرت در حـال وقوع است، رضایتمندی مشتریان از مهمترین پارامترهای تصمیم‌گیری در سیستم می‌باشد بنابراین، شناسایی شرایط ناپایدار در شبکه و انجام اقدامات کنترلی مناسب نقش پررنگی در افزایش رضایتمندی مشتریان دارد. لذا باید طرح پیشنهادی در مسـئله کنتـرل اضـطراری ولتـاژ بـه گونه‌ای باشد که تا حد ممکن نیز به این فاکتور توجه گردد. علت وقوع پدیده ناپایداری ولتاژ را می‌توان در افزایش روز افـزون مصـرف انـرژی الکتریکی و استفاده حداکثری از تجهیزات سیستم قـدرت دانسـت. در سیستم‌های خصوصی و تجدید سـاختار یافتـه، بهـره‌بـرداران سیسـتم تلاش می‌کنند تا همواره حداکثر سود را داشته باشند، به همین دلیـل نقطه کار سیستم به مرز شرایط پایـدار انتقـال داده مـی‌شـود. در ایـن وضعیت، با وقوع کوچکترین پیشامدی در سیستم قـدرت، سیسـتم بـه سمت ناپایداری سوق داده می‌شود. سه روش بررسی شده در این مقاله در زمینه کنترل اضطراری ولتاژ، همگی مبتنـی بـر کنتـرل پـیش‌بـین می‌باشند و همانطور که پیشـتر بـه تفصـیل توضـیح داده شـد کنتـرل پیش‌بین به دلیل حل مسئله بهینه‌سازی، یک روش کنترلـی زمـان‌بـر است که اگر سیستم قدرت بزرگ باشد مشکلات این بخش افزایش نیز خواهد یافت. همچنین کنترل پـیش‌بـین یـک روش کنترلـی متمرکـز است که اگر تنها برای یکی از PMUها مشکلی پیش بیاید و اطلاعات آن PMU به سیستم کنترلی مرکزی ارسـال نشـود سیسـتم کنترلـی مختل شده و عملکرد خود را ازدست می دهد، لـذا ایـن روش کـارایی مناسبی به ویژه در سیستم‌های قدرت بزرگ ندارد. با توجه به مشکلات فعلی شبکه‌های قدرت، در سالیان گذشته توجه زیادی بـه شـبکه‌هـای هوشمند شده اما با تمامی این اوصاف، توجه بسـیار کمـی بـه کنتـرل اضطراری ولتاژ در بخش انتقال این شبکه‌ها شده است. پیشـنهاد ایـن مقاله، بررسی مسئله کنترل اضطراری ولتاژ در سیسـتم‌هـای قـدرت و ارائه راهکار برای افـزایش سـرعت تصـمیم‌گیـری و اعمـال متغیرهـای کنترلی جهت حفظ پایداری شبکه می‌باشد. از آنجایی کـه اعمـال هـر اقدام کنترلی به سیستم قدرت هزینه‌ای به همراه دارد لذا بایـد تـلاش شود تا با کمترین اقـدام بازیـابی ولتـاژ انجـام شـود. در ایـن راه، بایـد اقدامات کنترلی نظیر :

۱- ولتاژ مرجع سیستم تحریک مولدها
۲- تغییر سوسپتانس خازن‌ها
۳- تغییر تپ ترانسفورماتورها
۴- حذف بار

در هر زیرسیستم به صورت هوشمند به شبکه وارد شود. لذا پیشنهاد می شود تا ورود اقدامات کنترلی بر مبنای سیستم فازی هوشمند یا تابع حساسیت انجام شود. کسب رضایت مشترکین یکی از مهمترین اهداف بهره‌برداران سیستم قدرت می‌باشد. از طرفی با

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.5.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

خصوصی شدن و تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، این امر بیش از گذشته مورد توجه بهره‌برداران قرار گرفته است. در این راستا باید طرح پیشنهادی به گونه‌ای باشد تا حذف بار به عنوان آخرین راهکار به سیستم اعمال شود و اگر در صورت وقوع اغتشاشی در شبکه، ناچار به حذف بار در شبکه قدرت بودیم اولویت باید با شین هایی باشد که بیشترین تاثیر را در بازیابی ولتاژ دارند که در این مرحله نیز می‌توان از تابع حساسیت استفاده کرد. طرح پیشنهادی می‌بایست با ساختارهای هوشمند و جدید منطبق باشد. همچنین در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای، به دلیل عدم تمایل طرفین برای تبادل داده جهت کنترل شبکه به صورت متمرکز، روش پیشنهادی قابلیت پیاده‌سازی داشته‌باشد.

مراجع

[1] Blackout of 2003: Description and Responses [Online]. Available:http://www.pserc.wisc.edu/.

[2] C. W. Taylor and D. C. Erickson, *"Recording and analyzing the July 2 cascading outage [Western USA power system],"* IEEE Computer Applications in Power, vol. 10, pp. 26-30, 1997.

[۳] کربلایی، **کنترل بهینه و بلادرنگ ولتاژ در سیستم های قدرت،** رساله دکتری، دانشگاه علم وصنعت ایران،۱۳۸۷.

[4] Vu, Thanh Long, et al. "*Structural emergency control paradigm."* IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2017.

[5] Mats Larsson, D.J.H., Gustaff Olsson, *"Emergency Voltage Control Using Search and Predictive Control."* Electrical Power And Energy Systems, Eelsevier, pp. 121-130, 2002.

[6] J. Wen, Q. Wu, D. Turner, S. Cheng, and J. Fitch, *"Optimal coordinated voltage control for power system voltage stability,"* IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, pp. 1115-1122, 2004.

[7] Mats Larsson, D.K., *"Coordinated System Protection Scheme Against Voltage Collapse Using Heuristic Search and Predictive Control"*. IEEE transactions on power systems,vol 18, pp. 1001-1006, 2003.

[۸] خوش اخلاقی, کربلایی, **"کنترل اضطراری ولتاژ با استفاده از کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل در سیستمهای قدرت با مدل واقعی"**، کنفرانس مهندسی برق مجلسی، ۱، ۱-۸، اصفهان، ۱۳۹۱.

[۹] خوش اخلاقی, فرید کربلایی, **"کنترل اضطراری ولتاژ با استفاده از کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل با تابع هدف اصلاح یافته"**, بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق، ۲۰۱۱.

[10] R.R. Negenborn , S.L., B.DeSchutter , J.Hellendoorn, *"Supervisory nonlinear MPC for emergency voltage controlusing patternsearch*". Control Engineering Practice, Elsevier, pp. 841-848, 2009.

[11] E. Pourjafari, H.M., *"Predictive control for voltage collapse avoidance using a modified discrete multi-valued PSO algorithm"*. ISA Transactions, Elsevier, pp. 195-200, 2011.

[12] Mingbo Liu, W.Z., and James A. Momoh, *"A Simultaneous Dynamic Optimization Strategy for Coordinated Voltage Control to Enhance the Voltage Stability of the Electric Power Systems",* in North American Power Symposium. IEEE: Starkville, MS, USA. p. 1 – 6, 2009.

[13] E.F Camacho, C.B., *"Model Predictive Control"*. Second ed. Springer. 422, 2003.

[14] Hill, H.M.a.D.J., *"Adaptive Coordinated Voltage Control—Part I: Basic Scheme"*. IEEE transactions on power systems, vol. 29, pp. 1546-1553, 2014.

[15] Hill, H.M.a.D.J., *"Adaptive Coordinated Voltage Control—Part II: Use of Learning for Rapid Response".* IEEE transactions on power systems, vol. 29, pp. 1554-1561, 2014.

[16] A.G. Beccuti, T.H.D., G. Andersson, M. Morari, *"A Lagrangian Decomposition Algorithm for Optimal Emergency Voltage Control"*. IEEE Transactions On Power Systems, vol. 25, pp. 1769-1779, 2010.

[17] Erlangung, z., *"Relaxation and Decomposition Methods for Mixed Integer Nonlinear Programming".* Humboldt-Universität zu Berlin, 2004.

[18] P. Li, B.H.Z., C.L Cheng, Z.G. Hao, *"A distributed model prediction based method for coordinated voltage control of power system"*, Developments in Power System Protection (DPSP). Managing the Change, 10th IET International Conference on, 2010.

[19] Stephen D. J. McArthur, E.M.D., Victoria M. Catterson,Aris L. Dimeas, Nikos D. Hatziargyriou, Ferdinanda Ponci and Toshihisa Funabashi, *"Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part II: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-agent Systems"*. IEEE Transactions On Power Systems, vol. 22, pp. 1753-1759, 2007.

[20] Stephen D. J. McArthur, E.M.D., Victoria M. Catterson,Aris L. Dimeas, Nikos D. Hatziargyriou, Ferdinanda Ponci and Toshihisa Funabashi, *"Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches and Technical Challenges"*. IEEE Transactions On Power System, vol. 22, pp. 1743-1752, 2007.

[21] Hai Feng Wang, H.L.a.H.C., *"Coordinated Secondary Voltage Control to Eliminate Voltage Violations in Power System Contingencies".* IEEE Transactions On Power Systems, vol. 18, pp. 588-595, 2003.

[22] *W. Du, Z.C., H.F. Wang, R. Dunn, "Feasibility of online collaborative voltage stability control of power systems".* IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 3, Iss. 2, 2009.

[23] H.F, W., The *"third-category method and multiagent system theory in power system applications"*, in Invited penal paper, IEEE General Meeting, IEEE, Editor. San Francisco, USA, 2005.

[24] Mohammad Moradzadeh, R., Lieven Vandevelde, *"Voltage Coordination in Multi-Area Power Systems via Distributed Model Predictive Control".* IEEE Transactions On Power Systems. vol. 28, pp. 513-521, 2013.

[25] Uluski, R.W., *"The Role of Advanced Distribution Automation in the Smart Grid"*. IEEE: Minneapolis. p. 1-5, 2010.

[26] 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, vol. 30, pp. 2591-2603, 2015.

[27] H.F, W., The *"third-category method and multiagent system theory in power system applications"*, in Invited penal paper, IEEE General Meeting, IEEE, Editor. San Francisco, USA, 2005.

رزومه

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.5.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

ماندانا حجتی طباطبایی در بندرعباس متولد شده است (۱۳۶۱). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک در دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرمسار(۱۳۸۷)، کارشناسی-ارشد مهندسی برق- قدرت در دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین (۱۳۹۱) سپری کرده و در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران – جنوب می‌باشد. .فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه انرژی های نو، کیفیت توان و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است.

حسن سیاهکلی در تهران متولد شده است (۱۳۴۹). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق – الکترونیک در دانشگاه تبریز (۱۳۷۲)، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق خود را به ترتیب در دانشگاه امیرکبیر (۱۳۷۶) و صنعتی شریف (۱۳۸۹) سپری کرده است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب می‌باشد. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه-مندی ایشان برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت می‌باشد.

جواد علمایی تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در دانشگاه تبریز (۱۳۶۷)، دانشگاه امیرکبیر (۱۳۷۱) و دانشگاه آزاد اسلامی تهران واحد علوم و تحقیقات (۱۳۷۷) سپری کرده است و در حال حاضر دانشیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب می‌باشد. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه-مندی ایشان سیستم های توزیع برق، سیستم اتوماسیون توزیع، میکرو گرید، انرژی تجدیدپذیر می باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.5.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021

A Review of Voltage Control Methods in Power Systems

Mandana Hojati Tabatabaei[1], Hassan Siahkali[2*], Javad Olamaei[3]

1-Phd student, Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, m.h.tabatabaiee2007@gmail.com
2*-Assistant Professor, Department of Electricity Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, h.siahkali@tedco.co
3- Associate Professor, Department of Electricity Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, j_olamaei@azad.ac.ir

Abstract: Voltage instability is one of the most important issues in power systems. In recent years, with the restructuring of power systems, system operators to operate the system at a point near the border of stable conditions to maximize profits and reduce costs. When an event occurs in the power system, if the power system is not able to maintain voltage in its various parts, the phenomenon of voltage instability in the power system has occurred which can lead to widespread blackouts in the system. In addition to causing great economic losses, these blackouts will also cause customer dissatisfaction with the electricity network. Therefore, identifying the voltage instability in the network, which can be followed by deciding on control measures, will play an important role in increasing the quality and security of the system. In this paper, various methods of voltage stability and control are introduced, studied and reviewed.

Keywords: Emergency Voltage Control, Stability Voltage, Decentralized Control.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.5.0]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021