کاهش نوسانات الکترودینامیکی با استفاده از کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان

پانتهآ عوض‌پور*[۱] ، افشین لشکرآرا[۲]

*۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.
pantea_avazpour@gmail.com
۲-استادیار، گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.
Lashkarara@ieee.org

چکیده:هدف از این تحقیق، ارائه کنترل‌کننده‌ای جدید مبتنی بر روش تابع انرژی لیاپانوف برای کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان می‌باشد. در این مقاله تابع انرژی لیاپانوف با بکارگیری پارامترهای کنترلی محلی، به منظور بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان[۱]، از ادوات FACTS[۲] ترکیبی می‌باشد که از ترکیب کنترل‌کننده یکپارچه توان[۳] و ترانسفورماتور تغییر دهنده فاز[۴]، ساخته شده است. تابع انرژی پیشنهاد شده با استفاده از مدل تزریق توان ادوات کنترل‌کننده سری[۵]، در یک شبکه با حفظ ساختار[۶] بدست آمده است. به منظور مقایسه دو کنترل‌کننده یکپارچه توان و کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان، شبیه‌سازی در نرم افزار MATLAB-simpower همزمان انجام گرفته است. افزایش پایداری گذرا در نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بیانگر قابلیت کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان در مقایسه با کنترل‌کننده یکپارچه توان می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ترانسفورماتور تغییردهنده‌فاز؛ کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان؛تابع انرژی لیاپانوف؛ کنترل‌کننده یکپارچه توان.

۱-مقدمه

سیستم‌های قدرت امروزی با مشکلات زیادی مواجه هستند[۱]. لذا، روش‌ها و ادوات متفاوتی به منظور کاهش اثرات ناشی از خطاها در سیستم قدرت ارائه شده است[۲]. در این راستا، کنترل‌کننده یکپارچه توان به عنوان یکی از ادوات FACTS سری، از پرکاربردترین تجهیزات در سیستم‌های انتقال انرژی الکتریکی می‌باشد. کنترل‌کننده یکپارچه توان بدلیل قابلیت‌های بالایی که در افزایش پایداریگذرا [۳] و پخش‌بار[۴] دارد، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته شده است. نصب ادوات FACTS در محل مناسب، می‌تواند کارآیی کنترل‌کننده‌های سنتی نظیر پایدارساز سیستم قدرت[۷] و تنظیم کننده خودکار ولتاژ[۸] را در کنترل شبکه بهبود بخشیده، ظرفیت خطوط انتقال را افزایش داده[۵]، و سبب حفظ و افزایش حاشیه پایداری شبکه گردد[۶]. از دیگر ادوات FACTS می‌توان به کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان اشاره کرد[۷]. این کنترل‌کننده ترکیبی از کنترل‌کننده یکپارچه توان و ترانسفورماتور تغییر دهنده فاز می‌باشد. در این تحقیق، با توجه به مزیت فنی و اقتصادی کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان در مرحله بهره‌برداری از سیستم قدرت[۷]، این کنترل‌کننده با هدف بهبود پایداری گذرا مورد بررسی قرار می‌گیرد[۸]. به منظور استفاده بیشتر از قابلیت‌های ادوات FACTS، لازم است روش کنترلی مناسبی در کنترل‌کننده اتخاذ گردد. طراحی کنترل‌کننده‌ای با عملکرد مناسب و با کمترین زمانِ پاسخ در برابر انواع خطاهایی که در یک سیستم قدرت می‌تواند رخ دهد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

کنترل‌کننده یکپارچه توان برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ توسط Gyugyi معرفی گردید [۶]. این کنترل‌کننده می‌تواند گذر توان در خطوط انتقال[۹]راتوسط متغیرهای زاویه فاز[۱۰]، ولتاژ[۱۱] و امپدانس خط[۱۲]، به طور همزمان[۱۳] و مستقل کنترل نماید. ترانسفورماتور تغییردهنده فاز از دیگر ادوات FACTS می‌باشد که از دیرباز به منظور توانایی کنترل گذر توان در خطوط انتقال مورد استفاده قرار

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1391.1.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- winter 2012

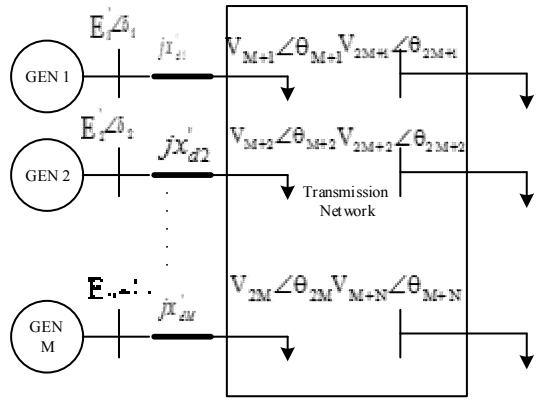
گرفته است. با ترکیب این دو کنترل‌کننده،مدل کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان بدست می‌آید[۷].تاکنون تحقیقاتی از جمله جایابی مناسب کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان مبتنی بر هزینه با در نظر گرفتن مدل تزریق توان[۹]،و همچنین با در نظر گرفتن پیشامد احتمالی در حالت ماندگار بررسی شده است [۱۰]. با توجه به اینکه تاکنون در این زمینه بررسی دینامیکی صورت نپذیرفته است، در این تحقیق بدلیل کارآیی بالای روش مستقیم تابع انرژی مبتنی بر لیاپانوف[۱۴] دربررسی‌های زمان حقیقی[۱۵][۱۱]، به بررسی حالت گذرای کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان پرداخته می‌شود. روش لیاپانوف در مورد انواع مختلف ادوات FACTS، خازن‌های سری [۱۲]، جبرانساز استاتیکی توان راکتیو[۱۶][۱۳]، ادوات کنترل‌کننده سری [۱۱]، کنترل‌کننده یکپارچه توان[۱۴, ۱۵] بکار گرفته می‌شود. روش‌های عددی و معیار سطوح برابر از دیگر روش‌های ارزیابی پایداری گذرا هستند. روش‌های عددی که شامل حل عددی معادلات دیفرانسیل می‌باشند، حجم محاسباتی بیشتری در مقایسه با روش مستقیم لیاپانوف دارند [۱۶]. همچنین، برخلاف روش معیار سطوح برابر، فقط بررسی نقاط تعادل کفایت می‌کند [۱۷]. لذا، می‌توان گفت روش مستقیم لیاپانوف مناسب‌ترین روش ارزیابی زمان - حقیقی پایداری دینامیکی می‌باشد [۱۸]. در این مقاله اثر کنترل‌کننده برای بررسی پایداری گذرا در حضور کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت اطمینان از عملکرد مناسب کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان، نتایج به دست آمده با توجه به اثر کنترل‌کننده با استراتژی پایداری گذرای کنترل‌کننده یکپارچه توان مقایسه می‌گردد.دسته‌بندی بخش‌های این مقاله به عبارت زیر می‌باشد: فصل دوم اصول عملکرد و مدلسازی ادوات FACTS را مطرح می‌نماید، در فصل سوم به ارائه روش مستقیم لیاپانوف و تابع جدیدکنترلی[۱۷] لیاپانوف پرداخته شده، فصل چهارم مدل آزمایشی مورد بررسی قرار گرفته، و در آخر، در فصل پنجم نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲-اصول عملکرد و مدلسازی

به منظور بدست آوردن معادله نوسان سیستم قدرت،مدل‌های ریاضی شامل مدل شبکه، کنترل‌کننده یکپارچه توان و کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان به تفکیک ارائه می‌گردد.مدل شبکه با حفظ ساختار در بخش۲-۱ مورد بررسی قرار گرفته، در بخش ۲-۲ ، ابتدا اصول عملکرد کنترل‌کننده یکپارچه توان و کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان به اختصار آورده شده است.

۲-۱-مدل‌سازی شبکه

یک شبکه ساده شده با حفظ ساختار که شامل چندماشین است، عملکردی تا حدی مشابه سیستم قدرت واقعی دارد.چنین شبکه‌ای برای مدل‌سازی ژنراتورهای سنکرون و بارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادلات حاکم بر سیستم قدرتN+M شینه که دارایMشین ژنراتور می‌باشد،مطابق شکل ۱، بدون درنظرگرفتن تلفات به صورت زیر است:



شکل۱ نمای کلی سیستم چندماشینه

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \qquad (۱)$$

$$M_i\dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{Gi} - D_i\omega_i \qquad i = 1\ldots M \qquad (۲)$$

$$T'_{doi}\dot{E}'_{qi} = \frac{x_{di} - x'_{di}}{x'_{di}} V_{M+i}\cos\left(\delta_i - \theta_{M+i}\right) + E_{fdi} - \frac{x_{di}}{x'_{di}}E'_{qi} \qquad (۳)$$

δ_i و ω_i سرعت زاویه ژنراتور،Miو Di اینرسی و ضریب میرایی ژنراتور،Pmi وPGiتوان مکانیکی والکتریکی ژنراتور،Bkiسوسپتانس شاخهPk،k-iوQkتوان اکتیو و راکتیوشین k وPLkوQLkتوان اکتیو و راکتیومصرفی شین k می‌باشند. x_{di} و x_{qi} راکتانس‌های سنکرون محورهای d وqهستند که برای ماشین iام بدست آمده اند. x'_{di} راکتانس-گذرایمحورdژنراتوراست. $\overline{E'_i} = E'_i\angle\delta_i\ (i = 1\ldots M)$ و E'_{qi} ولتاژ محور q پشت راکتانس‌گذرایiامین‌ماشین می‌باشد. $\overline{V_i} = V_i\angle\theta_i\ (i = M+1\ldots M+N)$ ولتاژ فازوری شین بار با دامنه V_i و زاویه فاز θ_i است. T'_{doi} ثابت زمانی مدار-باز گذرای محور d ماشین iام است. E_{fdi} ولتاژتحریک ژنراتوریام بوده،که می‌تواند ثابت در نظر گرفته شود(تحریک ثابت)، یا اندازه آن با استفاده از AVR تغییر کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1391.1.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- winter 2012

توان اکتیو و توان راکتیو تزریقی به شین‌ها نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$P_{Gi} = \frac{1}{X'_{di}} E'_{qi} V_{M+i} \sin\left(\delta_i - \theta_{M+i}\right) - \frac{x'_{di} - x_{qi}}{2x'_{di} x_{qi}} V^2_{M+i} \sin\left(2\left(\delta_i - \theta_{M+i}\right)\right) \quad (۴)$$

$$Q_{Gi} = \frac{1}{X'_{di}} \left[E'_{qi} V_{M+i} \cos\left(\theta_{M+i} - \delta_i\right) - V^2_{M+i}\right] + \frac{x'_{di} - x_{qi}}{2x'_{di} x_{qi}} V^2_{M+i} \left[\cos\left(2\left(\delta_i - \theta_{M+i}\right) - 1\right)\right] \quad (۵)$$

توان‌های تزریقی به شین kام مطابق زیر است:

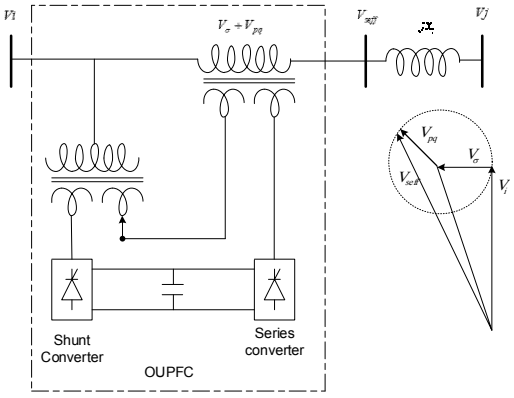
$$P_k = \sum_{i=M+1}^{M+N} B_{ki} V_k V_i \sin\left(\theta_k - \theta_i\right)$$
$$Q_k = -\sum_{i=M+1}^{M+N} B_{ki} V_k V_i \cos\left(\theta_k - \theta_i\right) \quad (۶)$$

از تعادل توان اکتیو و راکتیوشین‌ها، روابط پخش بار به صورت زیر بدست می‌آید:

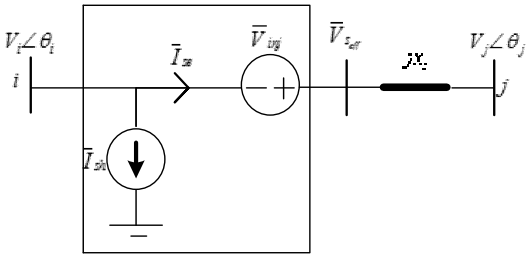
$$P_k + P_{Lk} - P_{Gk} = 0 \quad ; \quad Q_k + Q_{Lk} - Q_{Gk} = 0 \quad (۷)$$

۲-۲-اصول عملکرد و مدل‌سازی UPFC و OUPFC

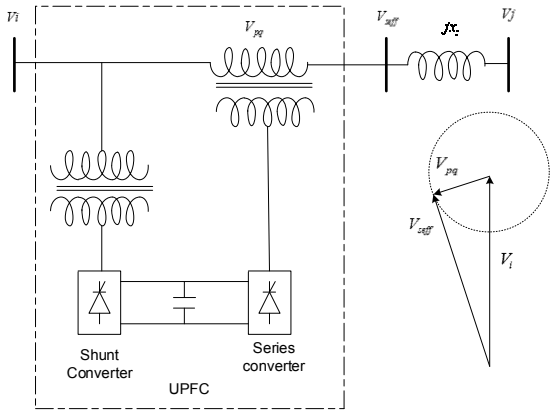
کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان باارتباط یک کنترل‌کننده یکپارچه توان و یک ترانسفورماتور تغییردهنده فاز از طریق دو ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه،مطابق شکل ۲، تشکیل شده است.همانطور که در شکل۲ مشاهده می‌شود، سیم‌پیچ‌های متصل به شاخه موازی و سری‌به‌ترتیب، سیم‌پیچ تحریک و تزریق نامیده می‌شوند[۷].سیم‌پیچ ترانسفورماتورتغییردهنده‌فازبه سیم‌پیچ دوم ثانویه ترانسفورماتورهای تحریک و تزریق متصل شده است و ولتاژی با زاویه‌ی فاز ثابت (با توجه به وضعیت کلیدهای استاتیکی یا مکانیکی)به خط انتقال مورد نظر تزریق می‌کند. زاویه قدرت با توجه به شرایط سیستم و همچنین ولتاژ تزریقی متغیر است.



شکل ۲دیاگرام فازوری و نمای ساده یک **OUPFC**



شکل۳ مدار معادل یک CSD



شکل ۴ دیاگرام فازوری و نمای ساده یک UPFC

همانطور که در شکل ۳ و ۴مشاهده می‌شود، مدل ریاضی تزریق توان کنترل‌کننده یکپارچه توان به عنوان یکی از ادوات FACTS سری،در مطالعات پخش‌بار و پایداری زاویه با در نظر گرفتن رابطه(۸)مطابق زیر می‌باشد:

$$P_{si} = b_s V_i V_j \left(u_{up1} \sin\left(\theta_{ij}\right) + u_{up2} \cos\left(\theta_{ij}\right)\right) \quad (۸)$$

$$P_{sj} = -P_{si} \quad (۹)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1391.1.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- winter 2012

$$Q_{si} = u_{up1} b_s V_i^2 \quad (۱۰)$$

$$Q_{sj} = -b_s V_i V_j \left(u_{up1} \cos(\theta_{ij}) - u_{up2} \sin(\theta_{ij}) \right) \quad (۱۱)$$

که در آن:

$$u_{up1} = r\cos(\gamma) \quad , \quad u_{up2} = r\sin(\gamma) \quad (۱۲)$$

$$r = \sqrt{u_{up1}^2 + u_{up2}^2} \quad , \quad \gamma = \tan^{-1}\left(\frac{u_{up2}}{u_{up1}}\right) \quad (۱۳)$$

به طور مشابه مدل تزریق توان کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان به صورت زیر می‌باشد[۷]:

$$P_{i,OUPFC} = -b_{se} k V_i V_j \sin(\delta+\sigma) - b_{se} r V_i V_j \sin(\delta+\rho) \quad (۱۴)$$

$$\begin{aligned} Q_{i,OUPFC} = & -b_{se} V_i^2 (k^2 + r^2) - 2b_{se} k r V_i^2 \cos(\sigma-\rho) \\ & - 2b_{se} k V_i^2 \cos(\sigma) - 2b_{se} r V_i^2 \cos(\rho) \\ & + b_{se} k V_i V_j \cos(\delta+\sigma) + b_{se} r V_i V_j \cos(\delta+\rho) \end{aligned} \quad (۱۵)$$

$$P_{j,OUPFC} = -P_{i,OUPFC} \quad (۱۶)$$

$$\begin{aligned} Q_{j,OUPFC} = & +b_{se} k V_i V_j \cos(\delta+\sigma) \\ & + b_{se} r V_i V_j \cos(\delta+\rho) \end{aligned} \quad (۱۷)$$

که متغیرهای r، γ و σ پارامترهای کنترلی کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} & u_d = r\cos(\rho), \; u_q = r\sin(\rho) \\ & u_d^2 + u_q^2 = r^2 \end{aligned} \quad (۱۸)$$

$$r = \sqrt{u_{up1}^2 + u_{up2}^2} \quad , \quad \gamma = \tan^{-1}\left(\frac{u_{up2}}{u_{up1}}\right) \quad (۱۹)$$

$$b_{se} = \frac{1}{X_{se}}, \quad \delta = \theta_i - \theta_j, \quad k = \tan\sigma \quad (۲۰)$$

۳-روش مستقیم و توابع کنترلی لیاپانوف

۳-۱-روش مستقیم

روش مستقیم لیاپانوف موسوم به روش تابع انرژی سیستم قدرت به صورت زیر می‌باشد:

$$v(\omega, \delta, E_q', V, \theta) = v_1 + \sum_{k=1}^{8} v_{2k} + C_0 \quad (۲۱)$$

C_0 یک عدد ثابت بوده، و به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که انرژی کل سیستم پایدار، صفر شود. متغیرهای v_1 و v_{2k} به ترتیب انرژی جنبشی و پتانسیل می‌باشند. برای kهای مختلف متغیر پتانسیل v_{2k} به صورت زیر می‌باشد:

$$v_{21} = -\sum_{k=1}^{n} P_{mk} \delta_k \quad (۲۲)$$

$$v_{22} = \sum_{k=M+1}^{n+N} P_{Lk} \theta_k \quad (۲۳)$$

$$v_{23} = \sum_{k=n+1}^{n+N} \int \frac{Q_{Lk}}{V_k} dV_k \quad (۲۴)$$

$$v_{24} = \sum_{k=n+1}^{2n} \frac{1}{2x'_{dk-M}} \left[E'^2_{qk-n} + V_k^2 - 2E'_{qk-n} V_k \cos(\delta_{k-n} - \theta_k) \right] \quad (۲۵)$$

$$v_{25} = -\frac{1}{2} \sum_{k=n+1}^{n+N} \sum_{l=n+1}^{n+N} B_{kl} V_k V_l \cos(\theta_k - \theta_l)] \quad (۲۶)$$

$$v_{26} = \sum_{k-n+1}^{2n} \frac{x'_{dk-n} - x_{qk-n}}{4x'_{dk-n} x_{qk-n}} \left[V_k^2 - V_k^2 \cos(2(\delta_{k-n} - \theta_k)) \right] \quad (۲۷)$$

$$v_{27} = -\sum_{k-1}^{n} \frac{E_{fdk} E'_{qk}}{x_{dk} - x'_{dk}} \quad (۲۸)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1391.1.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- winter 2012

$$v_{28} = \sum_{k=1}^{n} \frac{E'^{2}_{qk}}{2(x_{dk} - x'_{dk})} \quad (۲۹)$$

و در آخر، مشتق زمانی تابع لیاپانوف به شکل زیر می‌باشد:

$$\frac{dv}{dt} = -\sum_{k=1}^{n} D_k (\omega_k)^2 - \sum_{k=1}^{n} \frac{T'_{dok}}{x_{dk} - x'_{dk}} \left(\dot{E}'_{qk}\right)^2 \le 0 \quad (۳۰)$$

در حالت پایدار، انرژی کل که با تماد vنمایش داده شده، صفر می‌باشد، بنابراین منفی‌تر بودن $\dot{v}$ به این معنی است که سیستم به حالت پایدار بر می‌گردد، یا به عبارت دیگر، نوسانات موج اول سریع‌تر میرا می‌شود.

۳-۲-توابع کنترلی لیاپانوف

در این بخش، توابع کنترلی لیاپانوف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. براساس روابط(۱۴)تا (۱۷) و رابطه(۳۰)، که در بخش ۳-۱ارائه شده، تابع کنترلی کنترل‌کننده یکپارچه توان بصورت ذیل می‌باشد[۱۱]:

$$\dot{v}_{CSD} = -b_s V_i [u_{up1} \frac{d}{dt}\left(V_i - V_j cos\ \theta_{ij}\right) + u_{up2} \frac{d}{dt}\left(V_j sin\theta_{ij}\right)] \quad (۳۱)$$

در این مقاله، هدف یافتن روابط حاکم بر تابع کنترلی کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان می‌باشد. لذا، براساس روابط(۱۴)تا (۱۷) و رابطه(۳۰)، تابع کنترلی این کنترل‌کننده بصورت ذیل می‌باشد [۷, ۱۱]:

$$\begin{aligned} \dot{v}_{CSD} = & -b_s V_i [u_{up1}\left(\dot{V}_i + V_j \sin\left(\theta_{ij}\right)\dot{\theta}_{ij} - \dot{V}_j \cos\left(\theta_{ij}\right)\right) \\ & + u_{up2}\left(\dot{V}_j \cos\left(\theta_{ij}\right)\dot{\theta}_{ij} + \dot{V}_j \sin\left(\theta_{ij}\right)\right)] \\ & - b_s V_i \left[u_{up1} \frac{d}{dt}\left(V_i - V_j \cos\left(\theta_{ij}\right)\right) + u_{up2} \frac{d}{dt}\left(V_j \sin\left(\theta_{ij}\right)\right)\right] \end{aligned} \quad (۳۲)$$

برای منفی بودن تابع کنترلِ کنترل‌کننده یکپارچه توان، اصول کنترل[۱۸] به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} u_{up1} = k_1 \frac{d}{dt}\left(V_i - V_j \cos\left(\theta_{ij}\right)\right) \\ u_{up2} = k_2 \frac{d}{dt}\left(V_j \sin\left(\theta_{ij}\right)\right) \end{cases} \quad (۳۳)$$

اصول کنترلی کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان با در نظر داشتن $\sigma \ge 0$ مطابق حالت‌های زیر خواهد بود.

حالت اول:

$$\frac{d}{dt}\left(V_i V_j \sin\delta\right) \ge \frac{\cos\sigma}{\sin\sigma} \frac{d}{dt}\left(V_i V_j \cos\delta\right) \quad (۳۴)$$

۱) چنانچه $\frac{d}{dt}(V_i V_j \cos\delta) \le 0$ و رابطه(۳۴)برقرار باشد، و $\frac{d}{dt}(V_i^2) \ge 0$ ، آنگاه u_dمثبت بوده، برابر است با:

$$u_d = -K_1 \frac{d}{dt}(V_i V_j \cos\delta) + K_2 \frac{d}{dt}(V_i^2) \quad (۳۵)$$

۲) چنانچه $\frac{d}{dt}(V_i V_j \sin\delta) \le 0$و(۳۴) برقرار باشد، و $\frac{d}{dt}(V_i^2) \ge 0$ ، آنگاه u_q منفی بوده، برابر است با:

$$u_q = -2k\sin\sigma \quad (۳۶)$$

۳) چنانچه $\frac{d}{dt}(V_i V_j \sin\delta) \le 0$ و (۳۴) برقرار باشد، و $\frac{d}{dt}(V_i^2) \ge 0$ ، آنگاه u_q منفی بوده، برابر است با:

$$\begin{cases} u_d = K_3 \frac{d}{dt}\left(V_i V_j \sin\delta\right) + K_4 \frac{d}{dt}\left(V_i^2\right) \\ u_q \le -2K\sin\sigma \end{cases} \quad (۳۷)$$

۴) چنانچه $\frac{d}{dt}(V_i V_j \sin\delta) > 0$ و (۳۴) برقرار باشد، و $\frac{d}{dt}(V_i^2) \le 0$ ، آنگاه u_q منفی بوده، برابر است با:

$$\begin{cases} u_d = -K_5 \frac{d}{dt}\left(V_i V_j \cos\delta\right) + K_6 \frac{d}{dt}\left(V_i^2\right) \\ u_q \le -2K\sin\sigma \end{cases} \quad (۳۸)$$

ضرایب k_1 تا k_2 اعدادی مثبت هستند، که به طور جداگانه برای تعیین معادله انرژی مناسب انتخاب می‌شوند.

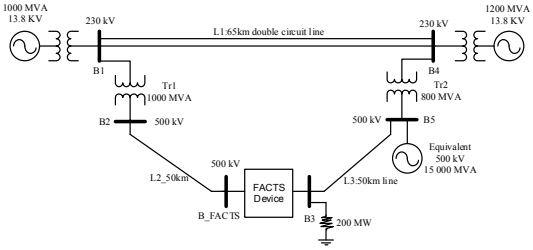
اکنون اصول کنترلی بدست آمده می‌بایست مورد ارزیابی قرار گیرند.

۴-شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی و بررسی پایداری گذرا در حضور کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان، سیستم قدرت۵۰۰/۲۳۰kVنشان داده شده در

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1391.1.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- winter 2012

شکل ۵در محیط نرم‌افزارMATLAB-simpowerمورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. شبکه حلقوی پنج شینه از طریق سه خط انتقال و دو ترانسفورماتور ۵۰۰/۲۳۰kVبه هم اتصال یافته‌اند. دو ژنراتور۲۳۰ کیلو-ولتی با مجموع تولید ۲۲۰۰ مگا-وات در یک شبکه حلقوی از طریق خط انتقال ۲۳۰kVدر ارتباط مستقیم هستند. این دو ژنراتور از طریق خطوط انتقال، دو ترانسفورماتور ۵۰۰/۲۳۰ کیلو-ولت ۱۰۰۰و۸۰۰ مگا-ولت آمپر و بااتصال به شبکه الکتریکی که به صورت معادل تونن در باس ۵ مشخص شده است، بار ۲۰۰ مگا-واتی متصل شده به باس ۳ رامطابق شکل ۵ تغذیه می‌نمایند.به منظور بررسی پایداری گذرا، ادوات FACTSکنترل کننده یکپارچه توان و کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان به صورت جداگانه در محلی بین شین ۲ و ۳ نصب می‌گردد.K_1=۰/۷، K_2=۰/۵و $\sigma = \pi / 7$درنظر گرفته شده است. خطا در محلی نزدیک به شین ۱ در ثانیه ۰/۱ رخ می‌دهد و در ثانیه ۰/۳ بدون هیچگونه تغییری در شبکه رفع می‌گردد. لازم به ذکر است، ادوات کنترلی مانند PSS در شبکه وجود ندارند.اطلاعات سیستم قدرت مورد استفاده درجدول های ۱، ۲ و ۳ارائه شده است.



شکل ۵ سیستم سه-شینه مورد مطالعه

شکل‌های ۶، ۷و ۸: زاویه روتور، توان اکتیو ژنراتور ۱، و گراف‌های انرژی نسبت به زمان در سه حالت بدون CSD، با حضور کنترل‌کننده یکپارچه توان و با حضور کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان بررسی گردیده، نمودارهای مربوطه رسم و بررسی شده‌اند.

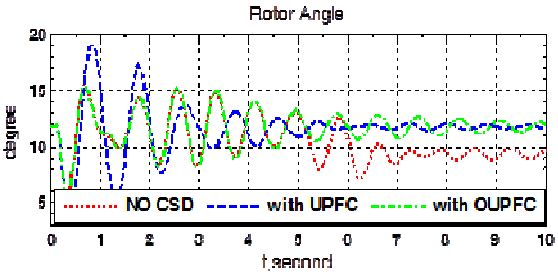
برای ارزیابی روش کنترلی پیشنهادی در پایداری گذرا، شبیه‌سازی برای سه حالت مختلف انجام می‌شود:

حالت اول:وضعیت سیستم بدون ادوات FACTS سری می‌باشد؛

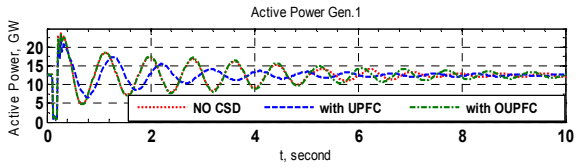
حالت دوم:وضعیت سیستم را با در نظر گرفتن کنترل‌کننده یکپارچه توان نشان می‌دهد؛

حالت سوم:نشان دهنده شرایط سیستم با در نظر گرفتن کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان می‌باشد.

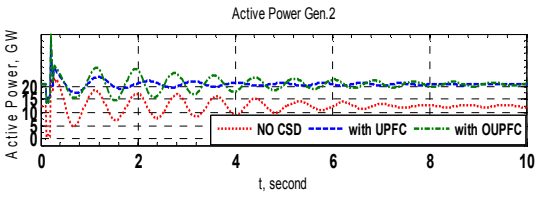
شکل های ۶ و ۷ تغییرات زاویه روتور و تغییرات توان اکتیو ژنراتور ۱ را نسبت به زمان در سه حالت مختلف نشان می‌دهد. شکل ۸ تغییرات توان اکتیو ژنراتور دو را نسبت به زمان در سه حالت مختلف نشان می‌دهد. شکل ۹ تابع انرژی سیستم را در حالت‌های دوم و سوم بیان می‌کند.



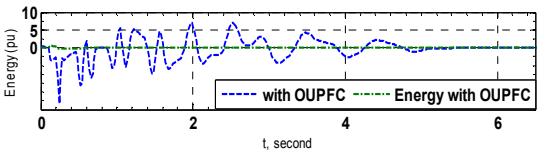
شکل ۶ تغییرات زاویه روتور نسبی ژنراتورشماره یک نسبت به زمان



شکل ۷ تغییرات توان اکتیو ژنراتور شماره یک نسبت به زمان



شکل ۸ تغییرات توان اکتیو ژنراتور شماره دو نسبت به زمان



شکل ۹ تغییرات انرژی سیستم نسبت به زمان

نوسانات کمتر $v(x)$در شکل ۹به معنی آن است که انرژی سریعتر به کمترین مقدار آن $(v(x)=0)$می‌رسد و مسیرهای[۱۹] سیستم به نقطه تعادل پایدار بعد از خطا میل می‌نماید، لذا دامنه نوسانات زاویه روتور در شکل۶در حضور کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان نسبت به دامنه نوسانات زاویه روتور در حضور کنترل‌کننده یکپارچه توان کاهش یافته است. همانطور که در شکل ۶دیده می‌شود، در روش پیشنهاد شده در سیکل اول بعد از رخ دادن خطا، حدود ۲۵٪ میزان جهش[۲۰] کاهش می‌یابد.

شکل ۶و ۹ تغییرات زاویه روتور و تابع انرژی بعد از خطا را نشان می‌دهد. سیستم کنترل‌نشده، برای خطای مفروض پایدار است، اما بخوبی میرا نشده است. با استفاده از کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان، میرایی سیستم در برابر نوسانات الکترودینامیکی حاصل از خطا افزایش می‌یابد.همچنین توان خروجی دو ژنراتور درشکل ۷ و ۸ در سه حالت بیانگر افزایش میزان توان خروجی همراه با کاهش دامنه نوسانات می‌باشد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1391.1.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- winter 2012
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

۵-نتیجه‌گیری

در این تحقیق کنترل‌کننده‌ی یکپارچه بهینه توان، با ترکیب کنترل‌کننده یکپارچه توان و ترانسفورماتور تغییر دهنده فاز مبتنی بر روش تابع انرژی لیاپانوف برای کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان به کار برده شده است. در این مقاله تابع انرژی پیشنهاد شده مبتنی بر لیاپانوف با بکارگیری پارامترهای کنترلی محلی، به منظور بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت مورد ارزیابی قرار گرفته است. تابع انرژی پیشنهادی با استفاده از مدل تزریق توان ادوات کنترل‌کننده سری، در یک شبکه با حفظ ساختار بدست آمده است. به منظور مقایسه دو تجهیزِکنترل‌کننده یکپارچه توان و کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان، شبیه‌سازی در نرم افزار MATLAB-simpower همزمان انجام می‌گیرد. افزایش پایداری گذرا در نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بیان‌گر قابلیت کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان نسبت به‌کنترل‌کننده‌یکپارچه‌توان‌می‌باشد. استفاده از کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان در محل مناسب، علاوه بر مزایای استفاده از کنترل‌کننده یکپارچه توان، سبب منفی‌تر شدن مشتق زمانی تابع لیاپانوف و پایداری بیشتر در برخورد با نوسانات الکترومکانیکی گردید.

مراجع

[1] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, *et al.*, "*Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions*," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 19, pp.۱۳۸۷-۱۴۰۱ ,۲۰۰۴ .

[2] U. Annakkage, N.-K. C. Nair, Y. Liang, A. Gole, V. Dinavahi, B. Gustavsen, *et al.*, "*Dynamic system equivalents: A survey of available techniques*," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 27, pp. 411-420, 2012.

[3] R. Mihalic, P .Zunko, and D. Povh, "*Improvement of transient stability using unified power flow controller*," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 11, pp. 485-492, 1996.

[4] M. Noroozian and G. Andersson, "*Power flow control by use of controllable series components* ", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 8, pp. 1420-1429, 1993.

[5] L. Gyugyi, C. Schauder, S. Williams, T. Rietman, D. Torgerson, and A. Edris, "*The unified power flow controller: a new approach to power transmission control*," Power Delivery, IEEETransactions on, vol. 10, pp. 1085-1097, 1995.

[6] L. Gyugyi, "*Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems*," in IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), 1992, pp. 323-331.

[7] A. Lashkar Ara, A. Kazemi, and S. Nabavi Niaki, "*Modelling of Optimal Unified Power Flow Controller (OUPFC) for optimal steady-state performance of power systems*," Energy conversion and Management, vol. 52, pp. 1325-1333, 2011.

[8] P. Avazpour and A. Lashkarara, "*Power Oscillation Damping with Optimal Unified Power Flow Controller (OUPFC) Devices, Msc Thesis*," 2013.

[9] A. Lashkar Ara, A. Kazemi, and M. Behshad, "Improving power systems operation through multiobjective optimal location of optimal unified power flow controller", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 21, pp. 1893-1908, 2013.

[10] A. Lashkar Ara, J. Aghaei, M. Alaleh, and H. Barati, "*Contingency-based optimal placement of Optimal Unified Power Flow Controller (OUPFC) in electrical energy transmission systems*," Scientia Iranica, 2013.

[11] M. Ghandhari, G. Andersson, and I. A. Hiskens, "*Control Lyapunov functions for controllable series devices*," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 16, pp. 689-694, 2001.

[12] M. Ghandhari, G. Andersson, M. Pavella, and D. Ernst, "*A control strategy for controllable series capacitor in electric power systems*," Automatica, vol. 37, pp. 1575-1583, 2001.

[13] M. Ghandhari, "*Application of control Lyapunov functions to static var compensator*," in Control Applications. Proceedings of the 2002 International Conference on, pp. 1-6.

[14] A. M. Shotorbani, A. Ajami, M. P. Aghababa, and S. H. Hosseini, "*Direct Lyapunov theory-based method for power oscillation damping by robust finite-time control of unified power flowcontroller*," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 7, pp. 691-699, 2013.

[15] V. Azbe and R. Mihalic, "*Application of the direct Lyapunov method for optimum control of a UPFC*," in IEEE Russia, Power Tech, 2005, pp. 1-6.

[16] H. Al Marhoon, I .Leevongwat, and P. Rastgoufard, "*A practical method for power systems transient stability and security analysis*," in Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES, 2012, pp. 1-6.

[17] R. G. G. Raju and N. Subramaniam, "*Transient stability analysis employing Equal Area Criterion*," in 1st International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), 2011, pp. 275-280.

[18] H.-D. Chiang, *Direct Methods for Stability Analysis of Electric PowerSystems: Theoretical Foundation , BCU Methodologies, and Applications*: Wiley. com, 2011.

رزومه

پانته آ عوض پور در آبادان متولد شده است (۱۳۵۸).تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه شهید چمران اهواز (۱۳۸۲)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۹۱) اخذ کرده است.فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، مباحث پایداری گذرا و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1391.1.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- winter 2012
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]



افشین لشکرآرا در سال (۱۳۵۲)درتهران متولد شد. مدارک کارشناسی،کارشناسی ارشد و دکترای خود را در سالهای (۱۳۷۴)، (۱۳۸۰) و (۱۳۸۹) بترتیب از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دانشگاه مازندران و دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته مهندسی برق- قدرت اخذ نموده است. ایشان هم اکنون عضو انجمن مهندسی برق و الکترونیک امریکا(IEEE) و از سال (۱۳۸۰) تاکنون عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می‌باشند. زمینه تحقیقاتی ایشان مطالعات استاتیکی و دینامیکی سیستم‌های قدرت، پایداری و کنترل و ادوات FACTS می‌باشد.

ضمایم

جدول ۱ اطلاعات خطوط انتقال سیستم مورد مطالعه:

طول خط (km)	L_1(p.u.)*10^{-3}	C_1(p.u.)*10^{-9}	R_1(p.u.)	L_0(p.u.)*10^{-3}	C_0(p.u.)*10^{-9}	R_0(p.u.)	شین مقصد	شین مبدا
۶۵	۱/۳۱	۸/۸۵	۰/۰۶۸	۴/۰۲	۶/۲۱	۰/۲۸۴	۴	۱
۵۰	۰/۹۳۳۷	۱۲/۷۴	۰/۰۲۵۴۶	۴/۱۲۶۴	۷/۷۵۱	۰/۳۸۶۴	۳	۲
۵۰	۰/۹۳۳۷	۱۲/۷۴	۰/۰۲۵۴۶	۴/۱۲۶۴	۷/۷۵۱	۰/۳۸۶۴	۵	۳

جدول ۲ اطلاعات مربوط به مقاومت و راکتانس ژنراتورها

R_S (p.u.)*10^{-3}	X''_q(p.u.	X'_q(p.u.)	X_q(p.u.)	X''_d(p.u.)	X'_d(p.u.)	X_d(p.u.)	ژنراتور
۲/۸۵۴۴	۰/۱۸	۰/۲۴۳	۰/۴۷۴	۰/۲۵۲	۰/۲۹۶	۱/۳۰۵	۱
۲/۸۵۴۴	۰/۱۸	۰/۲۴۳	۰/۴۷۴	۰/۲۵۲	۰/۲۹۶	۱/۳۰۵	۲

جدول ۳ اطلاعات مربوط به ژنراتورها

T''_{q0} (sec)	T''_d(sec)	T'_d(sec)	P	H(sec)	فرکانس (Hz)	ولتاژ (Volt)	ظرفیت تولیدی (MVA)	ژنراتور
۰/۱	۰/۰۵۳	۱/۰۱	۳۲	۳/۷	۶۰	۱۳۸۰۰	۱	۱
۰/۱	۰/۰۵۳	۱/۰۱	۳۲	۳/۷	۶۰	۱۳۸۰۰	۱/۲	۲

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1391.1.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- winter 2012

زیرنویس ها

[1]Optimal Unified Power Flow Controllers (OUPFCs)
[2]Flexible AC Transmission Systems (FACTS)
[3]Unified Power Flow Controllers (UPFCs)
[4]Phase Shift Transformers (PSTs)
[5]Controllable Series Devices (CSDs)
[6] Structure Preserving Model (SPM)
[7]Power System Stabilizer (PSS)
[8]Automatic Voltage Regulator (AVR)
[9]Transmission Line Power Flow
[10] Phase Angle
[11]Voltage
[12]Line Impedance
[13]Simultaneously Control
[14]Direct Methods
[15]Real-Time
[16]Static VAr Compensator
[17]Control Lyapunov Function (CLF)
[18]Control Law
[19]Trajectories
[20]Overshoot

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1391.1.3.6.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 1-No. 3- winter 2012