

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

واژه‌های کلیدی: ترانسفورماتور تغییردهنده فاز؛ کنترل کننده یکپارچه بهینه توان؛ تابع انرژی لیاپانوف؛ کنترل کننده یکپارچه توان.

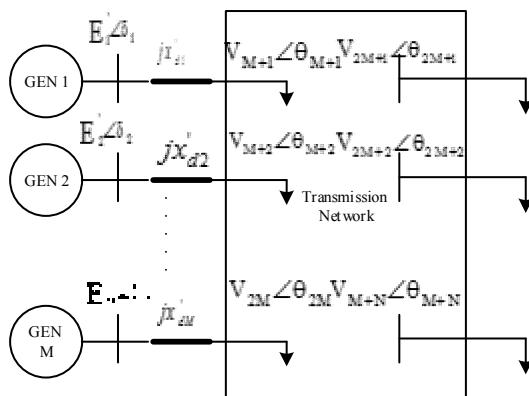
کرد[۷]. این کنترل کننده ترکیبی از کنترل کننده یکپارچه توان و ترانسفورماتور تغییر دهنده فاز می‌باشد. در این تحقیق، با توجه به مزیت فنی و اقتصادی کنترل کننده یکپارچه بهینه توان در مرحله بهره‌برداری از سیستم قدرت[۷]، این کنترل کننده با هدف بهبود پایداری گذرا مورد بررسی قرار می‌گیرد[۸]. به منظور استفاده بیشتر از قابلیت‌های ادوات FACTS، لازم است روش کنترل مناسبی در کنترل کننده اتخاذ گردد. طراحی کنترل کننده‌ای با عملکرد مناسب و با کمترین زمان پاسخ در برابر انواع خطاها که در یک سیستم قدرت می‌تواند رخداد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

کنترل کننده یکپارچه توان برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ توسط Gyugyi معرفی گردید [۶]. این کنترل کننده می‌تواند گذر توان در خطوط انتقال راً توسط متغیرهای زاویه فاز^۷، ولتاژ^۸ و امپدانس خط^۹، به طور همزمان^{۱۰} 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

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت امروزی با مشکلات زیادی مواجه هستند[۱]. لذا، روش‌ها و ادوات متفاوتی به منظور کاهش اثرات ناشی از خطاهای در سیستم قدرت ارائه شده است[۲]. در این راستا، کنترل کننده یکپارچه توان به عنوان یکی از ادوات FACTS سری، از پرکاربردترین تجهیزات در سیستم‌های انتقال انرژی الکتریکی می‌باشد. کنترل کننده یکپارچه توان بدلیل قابلیت‌های بالایی که در افزایش پایداری گذرا[۳] و پخش بار[۴] دارد، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته شده است. نصب ادوات FACTS در محل مناسب، می‌تواند کارآبی کنترل کننده‌های سنتی نظریه پایدارساز سیستم قدرت^۷ و تنظیم کننده خودکار ولتاژ^۸ را در کنترل شبکه بهبود بخشدیده، ظرفیت خطوط انتقال را افزایش داده[۵]، و سبب حفظ و افزایش حاشیه پایداری شبکه گردد[۶]. از دیگر ادوات FACTS می‌توان به کنترل کننده یکپارچه بهینه توان اشاره

برای مدل سازی ژنراتورهای سنکرون و بارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادلات حاکم بر سیستم قدرت $N+M$ شینه که دارای M شین ژنراتور می‌باشد، مطابق شکل ۱، بدون درنظر گرفتن تلفات به صورت زیر است:



شکل ۱ نمای کلی سیستم چندماشینه

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (1)$$

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{Gi} - D_i \omega_i \quad i = 1 \dots M \quad (2)$$

$$T'_{doi} \dot{E}'_{qi} = \frac{X_{di} - X'}{X_{di}} V_{M+i} \cos(\delta_i - \theta_{M+i}) + E_{fdi} - \frac{X_{di}}{X_{di}} E'_{qi} \quad (3)$$

ω_i و δ_i سرعت زاویه ژنراتور، D_i و M_i اینترسی و ضریب میرایی ژنراتور، P_{Gi} و P_{mi} توان مکانیکی والکتریکی ژنراتور، B_{ki} و P_{ki} توان اکتیو و Q_{ki} و P_{ki} توان اکتیو و راکتیو مصرفی شین k می‌باشد. E'_{qi} و X'_{di} راکتانس‌های سنکرون محورهای d و q هستند که برای ماشین آم بدست آمده اند. E'_{fdi} راکتانس- گذراهای محور ژنراتور است. ($i = 1 \dots M$) و E'_{qi} و X'_{di} ولتاژ محور q پشت راکتانس گذراهای آمین ماشین می‌باشد. ($i = M + 1 \dots M + N$) ولتاژ فازوری شین بار با دامنه V_i و زاویه فاز θ_i است. T'_{doi} ثابت زمانی مدار باز گذراهای محور d ماشین آم است. E_{fdi} ولتاژ تحریک ژنراتور آم بوده، که می‌تواند ثابت در نظر گرفته شود (تحریک ثابت)، یا اندازه آن با استفاده از AVR تغییر کند.

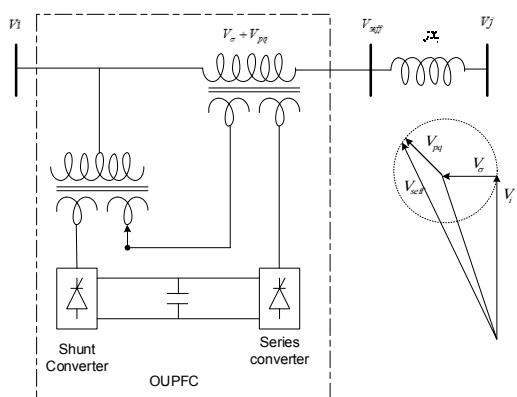
گرفته است. با ترکیب این دو کنترل کننده، مدل کنترل کننده یکپارچه بهینه توان بدست می‌آید [۷]. تاکنون تحقیقاتی از جمله جایابی مناسب کنترل کننده یکپارچه بهینه توان مبتنی بر هزینه با در نظر گرفتن مدل توزیع توان [۸]، همچنین با در نظر گرفتن پیشامد احتمالی در حالت ماندگار بررسی شده است [۱۰]. با توجه به اینکه تاکنون در این زمینه بررسی دینامیکی صورت نپذیرفته است، در این تحقیق بدليل کارآیی بالای روش مستقیمتابع انرژی مبتنی بر لیاپانوف^۴ در بررسی‌های زمان حقیقی^{۱۵} [۱۱]، به بررسی حالت گذراهای کنترل کننده یکپارچه بهینه توان پرداخته می‌شود. روش لیاپانوف در مورد انواع مختلف ادوات FACTS، خازن‌های سری [۱۲]، جبرانساز استاتیکی توان راکتیو^{۱۳} [۱۳]، ادوات کنترل کننده سری [۱۱]، کنترل کننده یکپارچه توان [۱۴] 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 کفايت می‌کند [۱۷]. لذا، می‌توان گفت روش مستقیم لیاپانوف مناسب‌ترین روش ارزیابی زمان - حقیقی پایداری دینامیکی می‌باشد [۱۸]. در این مقاله اثر کنترل کننده برای بررسی پایداری گذرا در حضور کنترل کننده یکپارچه بهینه توان مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت اطمینان از عملکرد مناسب کنترل کننده یکپارچه بهینه توان، نتایج به دست آمده با توجه به اثر کنترل کننده با استراتژی پایداری گذراهای کنترل کننده یکپارچه توان مقایسه می‌گردد. دسته‌بندی بخش‌های این مقاله به عبارت زیر می‌باشد: فصل دوم اصول عملکرد و مدل سازی ادوات FACTS را مطرح می‌نماید، در فصل سوم به ارائه روش مستقیم لیاپانوف و تابع جدید کنترل^{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 مدل سازی

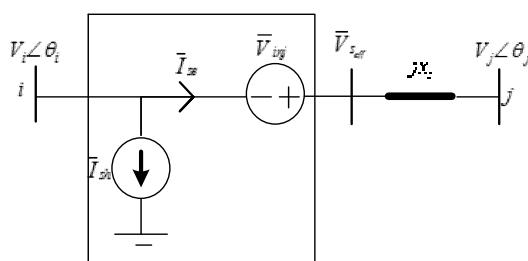
به منظور بدست آوردن معادله نوسان سیستم قدرت، مدل‌های ریاضی شامل مدل شبکه، کنترل کننده یکپارچه توان و کنترل کننده یکپارچه بهینه توان به تفکیک ارائه می‌گردد. مدل شبکه با حفظ ساختار در بخش ۱-۱ مورد بررسی قرار گرفته، در بخش ۲-۲، ابتدا اصول عملکرد کنترل کننده یکپارچه توان و کنترل کننده یکپارچه بهینه توان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

۲-۱- مدل سازی شبکه

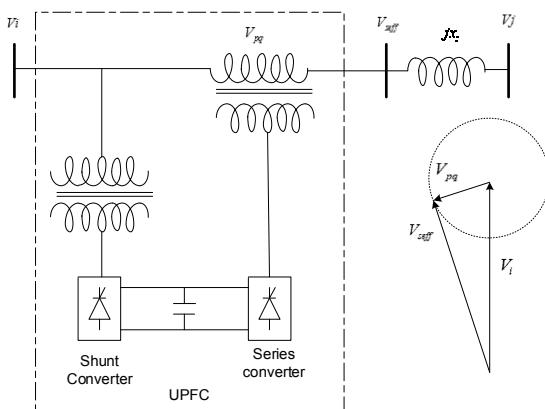
یک شبکه ساده شده با حفظ ساختار که شامل چندماشین است، عملکردی تا حدی مشابه سیستم قدرت واقعی دارد. چنین شبکه‌ای



شکل ۲ دیاگرام فازوری و نمای ساده یک OUPFC



شکل ۳ مدار معادل یک CSD



شکل ۴ دیاگرام فازوری و نمای ساده یک UPFC

همانطور که در شکل ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، مدل ریاضی تزریق توان کنترل کننده یکپارچه توان بالاتر از یک کنترل کننده یکپارچه سه سیم پیچه، مطابق شکل ۲، تشکیل شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سیم پیچ‌های متصل به شاخه موازی و سری به ترتیب، سیم پیچ تحریک و تزریق نامیده می‌شوند [۷]. سیم پیچ ترانسفورماتور تغییر دهنده فاز به سیم پیچ دوم ثانویه ترانسفورماتورهای تحریک و تزریق متصل شده است و ولتاژی با زاویه‌ی فاز ثابت (با رابطه (۸)) مطابق زیر می‌باشد:

$$P_{si} = b_s V_i V_j \left(u_{up1} \sin(\theta_{ij}) + u_{up2} \cos(\theta_{ij}) \right) \quad (8)$$

$$P_{sj} = -P_{si} \quad (9)$$

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

$$P_{Gi} = \frac{1}{X_{di}} E'_{qi} V_{M+i} \sin(\delta_i - \theta_{M+i}) - \frac{x_{di} - x_{qi}}{2x_{di} x_{qi}} V_{M+i}^2 \sin(2(\delta_i - \theta_{M+i})) \quad (4)$$

$$Q_{Gi} = \frac{1}{X_{di}} \left[E'_{qi} V_{M+i} \cos(\theta_{M+i} - \delta_i) - V_{M+i}^2 \right] + \frac{x_{di} - x_{qi}}{2x_{di} x_{qi}} V_{M+i}^2 \left[\cos(2(\delta_i - \theta_{M+i})) - 1 \right] \quad (5)$$

توان‌های تزریقی به شین k مطابق زیر است:

$$P_k = \sum_{i=M+1}^{M+N} B_{ki} V_k V_i \sin(\theta_k - \theta_i) \quad (6)$$

$$Q_k = - \sum_{i=M+1}^{M+N} B_{ki} V_k V_i \cos(\theta_k - \theta_i)$$

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

$$P_k + P_{Lk} - P_{Gk} = 0 \quad ; \quad Q_k + Q_{Lk} - Q_{Gk} = 0 \quad (7)$$

۲-۲-اصول عملکرد و مدل‌سازی OUPFC و UPFC

کنترل کننده یکپارچه بهینه توان بالاتر از یک کنترل کننده یکپارچه توان و یک ترانسفورماتور تغییر دهنده فاز از طریق دو ترانسفورماتور سه سیم پیچه، مطابق شکل ۲، تشکیل شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سیم پیچ‌های متصل به شاخه موازی و سری به ترتیب، سیم پیچ تحریک و تزریق نامیده می‌شوند [۷]. سیم پیچ ترانسفورماتور تغییر دهنده فاز به سیم پیچ دوم ثانویه ترانسفورماتورهای تحریک و تزریق متصل شده است و ولتاژی با زاویه‌ی فاز ثابت (با نظر تزریق می‌کند. زاویه قدرت با توجه به شرایط سیستم و همچنین ولتاژ تزریقی متغیر است).

$$b_{se} = \frac{1}{X_{se}}, \quad \delta = \theta_i - \theta_j, \quad k = \tan \sigma \quad (20)$$

$$Q_{si} = u_{up1} b_s V_i^2 \quad (10)$$

۳-روش مستقیم و توابع کنترلی لیاپانوف

۱-روش مستقیم

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

$$V(\omega, \delta, E_q, V, \theta) = V_1 + \sum_{k=1}^8 V_{2k} + C_0 \quad (21)$$

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 k های مختلف متغیر پتانسیل

به صورت زیر می‌باشد:

$$V_{21} = -\sum_{k=1}^n P_{mk} \delta_k \quad (22)$$

$$V_{22} = \sum_{k=M+1}^{n+N} P_{Lk} \theta_k \quad (23)$$

$$V_{23} = \sum_{k=n+1}^{n+N} \int \frac{Q_{Lk}}{V_k} dV_k \quad (24)$$

$$V_{24} = \sum_{k=n+1}^{2n} \frac{1}{2x_{dk-M}} [E_{qk-n}^2 + V_k^2 - 2E_{qk-n} V_k \cos(\delta_{k-n} - \theta_k)] \quad (25)$$

$$V_{25} = -\frac{1}{2} \sum_{k=n+1}^{n+N} \sum_{l=n+1}^{n+N} B_{kl} V_k V_l \cos(\theta_k - \theta_l) \quad (26)$$

$$V_{26} = \sum_{k=n+1}^{2n} \frac{x_{dk-n} - x_{qk-n}}{4x_{dk-n} x_{qk-n}} [V_k^2 - V_k^2 \cos(2(\delta_{k-n} - \theta_k))] \quad (27)$$

$$V_{27} = -\sum_{k=1}^n \frac{E_{fdk} E_{qk}}{x_{dk} - x_{qk}} \quad (28)$$

$$Q_{sj} = -b_s V_i V_j (\cos(\theta_{ij}) - u_{up2} \sin(\theta_{ij})) \quad (11)$$

که در آن:

$$u_{up1} = r \cos(\gamma), \quad u_{up2} = r \sin(\gamma) \quad (12)$$

$$r = \sqrt{u_{up1}^2 + u_{up2}^2}, \quad \gamma = \tan^{-1}\left(\frac{u_{up2}}{u_{up1}}\right) \quad (13)$$

به طور مشابه مدل تزریق توان کنترل کننده یکپارچه بهینه توان به صورت زیر می‌باشد:

$$P_{i,OPFC} = -b_{se} k V_i V_j \sin(\delta + \sigma) - b_{se} r V_i V_j \sin(\delta + \rho) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Q_{i,OPFC} = & -b_{se} V_i^2 (k^2 + r^2) - 2b_{se} kr V_i^2 \cos(\sigma - \rho) \\ & - 2b_{se} k V_i^2 \cos(\sigma) - 2b_{se} r V_i^2 \cos(\rho) \\ & + b_{se} k V_i V_j \cos(\delta + \sigma) + b_{se} r V_i V_j \cos(\delta + \rho) \end{aligned} \quad (15)$$

$$P_{j,OPFC} = -P_{i,OPFC} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Q_{j,OPFC} = & +b_{se} k V_i V_j \cos(\delta + \sigma) \\ & + b_{se} r V_i V_j \cos(\delta + \rho) \end{aligned} \quad (17)$$

که متغیرهای r , γ , σ , پارامترهای کنترل کننده یکپارچه بهینه توان می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} u_d = & r \cos(\rho), \quad u_q = r \sin(\rho) \\ u_d^2 + u_q^2 = & r^2 \end{aligned} \quad (18)$$

$$r = \sqrt{u_{up1}^2 + u_{up2}^2}, \quad \gamma = \tan^{-1}\left(\frac{u_{up2}}{u_{up1}}\right) \quad (19)$$

اصل کنترلی کنترل کننده یکپارچه بهینه توان با در نظر داشتن
 $\sigma \geq 0$
 مطابق حالت های زیر خواهد بود.

حالت اول:

$$\frac{d}{dt} (V_i V_j \sin \delta) \geq \frac{\cos \sigma}{\sin \sigma} \frac{d}{dt} (V_i V_j \cos \delta) \quad (34)$$

$$\frac{d}{dt} (V_i V_j \cos \delta) \leq 0 \quad (34) \text{ برقرار باشد، و رابطه } \frac{d}{dt} (V_i V_j \cos \delta) \leq 0$$

آنگاه u_d مثبت بوده، برابر است با:

$$u_d = -K_1 \frac{d}{dt} (V_i V_j \cos \delta) + K_2 \frac{d}{dt} (V_i^2) \quad (35)$$

$$\frac{d}{dt} (V_i V_j \sin \delta) \leq 0 \quad (34) \text{ برقرار باشد، و رابطه } \frac{d}{dt} (V_i V_j \sin \delta) \leq 0$$

آنگاه u_q منفی بوده، برابر است با:

$$u_q = -2k \sin \sigma \quad (36)$$

$$\frac{d}{dt} (V_i V_j \sin \delta) \leq 0 \quad (34) \text{ برقرار باشد، و رابطه } \frac{d}{dt} (V_i V_j \sin \delta) \leq 0$$

آنگاه u_q منفی بوده، برابر است با:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = K_3 \frac{d}{dt} (V_i V_j \sin \delta) + K_4 \frac{d}{dt} (V_i^2) \\ u_q \leq -2K \sin \sigma \end{array} \right. \quad (37)$$

$$\frac{d}{dt} (V_i V_j \sin \delta) > 0 \quad (34) \text{ برقرار باشد، و رابطه } \frac{d}{dt} (V_i V_j \sin \delta) > 0$$

آنگاه u_q منفی بوده، برابر است با:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = -K_5 \frac{d}{dt} (V_i V_j \cos \delta) + K_6 \frac{d}{dt} (V_i^2) \\ u_q \leq -2K \sin \sigma \end{array} \right. \quad (38)$$

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 می‌باشد مورد ارزیابی قرار گیرند.

۴- شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی و بررسی پایداری گذرا در حضور کنترل کننده یکپارچه بهینه توان، سیستم قدرت $V = 230/000$ نشان داده شده در

$$v_{28} = \sum_{k=1}^n \frac{E_{qk}^{'} 2}{2(x_{dk} - x_{qk}^{'})} \quad (39)$$

و در آخر، مشتق زمانیتابع لیاپانوف به شکل زیر می‌باشد:

$$\frac{d v}{dt} = -\sum_{k=1}^n D_k (\omega_k)^2 - \sum_{k=1}^n \frac{T_{dok}^{'}}{x_{dk} - x_{qk}^{'}} (E_{qk}^{'})^2 \leq 0 \quad (30)$$

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

۲-۲- توابع کنترلی لیاپانوف

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

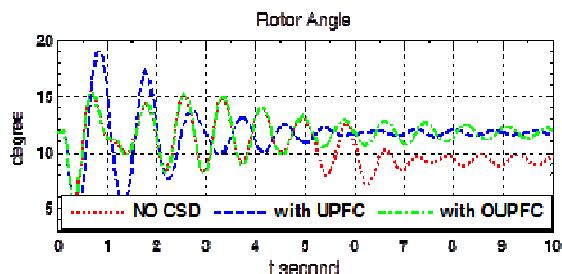
$$\dot{v}_{CSD} = -b_s V_i [u_{up1} \frac{d}{dt} (V_i - V_j \cos \theta_{ij}) + u_{up2} \frac{d}{dt} (V_j \sin \theta_{ij})] \quad (31)$$

در این مقاله، هدف یافتن روابط حاکم بر تابع کنترل کننده یکپارچه بهینه توان می‌باشد. لذا، براساس روابط (۱۷) و (۳۰)، تابع کنترل کننده بصورت ذیل می‌باشد [۱۱، ۷]:

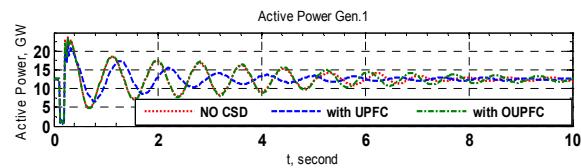
$$\begin{aligned} v_{CSD} = & -b_s V_i [u_{up1} (\dot{V}_i + V_j \sin(\theta_{ij}) \dot{\theta}_{ij} - \dot{V}_j \cos(\theta_{ij})) \\ & + u_{up2} (V_j \cos(\theta_{ij}) \dot{\theta}_{ij} + \dot{V}_j \sin(\theta_{ij}))] \\ & - b_s V_i \left[u_{up1} \frac{d}{dt} (V_i - V_j \cos(\theta_{ij})) + u_{up2} \frac{d}{dt} (V_j \sin(\theta_{ij})) \right] \end{aligned} \quad (32)$$

برای منفی بودن تابع کنترل کننده یکپارچه توان، اصول کنترل ^{۱۸} به صورت زیر می‌باشد:

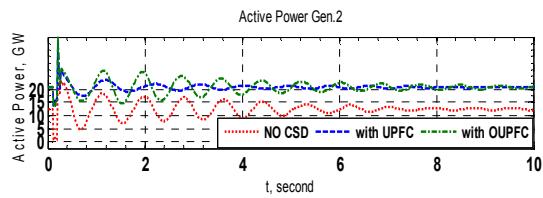
$$\left\{ \begin{array}{l} u_{up1} = k_1 \frac{d}{dt} (V_i - V_j \cos(\theta_{ij})) \\ u_{up2} = k_2 \frac{d}{dt} (V_j \sin(\theta_{ij})) \end{array} \right. \quad (33)$$



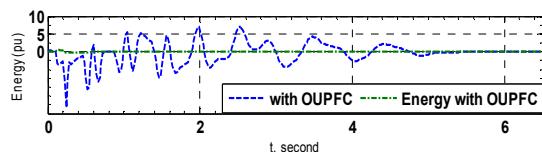
شکل ۶ تغییرات زاویه روتور نسبی ژنراتور شماره یک نسبت به زمان



شکل ۷ تغییرات توان اکتیو ژنراتور شماره یک نسبت به زمان



شکل ۸ تغییرات توان اکتیو ژنراتور شماره دو نسبت به زمان

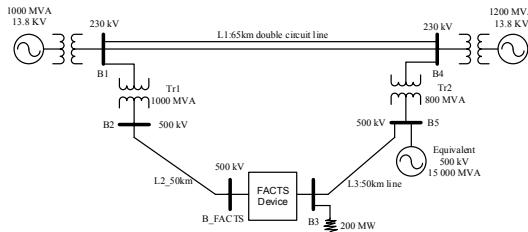


شکل ۹ تغییرات انرژی سیستم نسبت به زمان

نوسانات کمتر (x_7) در شکل ۶ به معنی آن است که انرژی سریعتر به کمترین مقدار آن ($x_7 = 0$) می‌رسد و مسیرهای^{۱۹} سیستم به نقطه تعادل پایدار بعد از خطا میل می‌نماید، لذا دامنه نوسانات زاویه روتور در شکل ۶ در حضور کنترل‌کننده یکپارچه بهینه توان نسبت به دامنه نوسانات زاویه روتور در حضور کنترل‌کننده یکپارچه توان کاهش یافته است. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود، در روش پیشنهاد شده در سیکل اول بعد از رخدادن خطا، حدود ۲۵٪ میزان جهش^{۲۰} کاهش می‌یابد.

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

شکل ۵ در محیط نرم‌افزار MATLAB-simpower مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. شبکه حلقوی پنج شینه از طریق سه خط انتقال و دو ترانسفورماتور ۲۳۰/۵۰۰ kV به هم اتصال یافته‌اند. دو ژنراتور ۲۰۰ کیلو‌ولتی با مجموع تولید ۲۰۰ مگا‌وات در یک شبکه حلقوی از طریق خط انتقال ۲۳۰/۵۰۰ kV در ارتباط مستقیم هستند. این دو ژنراتور از طریق خطوط انتقال، دو ترانسفورماتور ۵۰۰/۲۳۰ کیلو‌ولت ۱۰۰۰ و ۸۰۰ مگا‌وات آمپر و با اتصال به شبکه الکتریکی که به صورت معادل تونن در باس ۳ رامطابق شکل ۵ تذیله می‌نمایند. به منظور بررسی پایداری گذرا، ادوات FACTS کنترل کننده یکپارچه توان و کنترل کننده یکپارچه بهینه توان به صورت K₁=۰.۷/۰.۵ و K₂=۰.۵/π در نظر گرفته شده است. خطا در محلی نزدیک به شین ۱ در ثانیه ۱/۰ رخ می‌دهد و در ثانیه ۳/۰ بدون هیچگونه تغییری در شبکه رفع می‌گردد. لازم به ذکر است، ادوات کنترلی مانند PSS در شبکه وجود ندارند. اطلاعات سیستم قدرت مورد استفاده در جداول ۲، ۳ و ۴ آراهه شده است.



شکل ۵ سیستم سه-شینه مورد مطالعه

شکل‌های ۶، ۷ و ۸: زاویه روتور، توان اکتیو ژنراتور ۱، و گرافهای انرژی نسبت به زمان در سه حالت بدون CSD، با حضور کنترل کننده یکپارچه توان و با حضور کنترل کننده 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:

حالات اول: وضعیت سیستم بدون ادوات FACTS سری می‌باشد؛
حالات دوم: وضعیت سیستم را با در نظر گرفتن کنترل کننده یکپارچه توان نشان می‌دهد؛

حالات سوم: نشان دهنده شرایط سیستم با در نظر گرفتن کنترل کننده یکپارچه بهینه توان می‌باشد.

شکل‌های 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.

- 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. Leepongwat, 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 شهری چمران اهواز (۱۳۸۲)، کارشناسی ارشد 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.

۵-نتیجه‌گیری

در این تحقیق کنترل کننده‌ی یکپارچه بهینه توان، با ترکیب کنترل کننده یکپارچه توان و ترانسفورماتور تغییر دهنده فاز مبتنی بر روشتابع انرژی لیپاونوف برای کنترل کننده یکپارچه بهینه توان به کار برده شده است. در این مقاله تابع انرژی پیشنهاد شده مبتنی بر لیپاونوف با بکارگیری پارامترهای کنترلی محلی، به منظور بهبود پایداری گذراي سیستم قدرت مورد ارزیابی قرار گرفته است. تابع انرژی پیشنهادی با استفاده از مدل تریک توان ادوات کنترل کننده سری، در یک شبکه با حفظ ساختار بدست آمده است. به منظور مقایسه دو تجهیز کنترل کننده یکپارچه توان و کنترل کننده یکپارچه MATLAB-simpower بهینه توان، شبیه‌سازی در نرم افزار همزمان انجام می‌گیرد. افزایش پایداری گذرا در نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بیان گر قابلیت کنترل کننده یکپارچه بهینه توان نسبت به کنترل کننده یکپارچه توان می‌باشد. استفاده از کنترل کننده یکپارچه بهینه توان در محل مناسب، علاوه بر مزایای استفاده از کنترل کننده یکپارچه توان، سبب منفی‌تر شدن مشتق زمانی تابع لیپاونوف و پایداری بیشتر در برخورد با نوسانات الکتروموکانیکی 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. ۲۰۰۴, ۱۴۰۱-۱۳۸۷.
- [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, IEEE Transactions 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



افشین لشکرآرا در سال (۱۳۵۲) در تهران متولد شد. مدارک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتراخود 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:

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

جدول ۲ اطلاعات مربوط به مقاومت و راکتانس ژنراتورها

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

جدول ۳ اطلاعات مربوط به ژنراتورها

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

زیرنویس‌ها

-
- ^۱Optimal Unified Power Flow Controllers (OUPFCs)
 - ^۲Flexible AC Transmission Systems (FACTS)
 - ^۳Unified Power Flow Controllers (UPFCs)
 - ^۴Phase Shift Transformers (PSTs)
 - ^۵Controllable Series Devices (CSDs)
 - ^۶Structure Preserving Model (SPM)
 - ^۷Power System Stabilizer (PSS)
 - ^۸Automatic Voltage Regulator (AVR)
 - ^۹Transmission Line Power Flow
 - ^{۱۰}Phase Angle
 - ^{۱۱}Voltage
 - ^{۱۲}Line Impedance
 - ^{۱۳}Simultaneously Control
 - ^{۱۴}Direct Methods
 - ^{۱۵}Real-Time
 - ^{۱۶}Static VAr Compensator
 - ^{۱۷}Control Lyapunov Function (CLF)
 - ^{۱۸}Control Law
 - ^{۱۹}Trajectories
 - ^{۲۰}Overshoot