

کاربرد روش لیاپا نوف مستقیم در بهبود میرایی نوسانات قدرت بوسیله کنترل UPFC

نا هید اصلانی آملی

دا نشکده برق

دا نشگاه علم و صنعت ایران

nahidaslani@yahoo.com

چکیده: سیستمهای قدرت بزرگ بهم پیوسته اغلب نوساناتی با میرایی ضعیف را بین ژنراتورهای سنکرون و زیر سیستمها تحمل می کنند. این مقاله روشی را بر اساس کاربرد مدل سیستم غیرخطی و روش لیاپانوف مستقیم در بهبود میرایی نوسانات قدرت با استفاده از UPFC ارائه می کند. یک استراتژی کنترل حالت متغیر که سیگنالهای محلی توان اکتیو و راکتیو موجود را بکار می برد، با تحقیقات بسیار بدست آمده است.

کلمات کلیدی: کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC)، کنترل حالت متغیر، روش لیاپانوف مستقیم

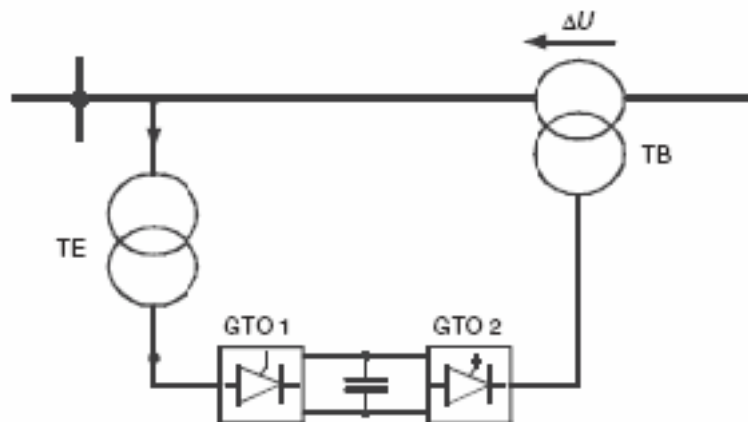
1- مقدمه

نوسانات قدرت با میرایی ضعیف یکی از مهمترین مشکلاتی هستند که امنیت عملکرد سیستمهای قدرت را به مخاطره می اندازند. میراسازی می تواند بوسیله PSS (پایدار کننده های سیستم قدرت) و یا بوسیله یکی از ادوات FACTS بهبود یابد. بطور کلی PSS گشتاور میرایی یک ژنراتور را با اثر گذاری بر کنترل تحریک آن افزایش می دهد، در حالیکه ادوات FACTS میراسازی را بوسیله مدوله کردن زاویه قدرت معادل سیستم بهبود می دهند. از نقطه نظر دینامیکی سیستم قدرت، مشکل اساسی این است که چگونه ادوات FACTS معین را کنترل کنیم بویژه UPFC. برای مثال، یک راه حل این است که کنترل بهینه را بکار ببریم. مشکل کاربرد کنترل بهینه استاندارد این است که این روش یک مدل سیستم خطی شده را بکار میبرد که این مدل تنها برای نقطه عملکرد داده شده معتبر می باشد. چون کنترل مبتنی بر مدل سیستم خطی شده تنها زمانی معتبر است که سیستم در مجاورت نقطه عملکرد انتخاب شده قرار دارد پس زمانیکه شرایط عملکرد سیستم تغییر می کند و یا مدل سیستم بواسطه قطع برق ژنراتور عوض می شود، هرگز نمی توان از عملکرد سیستم کنترل مطمئن بود. از این گذشته، سیستمهای قدرت پر تنش برای نشان دادن رفتار غیر خطی بکار می روند. از این رو، کنترل حالت متغیر، یک سیستم غیر خطی را به منظور در نظر گرفتن شرایط کاری در حال تغییر و تغییرات در پارامترهای شبکه بکار می برد. برای رسیدن به این هدف، روش لیاپانوف مستقیم بکار رفت. کاربرد اول روش لیاپانوف

مستقیم به منظور طراحی کنترل کننده های پایدار سیستم قدرت بوسیله چندین نویسنده در اوایل دهه 90 با در نظر گرفتن کنترل غیرخطی ادوات FACTS شنت مانند SVC یا SMES ارائه شد. بعد از آن، این روش به فرم سیستماتیک دیگری فرمولبندی شد و برای ادوات FACTS دیگری مانند مقاومت ترمزی، جبران ساز استاتیک سری و همچنین برای PSS یک ژنراتور سنکرون بکار رفت. لیپانوف یا روشهای کنترل مبتنی بر انرژی بوسیله نویسندگان دیگری مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. در این مقاله ما ابتدا استراتژی کنترل حالت متغیر را بدست می آوریم که میراسازی نوسانات قدرت را بوسیله ماکزیموم کردن سرعت با وجود اغتشاش انجام می دهد که باعث برگشت نقطه عملکرد سیستم به نقطه تعادل می شود. میرایی ناشی از کنترل حالت متغیر، مستقل از شرایط کاری سیستم می باشد که این یک مزیت اصلی این سیستم کنترلی می باشد. اما مشکل کنترل حالت متغیر این است که کاربردش در یک سیستم چند ماشینه واقعی نیازمند تخمین همه متغیرهای حالت مورد نیاز می باشد. (زاویه رتور و انحراف سرعت همه ژنراتورها). این مساله به خودی خود یک مشکل بسیار پیچیده است که مضافاً نیازمند اندازه گیریهای فضای وسیع قابل اعتماد و لینکهای ارتباطی گسترده می باشد. به منظور اجتناب از این مشکلات، یک کنترل محلی بسیار ساده (یعنی کنترل مبتنی بر اندازه گیریهای محلی) بدست آمده است که بخوبی بر کنترل غیرخطی حالت متغیر برتری دارد. این روش کنترلی بوسیله اندازه گیری محلی توان اکتیوو راکتیوو با انتخاب دقیق بهره ها در حلقه های کنترلی ضمیمه بدست می آید. تستهای شبیه سازی، میرایی خوب کنترل حالت متغیر را تایید کرده اند، در حالیکه کنترل پایدار کننده مبتنی بر سیگنالهای محلی برای اجرا کردن، آسانتر هستند و نتایج میرایی آن، خوب است اما ضعیفتر از نتایج بدست آمده برای کنترل حالت متغیر می باشد. [1]

2- کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC)

UPFC متعلق به خانواده ادوات FACTS مبتنی بر الکترونیک قدرت می باشد. UPFC می تواند بصورت سری با یک خط انتقال در یک سیستم یکپارچه بزرگ متصل شود. همانطور که در شکل (1) نشان داده شده، UPFC شامل ترانسفورماتور تزریق TB و ترانسفورماتور تحریک TE متصل شده بوسیله مبدلهای پشت به پشت GTO1 و GTO2 می باشد. و وظیفه ترانس تزریق TB این است که ولتاژ اضافی ΔU را به خط انتقال تزریق کند که این ولتاژ هم از نظر اندازه و هم از نظر فاز کنترل می شود. کار اصلی UPFC این است که فلوی توان را در شرایط پایدار کنترل کند. اما سرعت بالای عملکرد ادوات ترنستوری این امکان را بوجود می آورد تا بطور دینامیکی UPFC را برای بهبود میرایی نوسانات قدرت بکار ببریم. [2]



شکل (1). دیاگرام ترسیمی UPFC

3- مدل سیستم قدرت با UPFC

3-1- مفروضات

فرض می شود که UPFC در نقطه b که می تواند هر جایی درون خط انتقال باشد، نصب شود. (شکل 2) از نقطه نظر اثرگذاری حالت ماندگار و گذرا، تریستور کنترل شده UPFC می تواند بعنوان یک عنصر پس فاز با یک ثابت زمانی خیلی کوچک یا بطور تقریبی بعنوان یک عنصر تناسبی تلقی شود. از این رو، قسمت سری UPFC (ترانس تزریق) می تواند با یک راکتانس سری (شکل 2(b)) مدلسازی شود که این راکتانس شامل راکتانس سمت چپ خط انتقال X_a و نسبت تبدیل مختلط ترانس ایده آل می باشد.

$$h = \frac{U_a}{U_b} = |h|e^{jq}, \quad \frac{I_b}{I_a} = h^* = |h|e^{-jq} \quad (1)$$

قسمت موازی UPFC می تواند بعنوان یک سوسپتانس موازی کنترل شده B_r مدلسازی شود (شکل 2(b)). از مقاومت شبکه در شکل 2(b) به منظور ساده سازی معادلات، چشم پوشی می شود. ژنراتور سنکرون بوسیله $E_g = E^{\angle}$ پشت راکتانس گذرای X_d^{\angle} مدلسازی می شود. این راکتانس (X_d^{\angle}) در راکتانس X_a خط انتقال داخل می شود. در این مدل ساده ژنراتور زاویه EMF، d زاویه E_g ، هم زاویه قدرت سیستم و هم زاویه رتور می باشد. (یعنی زاویه بین رتور و محور مرجع سنکرون تعریف شده بوسیله ولتاژ شین بینهایت). ولتاژ DU تزریق شده بوسیله ترانس تزریق TB به دو مؤلفه عمود بر هم تجزیه می شود: مؤلفه مستقیم DU_Q و مؤلفه قائم DUP . هر دو مؤلفه با ولتاژ U_b متناسب هستند که این ولتاژ، ترانس تحریک TE را تغذیه می کند.

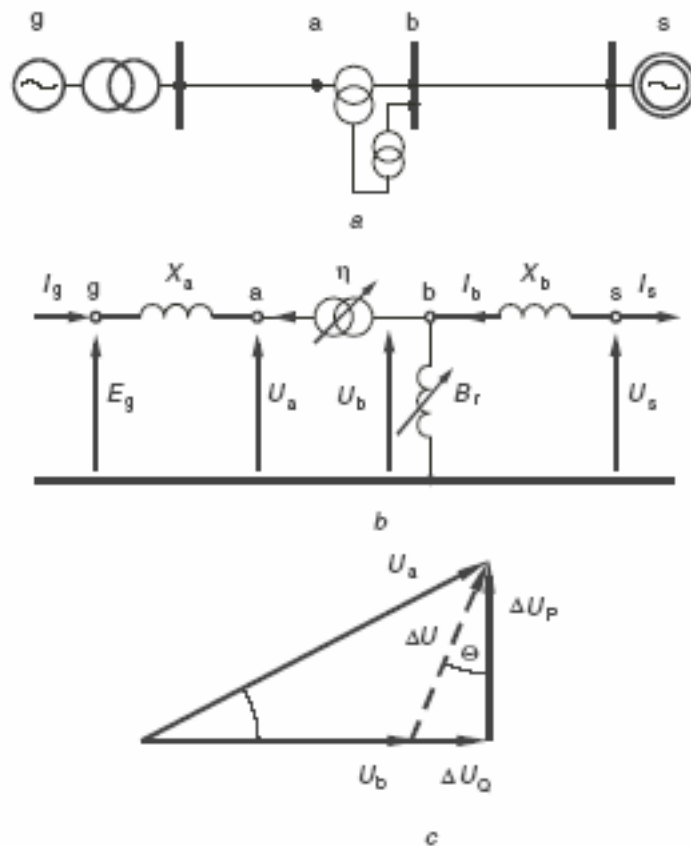
$$DU_Q = b|U_b|, \quad DUP = g|U_b| \quad (2)$$

$$\sin q = \frac{DUP}{|U_a|} = \frac{g|U_b|}{|U_a|} = \frac{g}{|h|} \quad (3a)$$

$$\cos q = \frac{(|U_b| + DU_Q)}{|U_a|} = \frac{(|U_b| + b|U_b|)}{|U_a|} = \frac{1+b}{|h|} \quad (3b)$$

$$(1+b)^2 + g^2 = |h|^2 \quad (4)$$

مؤلفه مستقیم DU_Q فلوی توان راکتیو را تحت تاثیر خود قرار می دهد و بطور مشابه مؤلفه قائم DUP فلوی توان اکتیو را تحت تاثیر خود قرار می دهد.



شکل (2). سیستم ژنراتور- شین بینهایت با UPFC

a دیاگرام ترسیمی

b دیاگرام تکفاز

c دیاگرام فازوری

3-2- معادلات گره ای شبکه

شاخه g-b در سمت چپ شکل 2(b) می تواند بعنوان یک ترانسفورماتور با نسبت تبدیل مختلط h و ادمیتانس $Y_a = 1/Z_a$ که $Z_a = jX_a$ می باشد، تلقی شود. ثابت می شود چنین شاخه ای همراه با h می تواند به مدار معادل بدون نسبت تبدیل h اما با همه شاخه های وابسته به مقدار h تبدیل شود. با بکار بردن این مدار معادل، معادلات گره ای شبکه مربوط به شکل 2(b) می تواند به صورت زیر نوشته شود :

$$\begin{pmatrix} \hat{E}g \\ \hat{E}Is \\ \hat{E}0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{E}Ya & 0 & -hYa \\ 0 & Yb & -Yb \\ -h^*Ya & -Yb & |h|^2Ya + Yb + Yr \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{E}Eg \\ \hat{E}Us \\ \hat{E}Ub \end{pmatrix} \quad (5)$$

با حذف گره سوم داریم:

$$\begin{pmatrix} \hat{E}g \\ \hat{E}Is \\ \hat{E}0 \end{pmatrix} = Ybb^{-1} \begin{pmatrix} (YaYb + YaYr) & -hYaYb \\ -h^*YaYb & (|h|^2YaYb + YbYr) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{E}Eg \\ \hat{E}Us \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$Ub = h^*YaYbb^{-1}Eg + YbYbb^{-1}Us \quad (7)$$

$$Ybb = |h|^2Ya + Yb + Yr \quad (8)$$

ادمیتانس Ybb ادمیتانس خودی گره b می باشد که upfc به آن گره متصل می شود. همچنین داریم:

$$Eg = |Eg|e^{jd}, Us = |Us| \quad (9)$$

3-3- توان ژنراتور

توان ظاهری ژنراتور با فرمول معروف $Sg = EgIg^*$ بیان می شود که Ig جریان ژنراتور از معادله (6) تعیین می شود.

$$Sg = EgIg^* = Eg(Ybb^{-1})^* (Ya^*Yb^*Eg^* + Ya^*Yr^*Eg^* - h^*Ya^*Yb^*Us^*) \quad (10)$$

بعد از جایگزین کردن عبارات نمایی از (1) و (9) در این معادله، می توان توان ظاهری ژنراتور را بعنوان تابعی از زاویه قدرت d و زاویه q نسبت تبدیل مختلط h بدست آورد.

آنگاه با چشم پوشی از مقاومت شبکه و بکار بردن بعضی محاسبات ساده اما جبری سخت، می توان $Pg = \text{Re}[Sg]$ را بصورت زیر محاسبه کرد:

$$Pg = |Us||Eg|B_{bb}^{-1}B_aB_b|h|' [\sin d \cos q - \cos d \sin q] \quad (11)$$

که بطور مشابه با معادله (8) داریم:

$$B_{bb} = |h|^2 B_a + B_b + B_r \quad (12)$$

معادله (11) بعد از در نظر گرفتن معادله (3) می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$Pg = |Us||Eg|B_{bb}^{-1}B_aB_b[(1+b)\sin d - g \cos d] \quad (13)$$

در معادله (13) توان حقیقی ژنراتور تابعی صریح از نسبت تبدیل g, b می باشد. ضریب زیر را می توان بصورت زیر تغییر داد:

$$B_{bb}^{-1} B_a B_b = \frac{B_a B_b}{|h|^2 B_a + B_b + B_r} = \frac{X_r}{X_{\dot{a}} X_r + X_a X_b} \quad (14)$$

که:

$$X_{\dot{a}} = X_a + |h|^2 X_b \quad (15)$$

$X_{\dot{a}}$ راکتانس معادل خط انتقال دیده شده از گره ژنراتور تا شین بینهایت بدون در نظر گرفتن شاخه شنت می باشد.

3-4- معادلات ژنراتور

دینامیک ژنراتور بوسیله معادله معروف نوسان شرح داده می شود:

$$M \frac{dDw}{dt} = P_m - P_g(d) - D \frac{dd}{dt} \quad (16)$$

M: ضریب اینرسی

$$Dw = \frac{dd}{dt} \text{ : انحراف سرعت رتور}$$

D: ضریب میرایی

$$M \frac{dDw}{dt} = P_m - b_{\dot{a}} \sin d - D \frac{dd}{dt} + X_{SHC} B_r b_{\dot{a}} \sin d - (1 - X_{SHC} B_r) [b b_{\dot{a}} \sin d - g b_{\dot{a}} \cos d] \quad (17)$$

$\dot{x} = f(x, u)$ معادلات حالت غیرخطی هستند که $X = (d, Dw)$ متغیرهای حالت هستند.
نقطه تعادل معادلات حالت، مختصات زیر را دارد:

$$\hat{x} = (\hat{d}, D\hat{w} = 0)$$

4- استراتژی کنترل مبتنی بر روش لیپانوف مستقیم

از روشی که با آن کنترل کننده یکپارچه توان به منظور افزایش میراسازی نوسانات سیستم قدرت کنترل می شود، بعنوان استراتژی کنترل یاد می شود.

4-1- روش لیپانوف مستقیم

فرض کنید $V(x)$ یک تابع لیپانوف تعریف شده برای مدل سیستم قدرت شرح داده شده باشد. هراغتشافی در سیستم قدرت، منجر به عدم توازن توان می شود که مسیریسیستم را از نقطه تعادل پایدار قبل از خطا به نقطه گذرای $x(t)$ که سطح

انرژی بالاتری نسبت به نقطه تعادل بعد از خطا \hat{x} دارد، منتقل می کند. اگر $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ منفی باشد، تابع لیاپانوف $V(x)$ با زمان کاهش می یابد و به سمت مقدار حداقل خود تمایل دارد که در \hat{x} ، نقطه تعادل بعد از خطا، ظاهر می شود. هر مقدار \dot{V} منفی تر باشد، سیستم سریعتر به نقطه تعادل \hat{x} بر می گردد (یعنی میراسازی در سیستم بهتر می شود) در نتیجه اگر روش کنترلی مفروض، مقدار منفی \dot{V} را در هر نقطه ای از حالت گذرا به حداکثر برساند، آن روش به مفهوم لیاپانوف بهینه است. [3]

4-2- کاربرد برای کنترل پایدار کننده UPFC

برای سیستم ژنراتور-شین بینهایت در نظر گرفته شده و زمانیکه از مقاومت شبکه صرفنظر می شود، تابع لیاپانوف V به صورت انرژی کل سیستم تعریف می شود:

$$V = E_k + E_p \quad (18)$$

$$E_k = \frac{1}{2} M (Dw - D\hat{w})^2 = \frac{1}{2} M D w^2 \quad (19a)$$

$$E_p = - [P_m (d - \hat{d}) + b_{\hat{a}} (\cos d - \cos \hat{d})] \quad (19b)$$

E_p و E_k بترتیب انرژی جنبشی و پتانسیل هستند و $\hat{d}, D\hat{w} = 0$ مختصات نقطه تعادل بعد از خطا می باشند. در نقطه تعادل بعد از خطا، انرژی کل مساوی با صفر است یعنی $V=0$. هر اغتشاشی منجر به شتاب گرفتن یا کند شدن حرکت رتور و در نتیجه انحراف سرعت Dw غیر صفر و تغییر در زاویه قدرت d می شود و این باعث انتقال نقطه گذرای جریان از نقطه تعادل می شود و در نتیجه $V \neq 0$ می شود. هدف استراتژی کنترل UPFC این است که متغیرهای کنترلی g, b, B_r را وادار به تغییرات کنیم تا سیستم هر چه سریعتر به نقطه تعادل $(\hat{d}, D\hat{w} = 0)$ که در آن $V=0$ است، برگردد. به منظور رسیدن به این هدف، استراتژی کنترل بایستی در هر نقطه ای از حالت گذرا مقدار منفی $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ را به حداکثر برساند. با مشتق گرفتن از معادله (18) داریم:

$$\dot{V} = \frac{dE_p}{dt} + \frac{dE_k}{dt} = -DDw^2 - b(1 - X_{SHC} B_r) b_{\hat{a}} \sin d Dw + g(1 - X_{SHC} B_r) b_{\hat{a}} \cos d Dw + B_r X_{SHC} b_{\hat{a}} \sin d Dw \quad (20)$$

چون هر کدام از متغیرهای کنترلی g, b, B_r در مقدار منفی \dot{V} سهمیم هستند، استراتژی کنترل بایستی تضمین کند که همه جملات در معادله (20) منفی و مستقل از علامت زاویه قدرت d و انحراف سرعت Dw می باشند. فرض می کنیم که $1 - X_{SHC} B_r @ 1$ ، آنگاه داریم:

$$\dot{V} = -DDw^2 - [K_g (\cos d)^2 + K_b (\sin d)^2 + K_B X_{SHC} (\sin d)^2] b_{\hat{a}}^2 Dw^2 \leq 0 \quad (21)$$

هرجمله در پړانتز مجذور،همواره مثبت است یعنی اهمیتی ندارد که مقدار زاویه قدرت d چیست. به این معنی که هر کدام از متغیرهای کنترلی، مقدار منفی \dot{V} را افزایش می دهند از این رو، میرایی نوسانات سیستم قدرت را بهبود می دهند. در معادله فوق K_g, K_b, K_B ضرایب مثبتی هستند که به فرم زیر تعریف می شوند:

$$\begin{aligned} g(t) &= -K_g [b_{\dot{a}} \cos d] Dw \\ b(t) &= +K_b [b_{\dot{a}} \sin d] Dw \\ B_r(t) &= -K_B [b_{\dot{a}} \sin d] Dw \end{aligned} \quad (22)$$

اثر هر یک از متغیرهای کنترلی در میراسازی به آسانی با جایگزین کردن معادلات (22) در معادله (17) تایید می شود. بعد از تبدیلات ساده و فرض $1 - X_{SHC} B_r @ 1$ می توان بدست آورد:

$$M \frac{dDw}{dt} = P_m - b_{\dot{a}} \sin d - DDw - DP_{control}(dw) \quad (23)$$

$$DP_{control}(dw) = D_{control(dw)} Dw \quad (24)$$

DP توان میراسازی ارائه شده بوسیله کنترل حالت متغیر UPFC می باشد، پس داریم:

$$D_{control}(dw) = (X_{SHC} K_B + K_b)(b_{\dot{a}} \sin d)^2 + K_g (b_{\dot{a}} \cos d)^2 \geq 0 \quad (25)$$

D ضریب میرایی، مثبت می باشد. اگر شرط زیر برآورده شود، آنگاه ضریب میرایی معرفی شده بوسیله UPFC ثابت و مستقل از زاویه قدرت d می باشد. [4]

$$\begin{aligned} K_g &= (X_{SHC} K_B + K_b) = K \\ D_{control}(dw) &= K b_{\dot{a}}^2 \end{aligned} \quad (26)$$

5- نتیجه گیری

نتیجه مهمی که از معادله (26) بدست می آید این است که میرایی معرفی شده بوسیله کنترل UPFC به بارگذاری خط انتقال بستگی ندارد. استراتژی کنترل مبتنی بر اندازه گیریهای محلی در مقالات بعدی مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

6- مراجع

- [1] Machowski, J., Robak, S., and Bialek, J., Damping of power swings by optimal control of series compensators, Proc. 10th Int. Conf. Power system automation and control, Bled, Slovenia, October 1997, pp.39-44
- [2] Sng, Y.H., and Johns, A.T., Flexible AC transmission systems (FACTS), (IEEE Power and Energy Series 30, London, UK, 1997)
- [3] Ghandhari, M., Anderson, G., and Hiskens, I.A., Control Lyapunov functions for controllable series devices, IEEE Trans. Power Syst., 2001, 16, (4) pp. 689-694
- [4] Lo, K.L., and Ma, T.T., UPFC damping control strategy based on transient energy function, Electr. Power Syst. Res., 2000, 56, pp.195-203