

به کار گیری مانع های مقاومتی جهت بهبود پایداری گذرا

سعید اباذری^۱

۱- هیات علمی دانشگاه شهرکرد، saeedabazari@yahoo.com

چکیده

یکی از مسائل مهم در سیستم های قدرت افزایش میرایی دامنه نوسانات و افزایش زمان بحرانی در پایداری گذرا می باشد. لذا توجه به اهمیت میرا نمودن نوسانات در بهبود پایداری گذرا ما را به این سمت هدایت می نماید که از ابزاری بهره گیریم که بتواند در این امر ما را کمک نماید. یکی از ابزارهای مهم در این کار قطع کننده مقاومتی^۱ می باشد اما چگونگی عملکرد آن در سیستم قدرت، زمان کار و محل به کار گیری آن از مسائل مهم می باشد. در این راه با استفاده از المانهای الکترونیک قدرت و مدلسازی دقیق، شبکه کنترل کننده بهینه ای طرح شده است که ما را به هدف نهایی خود رهنمون می سازد. مانع های مقاومتی در حقیقت به طور مؤثر انرژی اضافی که در اثر اختلال بوجود آمده است را جذب نموده و بدین ترتیب در بهبود پایداری کمک می نماید.

کلمات کلیدی

مانع های مقاومتی، پایداری گذرا، کنترل bang-bang، کنترل بهینه

۱- مقدمه

مدار باز بوده و استراتژی پیش بینی شده نیز بر اساس سیستم حلقه باز عمل می نمود. اما به مرور زمان استراتژی کنترل بهینه مطرح می گردد که نمونه ای از استراتژی مربوط به سیستم کنترل فازی bang-bang میباشد [۲]. آلیو نیز پیشنهاد نموده است که یک قطع کننده مقاومتی و یک مانع مقاومتی و یک راکتور قابل کنترل برای حالت اضطراری در نظر گرفته شود [۳]. سوئیچ این مانع مقاومتی و راکتور بر اساس استراتژی تغییر سرعت می باشد. مقاومت ها مقدار انرژی شتاب دهنده ژنراتور را جذب می نماید و راکتور نیز ولتاژ ماشین ها را در زمانی که ماشین شتاب منفی دارد کاهش می دهد در این حالت قدرت الکتریکی کاهش می یابد و لذا این عمل باعث می شود که سیستم به نقطه تعادل باز گردد. یک استراتژی بهینه دیگر می تواند این باشد که علاوه بر مقاومت، جبران کننده نیز به سیستم کنترل کننده اضافه گردد و این جبران کننده بتواند در مواقع لزوم ولتاژ را اضافه نماید تا بتواند قدرت انتقالی را اضافه و زاویه نوسان را کم نماید [۸-۴]. در مطالعه پایداری ما از این نوع کنترل کننده بهره گیریم که تلفیقی از کنترل کننده ها در مراجع ذکر شده می باشد.

پایداری یک سیستم قدرت یک ویژگی از سیستم است که تضمین می نماید که سیستم تحت شرایط کار نرمال و غیر نرمال در نقطه متعادل باقی می ماند. اصولاً در مسأله پایداری گذرا این مسأله مطرح می گردد که آیا برای یک اغتشاش بزرگ مسیر حالت سیستم به ناحیه جذب^۲ باز می گردد یا خیر؟ روشن است که پایداری گذرا بستگی به توپولوژی سیستم قدرت، نقطه کار در حالت متعادل و همچنین نوع اغتشاش وارد شده به سیستم دارد. مانع های مقاومتی می توانند انرژی اضافی بارها را به سرعت جذب نماید و از این جهت انرژی گذرا را افزایش دهند و در حقیقت در زمان بروز اختلال انرژی اضافی ژنراتورها را جذب نمایند. معمولاً در سیستم های قدرت یک مقاومت به صورت موازی مانند یک بار به ژنراتورها اتصال دارند و انرژی که این بار می تواند جذب نماید بستگی به ماکزیمم درجه حرارت قابل تحمل مواد تشکیل دهنده مانع های مقاومتی دارد [۱]. این مانع های مقاومتی در کشورهای روسیه، آمریکا، ژاپن به کار رفته است. به طور معمول قبلاً سوئیچ مقاومتها بر اساس سیستم

می کند:

$$P = \begin{cases} \frac{6V_o^2}{R} \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right) \right] & 0 \leq \alpha < 60^\circ \\ \frac{6V_o^2}{R} \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{12} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} + \frac{3 \sin 2\alpha}{16} \right) \right] & 60 \leq \alpha < 90^\circ \\ \frac{6V_o^2}{R} \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{16} + \frac{\sin 2\alpha}{16} \right) \right] & 90 \leq \alpha < 150^\circ \end{cases} \quad (1)$$

در روابط فوق R اندازه مقاومت مانع مقاومتی می باشد.
روابط (۱) در حقیقت نحوه کنترل قدرت را نمایش می دهد.

۳- نحوه کنترل مانع مقاومتی در زمان اختلال

معادله نوسان یک ژنراتور در یک سیستم چند ماشینه به صورت رابطه زیر بیان می گردد:

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d\delta}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

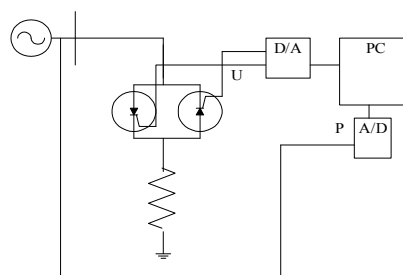
در رابطه فوق δ زاویه نوسان، n تعداد ماشینها، H ثابت اینرسی و D ضریب میرایی ماشین، P_m و P_e قدرت ورودی مکانیکی و خروجی الکتریکی می باشد. با توجه به اینکه معمولاً سیگنال سرعت ژنراتور قابل اندازه گیری می باشد و اندازه گیری زاویه نوسان ماشینها به آسانی امکان پذیر نمی باشد لذا رابطه فوق را به صورت زیر بیان می نمایم:

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d\omega_i}{dt} + D_i \omega_i = P_{mi} - P_{ei} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

در رابطه فوق از وجود مانع مقاومتی صرف نظر نموده ایم. در حالت متعادل قدرت مکانیکی و الکتریکی برابر و لذا تغییرات سرعت برابر با صفر می باشد. با بروز اختلال نظیر اتصال کوتاه قدرت مکانیکی تغییر نمی یابد ولی قدرت الکتریکی کاهش می یابد لذا ماشینها سرعت گرفته و به همین دلیل انرژی جنبشی ماشینها افزایش می یابد و با افزایش سرعت، زاویه نوسان افزایش می یابد لذا مقدار قدرت خروجی پس از اختلال اضافه می گردد و در این حالت ماشین شتاب منفی گرفته و سرعت ماشین کم می گردد ولی انرژی جنبشی قبلی اکنون به صورت پتانسیل ظاهر می گردد، اگر انرژی

۲- کنترل تاپرستوری برای مانع های مقاومتی

مانع های مقاومتی در اکثر موارد در در ترمینال ژنراتورهای شبکه متصل می گردند و دارای دو المان اصلی می باشد:
۱- قطع کننده الکترونیک قدرت که زمان قطع و صل آن قابل کنترل باشد.
۲- قسمتی که شامل مقاومت می باشد.
در شکل (۱) بلوک دیاگرامی نشان داده شده است که در این بلوک دیاگرام ژنراتور را به همراه مانع مقاومتی نشان می دهد.



شکل ۱- بلوک دیاگرام سیستم تمام کنترلی قطع کننده ها

مقاومتها از طریق مبدلهای ac/ac کنترل می گردند. دستور مربوط به وصل مقاومتها از طریق وضعیت ولتاژ ترمینال ژنراتور صادر می گردد و با توجه به مقدار ولتاژ نسبت به حالت خاص، میزان در مدار قرار گرفتن مقاومتها تعیین می گردد. علاوه بر این باید دقت نمود که میزان انرژی جذب شده توسط مقاومتها دارای محدودیت می باشند لذا به این ترتیب مدت زمان وصل مقاومتها نیز محدود می گردد. همچنین باید در نظر داشت که کل انرژی جذب شده توسط مانع های مقاومتی خیلی بزرگ نمی باشد اما اثر آنها بر روی جلوگیری از سرعت گیری ژنراتورها قابل ملاحظه می باشد.

یک سؤال که در اینجا مطرح می گردد که میزان انرژی جذب شده توسط مانع های مقاومتی بایستی چه اندازه باشد؟ پاسخ به این سؤال مشکل است اما به تجربه ثابت شده است که سیستمهایی که مانع های مقاومتی ظرفیت جذب انرژی آن بر حسب مگاژول در حدود ۱۰ درصد قدرت خروجی ژنراتور بر حسب مگاوات باشد می تواند پاسخ مناسبی جهت بهبود پایداری سیستم بدهد. روش کنترلی که برای در مدار قرار گرفتن مانع های مقاومتی از طریق مبدل فاز ac/ac تمام کنترل شده به نحوی که در شکل (۱) نمایش داده شده صورت می پذیرد.

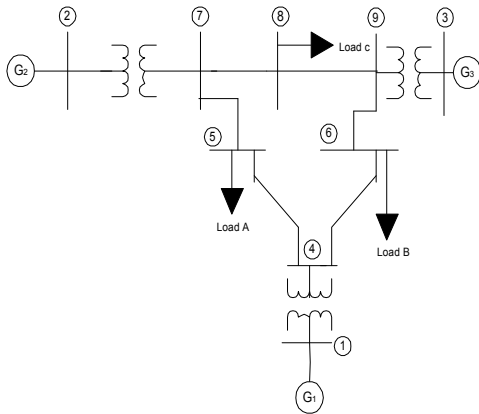
در شکل فوق هر سوئیچ نماینده سه فاز با زاویه تا خیر α عمل می نماید.

مقدار مؤثر ولتاژ فاز به نول را با V_o نشان می دهیم با تنظیم فاز یک ولتاژ سه فاز ac تولید می گردد و متوسط قدرت جذب شده توسط تاپرستور با توجه به زاویه تأخیر α از رابطه زیر تبعیت

نوسانات سیستم بعد از اختلال کمک نماید. برای میرایی هر چه بهتر دامنه نوسانات می توان از وجود جبران کننده های مدرن نظیر ASVC بهره برد که این جبران کننده ها بعد از رفع اختلال به کار می آیند و می توانند میزان انرژی جنبشی پتانسیل را افزایش دهند و به این ترتیب به جبران انرژی جنبشی باقی مانده کمک نمایند لذا در شبیه سازی از این جبران کننده استفاده شده است.

۴- نتایج حاصل از اعمال کنترل کننده در شبیه سازی

برای شبیه سازی سیستم ۹ شینه IEEE را مطابق شکل (۳) در نظر گرفته، همچنین مشخصات و اطلاعات اولیه سیستم مربوط به خطوط انتقال، پخش بار و مشخصات سه ماشین سیستم در [۱]



شکل ۲- سیستم ۹ شینه IEEE برای شبیه سازی

ارائه شده است. برای نمونه قدرت جذب انرژی مانع های مقاومتی MJ۱۰ در نظر گرفته شده است.

بر روی این سیستم مطالعه زیر صورت پذیرفته است:

- اتصال کوتاه سه فاز بر روی شین ۷ و مدت زمان اختلال ۲۱۰ میلی ثانیه می باشد. در این حالت سه وضعیت را به طور جداگانه مد نظر قرار داده ایم. وضعیت اول مربوط به زمانی است که سیستم هیچ نوع کنترلی نداشته باشد در این حالت همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است شکل رفتار زاویه نوسان ماشین سوم نسبت به ماشین مبنا مشابه یک سیستم ناپایدار است و در شکل (۴) نمودار صفحه فاز ماشین سوم نسبت به ماشین مبنا این وضعیت را بیشتر نمایان می سازد در صورتی که در شکل (۳) سیستم دارای کنترل bang-bang و بهینه به سمت پایداری میل می کند و در حالت کنترل بهینه دامنه نوسانات سریعتر مستهلک می گردد و این بیانگر قدرت روش به کار رفته می باشد.

پتانسیل در این حالت بیشتر از انرژی جنبشی کسب شده در زمان اختلال باشد سیستم پایدار در غیر اینصورت ناپایدار است حال اگر از مانع مقاومتی استفاده شود رابطه (۳) به صورت زیر قابل بیان است:

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d\omega_i}{dt} + D_i \omega_i + P_{Bi} = P_{mi} - P_{ei} \quad i=1,2,\dots,n \quad (۴)$$

که P_{Bi} مقدار قدرت جذب شده توسط مانع مقاومتی می باشد در اینجا مشخص است که هر چقدر قدرت جذب شده توسط مانع مقاومتی بیشتر باشد از افزایش انرژی جنبشی سیستم جلوگیری می نماید اما به دلیل محدودیت جذب انرژی به دلایلی که ذکر شد نمی توان این انرژی را به صورت کامل جذب نمود اما با توجه به جلوگیری از افزایش بیش از اندازه انرژی جنبشی میتوان ادعا نمود که به طریقی زمان بحرانی رفع خطا افزایش یافته لذا امکان دستیابی به پایداری را افزایش داده ایم.

مانع های مقاومتی نه تنها در جذب انرژی جنبشی در زمان اختلال مؤثر می باشند بلکه آنها می توانند دامنه نوسانات را بعد از رفع اختلال میرا کنند. استراتژی کنترل در این حالت برای قدرت تلف شده توسط مقاومتها می تواند به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$P_{Bi} = S_i K_i e \omega_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (۵)$$

که در آن ω به صورت زیر تعریف می گردند.

که در آن δ و ω به صورت زیر تعریف می گردند:

$$S = \begin{cases} 1 & \omega > 0 \\ 0 & \omega < 0 \end{cases} \quad (۶)$$

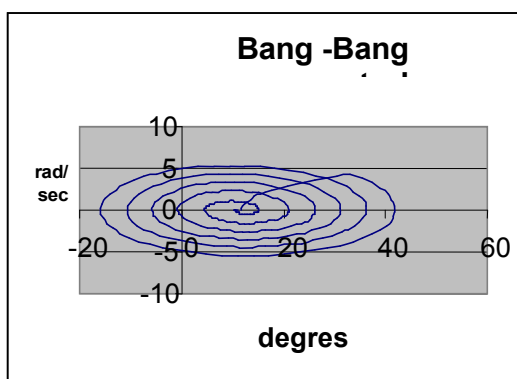
$$e = \begin{cases} 1 & t > t_{cl} \\ e^{-B(t-t_{cl})} & t > t_{cl} \end{cases} \quad (۷)$$

در رابطه (۵)، K_i میزان مجاز افزایش ضریب میرایی را نشان می دهد و t_{cl} زمان رفع خطا می باشد. مؤلفه نمایی در عبارت بالا به این دلیل در نظر گرفته شده که مانع مقاومتی در یک زمان کوتاه به صورت مستقیم عمل می نماید و پس از گذشت زمان مشخص این ضریب میرایی بایستی کاهش یابد تا از به هدر رفتن بیشتر انرژی جلوگیری گردد. نکته قابل توجه این است که در اینجا کنترل به صورت غیر خطی می باشد ولی کنترل آن به صورت پیوسته می باشد. همچنین لازم به ذکر است به دلیل آنکه زمان عملکرد مانع مقاومتی کوتاه می باشد نمیتوان انتظار داشت که حالت تعادل سیستم مطابق زمانی باشد که مانع مقاومتی خارج از سیستم می باشد. با توجه به روابط (۴) و (۵) می توان رابطه زیر را داشت:

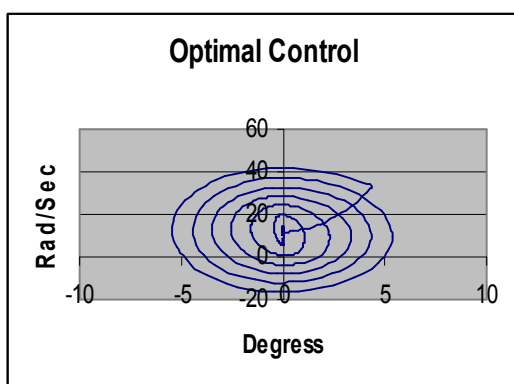
$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d\omega_i}{dt} + (D_i + S_i K_i e) \omega_i = P_{mi} - P_{ei} \quad i=1,2,\dots,n \quad (۸)$$

رابطه (۸) دقیقاً نشان می دهد که میرایی ماشینها به اندازه

$S_i K_i e$ اضافه گردید که این ضریب می تواند در مستهلک نمودن



شکل ۵- نمودار صفحه فاز ماشین ۳ نسبت به ماشین مبنا در حالت کنترل bang-bang



شکل ۶- نمودار صفحه فاز ماشین ۳ نسبت به ماشین مبنا در حالت کنترل بهینه

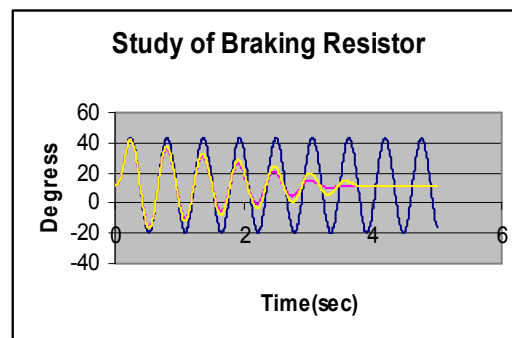
مقاومتی به این ترتیب می توانند از ناپایدار شدن سیستم جلوگیری نمایند.

- با توجه به ظرفیت محدودیت جذب انرژی مانع های مقاومتی با توجه به محدودیت های حرارتی می توان این محدودیت را در شبیه سازی دخالت داد و با توجه به آن میزان جذب انرژی این مانع های مقاومتی را محدود نمود تا از آسیب رسیدن به آنها جلوگیری نمود.

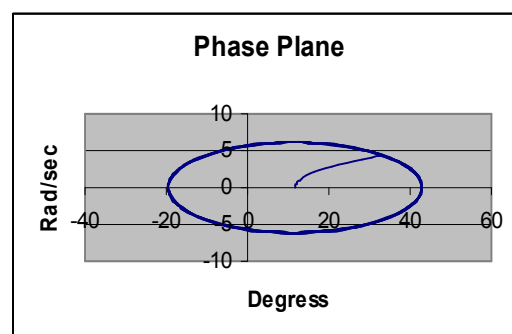
- با توجه به استراتژی کنترل پیوسته با استفاده از مانع های مقاومتی و جبران کننده ها تا حد زیادی دامنه نوسانات را نسبت به کنترل bang-bang کاهش داد و نتایج شبیه سازی نیز حاکی از این مطلب می باشد.

- طراحی مانع های مقاومتی می تواند به سیستم کنترل قابلیت اطمینان بیشتری ببخشد و با طراحی مناسب کنترل مقاوم می توان اندازه مانع مقاومتی بهینه را انتخاب نمود و با این طرح مناسب وابستگی سیستم را به نقطه کار از بین برد.

- کنترل تاپرستورها در مانع های مقاومتی را می توان به صورت on-line به کار برد و سرعت عمل سیستم را به این طریق بالا برد.



شکل ۳- نمودار زاویه نوسان ماشین ۳ نسبت به ماشین مبنا در سه وضعیت بدون کنترل و کنترل BangBang و کنترل بهینه



شکل ۴- نمودار صفحه فاز ماشین ۳ نسبت به ماشین مبنا در حالت بدون کنترل

در شکل (۵) و (۶) نمودار صفحه فاز ماشین سوم نسبت به ماشین مبنا در حالت کنترل bang-bang و کنترل پیوسته رسم گردیده است. در این حالت فرض بر این است که مانع مقاومتی و جبران کننده با توجه به استراتژی بهینه تعیین می گردد همان طور که در شکل (۶) رسم شده است در این حالت سیستم رفتار مناسبی از خود نشان می دهد و سیستم به نقطه تعادل میل می نماید. لازم به ذکر است که در این مطالعه فوق باتوجه به اینکه اختلال بیشتر بر زاویه نوسان ماشین سوم تأثیر بیشتری می گذارد لذا رفتار این ماشین بررسی گردید.

در این حالت مشاهده گردید که حالت کنترل بهینه در میرایی دامنه نوسانات و رساندن سیستم به نقطه تعادل نقش مؤثرتری نسبت به کنترل bang-bang دارد که این حالت کارائی روش به کار گرفته را نشان می دهد.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

با بررسی کلی و شبیه سازی صورت گرفته نتایج زیر را می توان استنتاج نمود:

- مانع های مقاومتی می توانند انرژی سرگردان سیستم که سبب شتاب گرفتن ژنراتورها می گردد را جذب کنند و مانع های

با توجه به ظرفیت محدود مانع های مقاومتی سعی شود که اندازه این مانع ها با بالاترین کارایی حداقل باشد تا در جاهایی که مشکلات زمین وجود دارد مسأله ای از این حیث بروز ننماید. میزان و محل مانع های مقاومتی با توجه به معیار بهینه تعیین گردد.

۶- مراجع

- [۱] M.SHELTON "BPA 1400MW Braking Resistor" IEEE Trans,1975,Vol pas-88,PP-602-609
- [۲] A.Rahim "A closed loop quasi-optimal Dynamic Braking resistor and shunt reactor control strategy or transient stability" IEEE Trans on pws,VOL3 No3,Aug 1988,pp879-886
- [۳] W.Johann "Design and Experimental Evaluation of the loss tree Braking Resistor for Application in integrated converter machine systems" IEEE,Power system 1988,pp.626-632
- [۴] A.Rahim "optimal switching of dynamic braking resistor reactor or capacitor for transient stability of power system" IEEE Proceeding, Vol 138,No1,Jan.1991.
- [۵] J. SHT " Augmentation of transient stability limit of power system by automatic multiple application of dynamic braking " IEEE Trans, Nov. 1985,PWRS-104,pp3004-3012.
- [۶] A.Mehdi "Improvement of transient stability limitation Microprocessor Controlled Dynamic Braking System " IEEE 1991,PP131-1320
- [۷] J.W.kolar "A Novel Concept for regenerative Braking of PWM Employing a loss tree Braking resistor" in Record of the 12 IEEE Conference, Feb pp.305-310,1997.
- [۸] V.Mansoor "Braking resistor application and experience" Canadian Electrical Association, spring Meeting, March 1983.

۷- پی نوشتها

- ۱- Braking Resistor
- ۲- Domain of Attraction