

## طراحی کنترل کننده ساختار متغیر فازی در اتصال HVDC جهت بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت AC-DC

کوروش رحمانی      گئورگ قره پتیان      مهدی کراری

دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
تهران-ایران

**چکیده** - این مقاله ارائه دهنده روش کنترل ساختار متغیر فازی برای اتصال HVDC جهت پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت AC-DC است. ابتدا مدل دینامیکی سیستم، با بدست آوردن معادلات غیر خطی و سپس خطی سازی آنها بدست می آید و سپس کارایی کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با پایدارساز بهینه و فازی بحث می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کنترل کننده ساختار متغیر فازی میرایی بهتری نسبت به پایدار ساز معمولی و فازی دارد.

**کلیدواژه:** کنترل فازی، کنترل ساختار متغیر، سیستم قدرت AC-DC، پایداری دینامیکی

### ۱-مقدمه

بیش از سه دهه است که از مدولاسیون توان در اتصال HVDC برای میراسازی نوسانات الکترومغناطیسی در سیستم قدرت AC-DC استفاده می شود. نتایج بدست آمده از تحقیقات محققین بر روی این سیستم ها نشان داده است، که می توان سیگنال سرعت ژنراتور، توان و یا جریان سیستم AC را به عنوان سیگنال مدولاسیون استفاده کرد [۱].

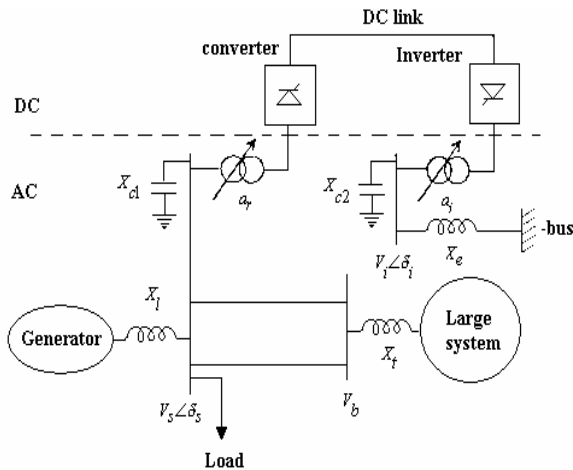
مدولاسیون توان، اولین بار در اتصال روخانه Eel در کشور کانادا به کار گرفته شد. در این طرح برای اولین بار از Valve-های (دریچه های) تایریستوری استفاده شد. در موارد دیگر دیده شد که، اگر در سمت اینورتر، یک سیستم AC ضعیف موجود باشد، برای بهبود پایداری ولتاژ ممکن است که از مدولاسیون زاویه خاموشی، برای کمک به مدولاسیون توان نیز استفاده کرد [۲].

برای سیستم های AC-DC استفاده از مدولاسیون توان DC برای پایداری، باعث تغییر گذرا و لحظه ای فرکانس و دامنه ولتاژ کموتاسیون می شود [۱]. این عمل باعث شیفت عبور از صفر ولتاژ کموتاسیون مبدل می شود. این عمل ممکن است باعث ناپایداری و فروپاشی اتصال DC در اثر تکرار خطای کموتاسیون شود. به بیان دیگر برای اطمینان به عملکرد مطمئن اتصال DC و مینیمم سازی نوسانات، بهترین راه ثابت نگهداشتن ولتاژ سمت AC مبدل در طول زمان کموتاسیون می باشد [۳].

برای برقراری این اصل، تعدیل بین مدولاسیون توان اکتیو و راکتیو با استفاده از سیگنال ورودی مبدل پیشنهاد شده

$$\dot{E}' = \frac{x_d - x'_d}{\tau'_{d0}} \left[ \frac{E_f - E'}{x_d - x'_d} - \frac{E'}{x'_d} + \frac{V_s \cos(\delta - \delta_s)}{x'_d} \right] \quad (3)$$

برای مدل سازی دقیقتر می توان معادلات تحریک را نیز به این روابط افزود [۳].



شکل (۱): سیستم قدرت AC-DC

## ۲-۲- مدل اتصال HVDC

استراتژی معمول کنترل خط HVDC شامل تأمین زاویه آتش برای کنترل کننده جریان در یکسوساز و کنترل زاویه خاموشی در سمت اینورتر است. جزئیات دقیقتر بدست آمدن سیگنال  $\Delta u$  از فرکانس سیستم AC در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۲) معادلات دینامیکی کنترل زاویه آتش مبدل به صورت زیر بدست می آید [۴]:

$$\dot{\theta}_r = \frac{K_r(I_{dcr} - I_{dc} + \Delta u)}{T_r} - \frac{\theta_r}{T_r} \quad (4)$$

$$\Delta u = f_w(w, w_0) \quad (5)$$

معادله کنترل زاویه خاموشی مبدل نیز به صورت زیر است:

$$\dot{\gamma}_i = K_i \frac{(9I_{dcr} - I_{dc})}{T_i} - \frac{\gamma_i}{T_i} \quad (6)$$

است [۳و۱]. Groude برای انجام این کار از روش فیلتر کالمن استفاده کرده است. همچنین Vovos و Golars از روش طراحی رویترگر همراه با فیلتر کالمن استفاده کرده اند. اشکال این دو روش این است که، خواص دفع اغتشاش و حساسیت نسبت به تغییر پارامترها را ندارند [۳]. روش بعدی برای انجام این کار استفاده از تئوری کنترل بهینه بود. مشکل اصلی این روش انتخاب ماتریس های وزنی R و Q در تابع معیار می باشد [۱].

در جهت رفع اشکالات فوق، در این مقاله ابتدا مدل کلی سیستم AC-DC همراه با دینامیک های مربوطه به صورت غیر خطی مطرح می شود. سپس این معادلات حول نقطه کار خطی شده و مدل فضای حالت آن بدست می آید. بعد از بحث تئوری کنترل کننده فازی و ساختار متغیر، به طراحی کنترل کننده به روش فازی پرداخته خواهد شد. در نهایت نیز کنترل کننده ساختار متغیر فازی (FSM) (Fuzzy Sliding Mode) به سیستم اعمال می شود و عملکرد آنها در مقایسه با کنترل بهینه بحث خواهد شد.

## ۲- مدل سازی

### ۲-۱- مدل ژنراتور سنکرون

در مدل سازی ژنراتور فرض میکنیم که یک ژنراتور به یک باس با زاویه  $\delta_s$  وصل است (شکل ۱). با استفاده از مدل ساده شده ژنراتور که در آن از ولتاژ  $E'$  و راکتانس گذرای  $x'_d$  استفاده شده است، معادلات دینامیکی ژنراتور را می توان به صورت زیر نوشت. تعاریف پارامترهای استفاده شده در روابط زیر، در [۴] آمده است.

$$\dot{\delta} = w - w_0 \quad (1)$$

$$\dot{w} = P - \frac{E'V_s}{X'_d + X_1} \sin(\delta - \delta_s) - Dw \quad (2)$$

معادلات (۸) و (۹) بیان کننده معادلات توان اکتیو و راکتیو در باس  $V_S$  هستند. در این دو معادله  $B_{sr}$  سوپتانس کل در باس مبدل  $V_S$  و  $X_f$  راکتانس معادل سیستم بزرگ (باس بینهایت) است که به باس بار  $V_b$  وصل است.

### ۳- نمایش فضای حالت

روش ما برای طراحی کنترل کننده برای سیستم HVDC بر اساس روش فضای حالت است. برای این کار متغیرهای فضای حالت را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$X = [\delta \ w \ \dot{E}' \ I_{dc} \ \alpha \ \gamma], \quad u = \Delta u \quad (10)$$

که در این رابطه  $\delta$  زاویه روتور،  $w$  سرعت،  $E'$  ولتاژ گذرای داخلی ماشین،  $I_{dc}$  جریان DC،  $\alpha$  زاویه آتش،  $\gamma$  زاویه خاموشی و  $u$  ورودی سیستم می باشد.

معادلات (۱) تا (۹) معادلات غیر خطی به شکل  $\dot{X} = f[X, u]$  هستند. با خطی سازی این معادلات می توان معادله فضای حالت را به صورت زیر نوشت:

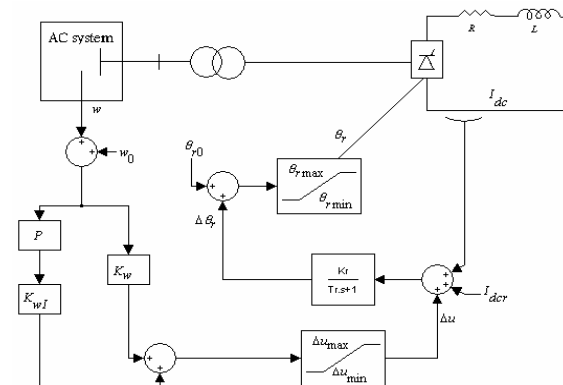
$$\delta \dot{X} = A \delta X + B \delta U \quad (11)$$

$$\delta X = X - X_0, \delta U = U - U_0 \quad (12)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{12} & -D & d_{23} & 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & 0 & a_{33} & d_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{66} & d_{67} & d_{68} \\ 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{86} & 0 & a_{88} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B^t = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ a_{76} \ 0] \quad (14)$$

تعریف درایه های معادلات (۱۳) و (۱۴) در [۴] آمده است.



شکل (۲): کنترل کننده جریان یکسو کننده

### ۲-۳- مدل سیستم AC-DC

بلوک دیاگرام سیستم قدرت AC-DC نمونه، که در شبیه سازی از آن استفاده شده است، در شکل (۱) نشان داده شده است. خط DC را با یک R,L مدل می کنیم. معادله پاسخ مرتبه اول، برای جریان DC و دینامیک های آن به صورت زیر است:

$$T_{dc} \dot{I}_{dc} = K_{1r} \frac{(a_r B_r \cos \theta_r - a_i V_i \cos \gamma_i)}{R_d} - \frac{[K_{2r}(X_r - X_i) + R] I_{dc}}{R} \quad (7)$$

که در آن  $T_{dc} = \frac{L}{R}$  ثابت زمانی سیستم DC است.

محققین نشان داده اند که، اگر شرایط شبه ماندگار برای اتصال DC فرض شود، می توان از مدل های حالت ماندگار آن برای محاسبه ولتاژها و جریان های AC و DC استفاده نمود [۳]. در نتیجه چندین معادله غیر خطی در اثر تداخل DC با AC در سمت یکسوساز بدست می آید.

$$\frac{E' V_s}{X'_d + X_1} \sin(\delta - \delta_s) - P_{dc} - P_L - \frac{V_s V_b \sin(\delta_s)}{X_2 + X_t} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{E' V_s}{X'_d + X_1} \cos(\delta - \delta_s) - P_{dc} \tan(\psi) - Q_L = 0 \quad (9)$$

$$-V_s^2 \left( \frac{1}{X_2 + X_t} + \frac{1}{X'_d + X_1} - B_{sr} \right) - \frac{V_s V_b \cos(\delta_s)}{X'_d + X_1} = 0$$

#### ۴- طراحی کنترل کننده مد لغزشی برای سیستم AC-DC

بیش از دو دهه است که از روش ساختار متغیر برای بدست آوردن پایداری مقاوم در الکترونیک قدرت و درایوها استفاده شده است. فکر استفاده از تئوری مد لغزشی به وسیله یک دانشمند روسی عنوان شد [۵]. در این روش حالت های سیستم توسط قانون کنترل روی مسیر از پیش تعیین شده ای (خط یا سطح لغزش) قرار می گیرند و با دینامیک مشخصی که توسط طراح تعیین می شود و می تواند غیر از دینامیک سیستم باشد، به سمت نقطه مورد نظر (مبدأ) پیش می رود [۶]. یکی از معایب بزرگ این روش که دارای سیگنال های گسسته می باشد، مشکل چترینگ (chattering) است. این مشکل بوسیله تأخیرهایی که در خود سیستم وجود دارد، تقویت می شود. اگر اغتشاش وارد شده به سیستم دارای علامت معین باشد، در هر لحظه با اعمال قانون کنترل معین، می توان اثر این اغتشاش را از بین برد. برای از بین بردن و کم کردن اغتشاش از تابع علامت می توان استفاده کرد [۷]. مهمترین خواصی که باعث شده است این روش توسعه پیدا کند، دقت زیاد-پاسخ دینامیکی سریع-پایداری خوب-آسانی در پیاده سازی و پایداری مقاوم خوب می باشد [۵].

طراحی سیستم های ساختار متغیر شامل دو مرحله زیر است:  
الف: تعیین سطوح کلید زنی به طوریکه پایداری و رفتار مورد نظر تأمین گردد.

ب: تعیین زیر سیستم های کنترلی بطوری که مسیر حالت سیستم به سمت یک سطح لغزش مطلوب برود و شرایط لازم مربوطه را تأمین کند.

سطح لغزش صفحه ای است که دینامیک سیستم ساختار متغیر در دو سمت آن به گونه ای است که مسیر حالت بر روی آن هدایت شده و رفتار مطلوب و پایدار ارائه می کند.

سیستم دینامیکی با معادلات حالت زیر در نظر می گیریم:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (15)$$

که در آن  $u$  بردار کنترل فیدبک حالت است.

$$u = -k^T x = -\sum_{j=1}^{n-1} k_j x_j \quad (16)$$

و  $k$  بر حسب مقدار متغیر حالت می تواند تغییر کند. اگر بالای صفحه لغزش که از مبدا میگذرد را در نظر می گیریم:

$$\delta(x) = c^T x = 0 \quad (17)$$

معادلات حالت به فرم کانونیکال عبارت است از:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_{i+1} = x_1^{(i)} \quad i = 1, n-1 \quad (18)$$

در دسته معادله فوق

$$\frac{dx_n}{dt} = -\sum_{j=1}^n a_j x_j + Bu \quad (19)$$

می باشند، که در آن  $x_1^{(i)}$  مشتق  $i$  ام متغیر حالت  $x_1$  است.

با توجه به معادله (۱۸) معادله لغزش به فرم زیر است:

$$\Delta(x) = c_n x_1^{(n-1)} + \dots + c_1 x_1 = 0 \quad (20)$$

چنانچه با فیدبک های مناسب شرایط لازم جهت حرکت مسیر حالت، بر روی بالای صفحه را بدست آوریم، آنگاه پاسخ دینامیکی سیستم بر روی این سطح، به تغییرات  $A$  و  $B$  غیر حساس می شود و کنترل مقاوم بدست می آید.

برای تعیین فید بک  $k$  از تابع لیاپانف زیر جهت بدست آوردن پایداری و مد لغزش استفاده می کنیم:

$$v(x) = \frac{1}{2} \delta(x)^2 = \frac{1}{2} (c^T x)^2 \quad (21)$$

اگر مشتق تابع لیاپانف منفی باشد، شرایط پایداری در بالای صفحه برای سیستم تضمین می شود.

$$(22)$$

$$\frac{dv(x)}{dt} < 0 \quad \delta(x)c^T Bx_i > 0 \quad k_i = \alpha_i > a_i$$

$$\delta(x)c^T Bx_i > 0 \quad k_i = \beta_i > a_i$$

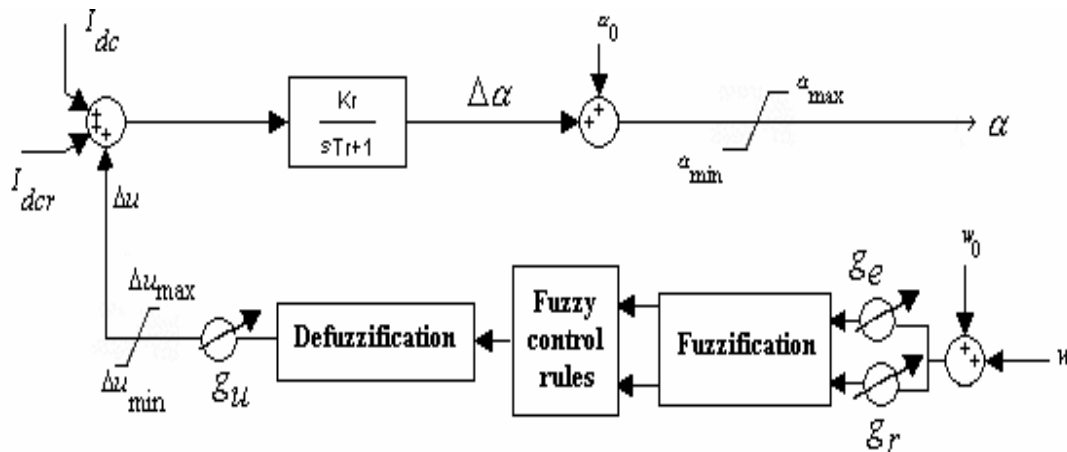
یک تغییر می کند مشخص می شود. کنترل فازی اساساً غیر خطی است [۸].

کنترل فازی که در این مقاله بحث می شود، دارای ورودی های  $\Delta w$  و  $\Delta \dot{w}$  می باشد. که  $\Delta w$  سیگنال تغییر سرعت ژنراتور است که به کنترل پایدارساز تنظیم کننده جریان DC فرستاده می شود. ورودی کنترل کننده فازی بر اساس شکل (۳) به صورت زیر است:

$$\Delta w(nT) = w(nT) - w_0 \quad (24)$$

$$\Delta \dot{w}(nT) = [\Delta w(nT) - \Delta w(nT - T)]/T \quad (25)$$

که  $T$  پریود نمونه برداری و  $n$  یک عدد مثبت است.



شکل (۳): ساختار کنترل کننده فازی

احتیاج به مقادیر غیرفازی دارد. با دیفازی سازی می توان بر این مشکل فائق آمد. با استفاده از روش دیفازی سازی، خروجی دیفازی شده به شکل زیر بدست می آید:

$$dU = \frac{\alpha_2 dU_2 + \alpha_3 dU_3}{\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2} \quad (28)$$

که  $dU_2, dU_3$  مقدار خروجی کنترل هستند، که ورودی یک دارند. مقدار  $g_u$  بوسیله طراحی بدست می آید و مقدار  $g_e, g_r$  بوسیله مینیمم سازی تابع زیر بدست می آید [۹]:

$$J = \int_0^t [\Delta V_t^2 + \Delta w^2] dt \quad (29)$$

که در این صورت ضرائب فیدبک بدست می آیند. که در معادله فوق  $a$  برابر است با:

$$a = \frac{c^T A}{c^T B} \quad (23)$$

به این ترتیب ضرائب فیدبک و سطوح کلید زنی تعیین می گردد [۵].

## ۵- کنترل فازی

تئوری کنترل فازی بوسیله شخصی به نام زاده ارائه شده است. مجموعه فازی بوسیله یک تابع عضویت که از صفر تا

ورودی و خروجی فازی شده کنترل کننده فازی به صورت زیر است:

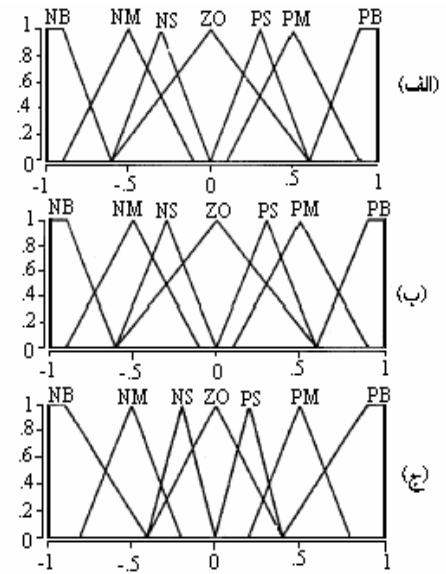
$$dU(nT) = F[\Delta u(nT)] \quad (26)$$

$$u(nT) = u(nT - T) + g_u DF(dU(nT)) \quad (27)$$

که  $DF, F$  بیان کننده فازی کردن و دیفازی کردن می باشد و  $dU(nT)$  بیانگر افزایش خروجی فازی ناشی از دیفازی سازی خروجی مجموعه فازی در زمان نمونه برداری  $nT$  می باشد.  $g_u, g_r, g_e$  گین های خطا، تغییر در خطا و خروجی کنترل می باشند. الگوریتم فازی شده خطی برای خطا و تغییر در خطا در شکل (۴) نشان داده شده است. خروجی کنترل کننده فازی یک مجموعه از کنترل فازی است. دستگاه معمولاً

E \ CE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
NM	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB
NS	PB	PM	PS	PB	PS	ZO	NS
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PS	PM	NS	NB	NS	NM	NB
PM	NB	NM	NM	NM	NM	NB	NB
PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

(د)



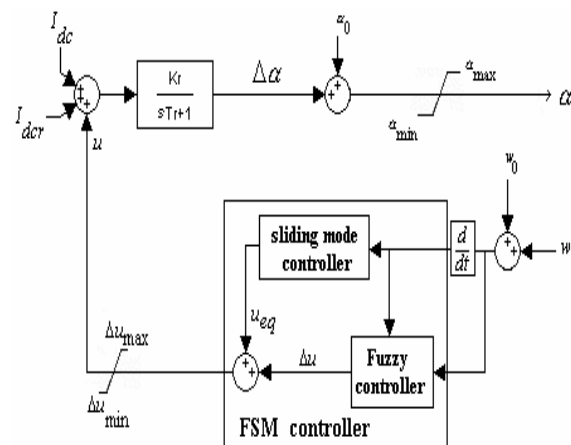
شکل (۴): فازی شده (الف) خطا (ب) تغییر در خطا (ج) خروجی کنترل، (د) قوانین کنترل فازی

### ۷- نتایج شبیه سازی

ابتدا مدل تک ماشین به شین بینهایت را در نظر می گیریم. شکل (۶) پاسخ ها را در چنین حالتی و بدون خط DC نشان می دهد. با توجه به این دو پاسخ مشخص است که سیستم در این نقطه کار ناپایدار است. برای پایداری از خط DC به موازات خط AC مطابق شکل (۱) استفاده می کنیم. به منظور بررسی عملکرد کنترل کننده ساختار متغیر فازی بر روی شبکه نمونه شکل (۱)، طبق مدل دینامیکی استخراج شده، شبیه سازی و بر روی آن کنترل کننده را، طبق توضیحات بیان شده، اعمال می کنیم. کارایی دو نوع کنترل کننده فازی و ساختار متغیر فازی بر روی سیستم نمونه به کمک شبیه سازی و با استفاده از نرم افزار MATLAB6.1 بحث می شود. داده های سیستم و نقطه کار سیستم در ضمیمه آورده شده اند. برای طراحی کنترل کننده بهینه از مقادیر بیان شده برای ماتریس های Q و R [۴] استفاده شده است. برای مقایسه، شکل موج های خطای سرعت ( $\Delta w$ ) (پریونیت)، خطای زاویه روتور ( $\Delta \delta$ ) (رادیان)، جریان dc ( $I_{dc}$ ) (پریونیت) و زاویای آتش ( $\alpha$ ) و خاموشی ( $\gamma$ ) بر حسب درجه در شکل (۷) نشان

### ۶- کنترل سیستم AC-DC با استفاده از FSM

شکل (۵) بلوک دیاگرام سیستم کنترل AC-DC را با استفاده از FSM نشان می دهد. سیگنال خطای ناشی از تفاوت سیگنال سرعت مرجع از سرعت واقعی، سیگنال خطای  $x_1$  را تولید می کند. سیگنال کنترل از رابطه  $u = u_{eq} + \Delta u$  بدست می آید. برای محاسبه  $u_{eq}$  از کنترل ساختار متغیر استفاده می شود و برای  $\Delta u$  از منطق فازی استفاده شده است.



شکل (۵): کنترل مد لغزشی فازی سیستم AC-DC



## ۸- نتیجه گیری

میراسازی نوسانات سیستم AC-DC می باشد. ولی در صورتی که اغتشاش نیز به سیستم وارد شود، کنترل کننده ساختار متغیر فازی بسیار کارآمدتر است. کنترل کننده ساختار متغیر فازی دارای میرایی بهتری نسبت به کنترل کننده فازی تنها می باشد. این کنترل کننده دارای پایدار مقاوم بسیار بهتری است و در اثر اغتشاش های ناشی از تغییرات بار روی سیستم، دارای پایداری مقاوم بسیار خوبی است.

این مقاله بیانگر یک روش جدید طراحی پایدارساز، برای یک اتصال HVDC، با استفاده از روش ساختار متغیر فازی می باشد. کنترل کننده فازی شامل دو ورودی تغییرات سرعت و مشتق تغییرات سرعت است. در روش ساختار متغیر به داشتن مدل ریاضی دقیق از سیستم AC-DC برای طراحی کنترل کننده، نیاز است. در صورتی که کنترل کننده فازی به چنین مدلی از سیستم نیاز ندارد. کنترل کننده فازی به تنهایی قادر به

### ضمیمه: پارامترهای سیستم و نقاط کار

ژنراتور و AVR (pu)  $T_e = 0.15$   $K_e = 50$   $H = 2.5$   $\tau'_{do} = 4.314$   $x'_d = 0.17$   $x_q = 1.53$   $x_d = 1.6$

ترانسفورماتور و سیستم AC-DC (pu)  $\theta_e = 75^\circ$   $Z_e = 0.5$   $X_{dc} = 0.4$   $R_{dc} = 0.14$   $x_1 = 0.125$   $x_2 = 0.2$   $x_i = 0.01$   $a_r = 1$   $a_i = 1$   $X_{c1} = 4$   $X_{c2} = 4$

یکسو کننده و اینورتر (pu)  $\gamma_{min} = 12^\circ$   $\gamma_{max} = 40^\circ$   $\alpha_{min} = 7^\circ$   $\alpha_{max} = 70^\circ$   $T_i = 0.05$   $K_i = 1$   $T_r = 0.05$   $K_r = -1$

نقطه کار  $\gamma = 15^\circ$   $\alpha = 15^\circ$   $P_{dc} = 0.2$   $Q_s = 0.436$   $P_s = 0.9$   $V_s = 0.9552$

Industry Applications, Vol.IA-23, NO-2, March/April 1987, pp(283-295)

[6] B.K.Bose, "Power Electronics & Variable Frequency Drive", Book, IEEE Press 1989

[7] Duk-Heon Kim, Hack-seong Kim, Jae-Mun Kim, "Induction Motor Servo System Using Variable Structure Control", IEEE Trans. On Automatic Control, 1996, pp(997-082)

[8] G.C.D.Sousa, B.K.Bose, "A Fuzzy Set Theory based Control of a Phase Controlled Converter DC Machine Drive", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.IA-30, No-1, January/February 1994, pp(34-44)

[9] P.K.Dash, S.Rahman, "An Adaptive Fuzzy Logic Controller for AC-DC Power Systems", IEEE Trans. on Automatic Control, 1993, pp(218-223)

[10] M.Sakr, "Variable Structure Stabilizer For Power System", 11<sup>th</sup>, Con. Modeling and Identification, Egypt, 1986

### مراجع:

[1] Y.Y.Hsu, L.Wang, "Damping of a Parallel AC-DC Power System Using PID System Stabilizers and Rectifier Current Regulators", IEEE Trans. on energy conversion, Vol.3, No.3, September 1988, pp(540-547)

[2] K.R.Padyar, HVDC Power Transmission Systems, Book Wiley Eastern, 1992

[3] P.K.Dash, A.C.Liew, A.Routray, "Design of Robust Controllers for HVDC Links in AC-DC Power Systems", Electric Power System Res, 1995, pp(201-209)

[4] A.S.Alfuhid, M.S.Mahmoud, M.A.Al-Syed, "Modeling and Control HVDC Power System", Electric Power System Res, 1998, pp(787-781)

[5] C.Namuduri, P.C.Sen, "A Servo-Control System Using a Self Controlled Synchronous Motor (SCSM) with Sliding Mode Controller", IEEE Transaction on