

## طراحی بهینه کنترل کننده های فازی و PI برای SVC جهت میرا کردن نوسانات ولتاژ پایانه ژنراتور سنکرون

محمد رضا صفری تیرتاشی

سعید جلیل زاده

دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان

واژه های کلیدی: منطق فازی، کنترل کننده PI، PSO، SVC

### چکیده

SVC یکی از پرکاربردترین ادوات FACTS می باشد که برای جبران سازی موازی به کار گرفته می شود و در بالا بردن پایداری گذرا، محدود کردن نوسانات فرکانس پایین و ... کاربرد فراوانی دارد. با توجه به غیر خطی بودن معادلات حاکم بر سیستم مورد بررسی در این مقاله، ابتدا معادلات سیستم مورد نظر خطی شده، سپس کنترل کننده فازی برای SVC طراحی شده است. در مرحله بعد به جای کنترل کننده فازی از کنترل کننده PI استفاده شده است. پارامترهای بهینه این کنترل کننده توسط الگوریتم PSO بدست آمده است. هدف از طراحی کنترل کننده فازی و کنترل کننده PI بهینه برای SVC، میرا کردن سریع نوسانات ولتاژ پایانه ژنراتور سنکرون به هنگام تغییر ناگهانی در توان ورودی به ژنراتور می باشد. نتایج شبیه سازی، عملکرد بهتر کنترل کننده فازی را در مقایسه با کنترل کننده PI بهینه در میرا کردن سریع نوسانات ولتاژ نشان می دهد.

### ۱- مقدمه

یکی از فن آوری هایی که باعث استفاده بهینه از خطوط و سیستم ها و همچنین حفظ پایداری سیستم قدرت می گردد فن آوری FACTS می باشد. این فن آوری اولین بار توسط مؤسسه EPRI در سال ۱۹۸۶ مطرح گردید. ادوات FACTS به چندین گروه تقسیم بندی می شوند. SVC یکی از پرکاربردترین و ارزان ترین ادوات FACTS می باشد که در سرتاسر دنیا استفاده می شود [۱].

SVC یک مولد یا جذب کننده استاتیکی توان راکتیو می باشد که به صورت موازی متصل می شود و خروجی آن برای مبادله جریان خازنی یا القایی تنظیم می شود، طوری که پارامترهای مشخصی در سیستم قدرت (معمولاً ولتاژ شین) را حفظ یا کنترل می کند که به دو نوع عمده، یکی TCR و دیگری TSC دسته بندی می شود. در این جا از نوع TCR استفاده شده که در آن یک راکتور با یک جفت تریستور معکوس- موازی سری شده و مجموعه با خازن موازی

جدول ۱: پارامترهای سیستم

ماشین سنکرون بر حسب p.u	سیستم تحریک و خط انتقال بر حسب p.u
$X_d=1.7$	$T_A=0.05$
$X_q=1.64$	$K_A=4000$
$X'_d=0.245$	$T_F=1$
$D=0$	$K_F=0.025$
$H=2.37$	$T_E=0.95$
$\tau_{do}=5.9$	$K_E=0.17$
	$X_c=0.4$
	$R_c=0.02$

### ۳- منطق فازی

در سال ۱۹۶۵ پرفسورزاده منطق فازی را ارائه کرد. منطق فازی بعدها در زمینه‌های مختلف علم برای کنترل و بهینه سازی به کار گرفته شده است. منطق فازی به خاطر فواید زیادش نسبت به روش‌های کلاسیک موفق‌تر می‌باشد [۲ و ۳]. در سیستم قدرت، منطق فازی در مواردی از قبیل پایداری سیستم، کنترل فرکانس بار، شبکه‌های توزیع و... به کار گرفته شده است. سیستم‌های فازی، سیستم‌هایی مبتنی بر دانش یا قواعد می‌باشند. قلب یک سیستم فازی یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر-آن‌گاه فازی تشکیل شده است. ساختار اصلی سیستم‌های فازی دارای چهار قسمت اصلی می‌باشد: فازی ساز، موتور استنتاج فازی، پایگاه قواعد فازی و فازی زدا. خروجی سنسورها اعداد قطعی می‌باشند، برای انجام استنتاج فازی با فازی ساز آنها را فازی می‌کنیم. موتور استنتاج فازی قواعد اگر-آن‌گاه را به یک نگاهت از مجموعه‌های فازی در فضای ورودی به مجموعه‌های فازی در فضای خروجی بر اساس اصول منطق فازی ترکیب می‌کند. دانش مورد نیاز برای عملکرد سیستم فازی از پایگاه قواعد فازی سازی تأمین می‌شود. خروجی موتور استنتاج فازی، مجموعه‌های فازی می‌باشند که با غیر فازی ساز آنها را به اعداد قطعی تبدیل می‌کنیم.

می‌گردند. در این مقاله معادلات سیستم مورد نظر در مرحله اول خطی شده، سپس در مرحله بعد یک بار کنترل کننده فازی برای SVC طراحی شده، بار دیگر به جای کنترل کننده فازی از کنترل کننده PI که ضرایب آن توسط الگوریتم PSO بهینه گشته، استفاده شده و نتایج شبیه سازی برای این دو کنترل کننده با هم مقایسه شده است.

### ۲- مدل سیستم

در این مقاله از ماشین سنکرون که تحریک آن از نوع ۱ طبق استاندارد IEEE می‌باشد استفاده شده است. ژنراتور سنکرون به همراه خط انتقال و SVC به باس بی نهایت وصل شده است. سیستم کلی به فرم شکل (۱) می‌باشد که معادلات بیان کننده ژنراتور و سیستم تحریک به صورت زیر می‌باشند:

$$\dot{\delta} = \omega_b(\omega - 1) \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = (p_m - p_e - D(\omega - 1)) / M \quad (2)$$

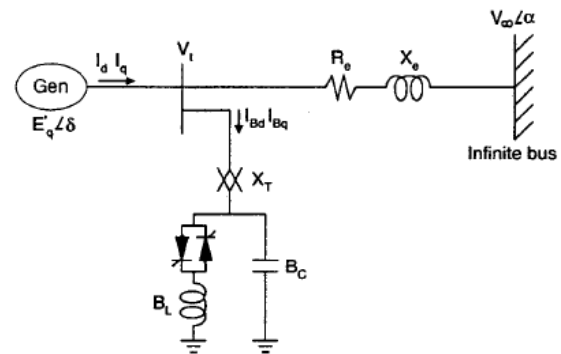
$$\dot{E}'_q = (E_{fd} - (Xd - X'd)id - E'q) / \tau'_{do} \quad (3)$$

$$E_{fd} = \frac{-K_E}{T_E} E_{fd} + \frac{1}{T_E} V_R \quad (4)$$

$$V_R = \frac{1}{T_A} [K_A V_{ref} - K_A V_t - K_A V_E - V_R] \quad (5)$$

$$V_E = \left( \frac{-K_E K_F}{T_E T_F} \right) E_{fd} + \left( \frac{K_F}{T_E T_F} \right) V_R + \left( \frac{-1}{T_F} \right) \Delta V_E \quad (6)$$

این معادلات غیر خطی می‌باشند که باید خطی گردند. ثابت‌های مربوطه در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۱: مدل سیستم کلی مورد استفاده در مقاله

## ۴- الگوریتم PSO

pbest بهترین جواب از لحاظ برازندگی است که تا کنون

برای هر ذره بطور مجزا بدست آمده و gbest بهترین مقداری است که تا کنون توسط تمام ذره‌ها در میان کل جمعیت بدست آمده است،  $w$  ضریب اینرسی بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times \text{iter} \quad (9)$$

$r_1, r_2$  اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ می‌باشند که نشان دهنده ماهیت تصادفی الگوریتم هستند. ضرایب کنترل  $c_1, c_2$  در بازه ۱ تا ۲ انتخاب می‌شوند و همواره باید  $C_1 + C_2 \leq 4$  باشد، و معمولاً  $C_1 = C_2 = 2$  انتخاب می‌شود.  $\text{iter}$  بیانگر تعداد تکرار الگوریتم می‌باشد. برای جلوگیری از واگرا شدن الگوریتم مقدار نهایی سرعت هر ذره را برای هر بعد در بازه  $[-V_{\max}, +V_{\max}]$  محدود می‌کنیم.

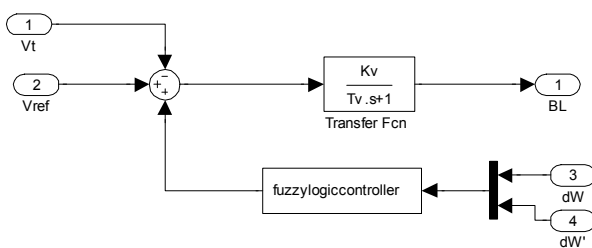
## ۵- نتایج شبیه‌سازی

برای خطی‌سازی معادلات، ابتدا معادله توان الکتریکی مطابق با معادله (۱۰)، خطی شده است  $[V]$ .

$$P_e = V_d i_d + V_q i_q \quad (10)$$

لازم به ذکر است که برای خطی کردن این معادله شرایط اولیه (نقطه کار) به صورت  $P_L = 1$  (توان اکتیو مصرفی بار) و  $Q_L = 0.59$  (توان راکتیو مصرفی بار) در نظر گرفته شده و بقیه شرایط اولیه مورد نیاز در جدول (۲) آورده شده است.

بعد از خطی‌سازی این معادله، تمام معادلات سیستم خطی شده‌اند. برای طراحی کنترل کننده فازی، تغییرات سرعت  $(dw)$  و مشتق تغییرات سرعت  $(dw')$  که از خطی‌سازی معادلات بدست آمده، به عنوان ورودی برای سیستم فازی در نظر گرفته شده، که در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲: کنترل کننده فازی برای SVC

سه دهه گذشته استفاده موثر از الگوریتم‌های تصادفی گسترش یافته است. در مقایسه با الگوریتم‌های مبتنی جستجوی تصادفی، تکنیک‌های محاسبات تکاملی از یک دسته جواب‌های ممکن به نام جمعیت، بهره برده و پاسخ بهینه را با استفاده از همکاری و رقابت میان اعضای جمعیت شناسایی می‌کنند. یکی از پر قدرت ترین الگوریتم‌های بهینه سازی مبتنی بر هوش گروهبی، بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) می‌باشد. PSO یک روش بهینه‌سازی جمعیت است که اولین بار توسط کندی و ابراهارت پیشنهاد شده است [۴و۵]. این الگوریتم از رفتار پرندگان یا ماهی‌ها در پیدا کردن غذا و روابط اجتماعی انسان‌ها الهام گرفته شده است. فرض بر این است که یک گروه از پرندگان بصورت تصادفی در یک منطقه بدنبال غذا می‌گردند، در حالیکه تنها در یک قسمت از ناحیه جستجو غذا وجود دارد. پرندگان از مکان غذا اطلاعی ندارند و تنها میزان فاصله خود تا آن محل را می‌دانند. استراتژی بکار رفته این است که پرندگان به دنبال پرنده ای حرکت می‌کنند که نزدیکترین فاصله را تا غذا دارد. در PSO هر جواب مسأله، یک پرنده است در فضای جستجو که ذره (Particle) نام دارد. این الگوریتم ماهیت پیوسته دارد و در بسیاری از بهینه سازی‌ها، کارایی خود را ثابت کرده است [۴]. بر خلاف الگوریتم ژنتیک در الگوریتم PSO عملکرد انتخاب شکل نمی‌گیرد و سادگی و نداشتن توابع پیچیده از مزایای آن می‌باشد. در این الگوریتم هر ذره با یک سرعت قابل تنظیم در فضای جستجو حرکت کرده و بهترین موقعیتی را که تا هر لحظه بدست آورده است در حافظه نگه می‌دارد و در سطح بالاتر نیز بهترین موقعیتی که توسط کل اعضای دسته بدست آمده است به تمامی اجزا مخابره می‌گردد [۶]. هر ذره می‌تواند بصورت چند بعدی با دو مقدار  $V_{id}, X_{id}$  که به ترتیب معرف مکانی و سرعت بعد  $d$  ام از  $I$  امین ذره هستند مشخص می‌شود. در هر مرحله از حرکت جمعیت، مکان هر ذره بصورت زیر به روز می‌شود.

$$V_{id}^{(t+1)} = w \times V_{id}^{(t)} + r_1 \times c_1 (pbest - X_{id}) \quad (7)$$

$$+ r_2 \times c_2 (gbest - X_{id})$$

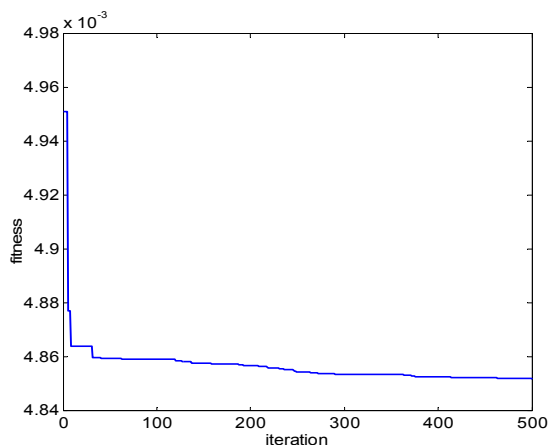
$$X_{id}^{(t+1)} = X_{id}^{(t)} + V_{id}^{(t+1)} \quad (8)$$

اعمال شده که نمودار سه بعدی خروجی سیستم فازی بر حسب متغیرهای ورودی در شکل (۴) آورده شده است. در مرحله بعد برای طراحی کنترل کننده PI بهینه، سیگنال تغییرات سرعت (dw) برای تعریف کردن تابع fitness نظر گرفته شده و تابع fitness به صورت زیر تعریف شده است [۸].

$$fitness = \sum_{i=1}^m |dw| \quad (11)$$

در این تعریف m تعداد سمپل‌هاست. تعداد جمعیت در نظر گرفته شده برای الگوریتم PSO، ۱۰ بوده که در ۵۰۰ تکرار برنامه اجرا شده است. بردار سرعت PSO به صورت جداگانه به  $K_p$  و  $K_I$  اعمال شده که سرعت مربوط به  $K_I$  بین  $+0.1$  و  $-0.1$  محدود شده است. در شکل (۵) نیز نمودار fitness بر حسب تکرار (iteration) رسم شده است.

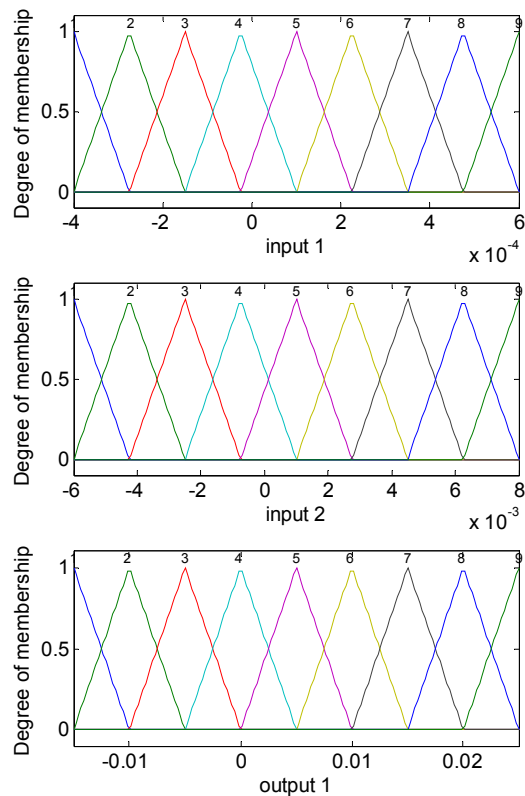
مقادیر بهینه محاسبه شده به صورت  $K_p = 43/0.7$  و  $K_I = 1/15$  می‌باشند. بعد از طراحی کنترل کننده فازی و کنترل کننده PI بهینه برای SVC، سیستم مورد نظر با هر کدام از این کنترل کننده‌ها شبیه سازی شده که در شبیه سازی‌ها، توان ورودی به ژنراتور ۳٪ تغییر کرده و ولتاژ پایانه ژنراتور به عنوان پاسخ سیستم نشان داده شده است. در شکل (۶) ولتاژ پایانه ژنراتور برای هر دو کنترل کننده به ازاء ۳٪ تغییر در توان ورودی به ژنراتور رسم شده است. رنگ آبی مربوط به کنترل کننده فازی و رنگ قرمز مربوط به کنترل کننده PI بهینه می‌باشد.



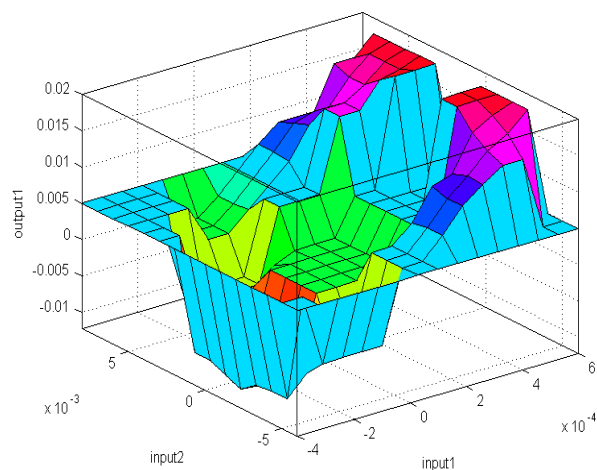
شکل ۵: fitness بر حسب تکرار

جدول ۲: شرایط اولیه

$K_V$	$T_V$	$B_C$	$X_T$	$B_{L0}$
[P.U]	[P.U]	[P.U]	[P.U]	[P.U]
10	0.15	0.6	0.08	-0.45



شکل ۳: توابع عضویت

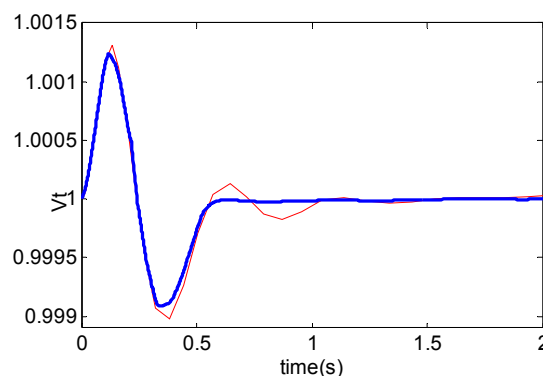


شکل ۴: نمودار سه بعدی خروجی سیستم فازی

بر حسب متغیرهای ورودی

توابع عضویت در نظر گرفته شده برای ورودی‌ها و برای خروجی سیستم فازی به صورت مثلثی بوده که در شکل (۳) رسم شده است. به تعداد ۱۹ قانون اگر-آنگاه به سیستم فازی

- [4] J. Kennedy, "the particle swarm: social Adaption of knowledge," *Proceeding IEEE International conference Evol Indian-apolis*, pp.303-308, 1997.
- [5] P. Angeline, "Evolutionary optimization versus particle swarm optimization philosophy and performance Differences," *Proceeding IEEE International conference on Evol.program*, pp.601-610, 1998.
- [6] Konstantinos, E.Parasopoulos, and Michael N.Vrahatis, "on the computation og All Global Minimizers Through particle swarm optimization," *IEEE transaction on Evolutionary computation*, Vol.8, No.3, June 2004.
- [7] S.M. Bamasak, "FACTS-BASED stabilizers for power system stability enhancement," PhD Thesis, King Fahad university of Petroleum, 2005.
- [8] Y.P. Wang, D.R Hur, H.H. Chang, N.R Watson, J. Arrillaga, and S.S. Matair, "A Genetic Algorithms Approach To Design An Optimal PI Controller For Static Var Compensator," *Proceeding IEEE International conference*, pp.1557-1562, 2000.



شکل (۶): ولتاژ پایانه ژنراتور سنکرون

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل کننده فازی و کنترل کننده PI بهینه برای SVC طراحی شده است. ضرایب  $K_P$  و  $K_I$  توسط الگوریتم PSO بدست آمده است. هدف از این طراحی‌ها، میرا کردن سریع نوسانات ولتاژ پایانه ژنراتور به هنگام تغییر ناگهانی در توان ورودی به ژنراتور بوده است. در مرحله بعد از طراحی، توان ورودی به ژنراتور ۳٪ تغییر پیدا کرده و شبیه سازی برای هر کدام از کنترل کننده‌ها صورت گرفته است. ولتاژ پایانه ژنراتور به عنوان پاسخ سیستم به تغییر در توان ورودی در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها، عملکرد بهتر کنترل کننده فازی را نسبت به کنترل کننده PI بهینه در میرا کردن سریع نوسانات ولتاژ پایانه ژنراتور نشان می‌دهد.

### مراجع

- [۱] مهدی نجار، علی اکبر قره ویسی، محمد علی صدرنیا، عباد کامیاب "بهینه سازی شبکه خراسان توسط ادوات FACTS, PSC, ۲۰۰۵.
- [2] Raviraj VSC, and sen PC, "Comparative study of proportional-integral, sliding mode, and fuzzy logic controllers for power converters," *IEEE transaction on industry applications*, pp.18-24, 1997.
- [3] K. Guesmi, N. Essounbouli, N. Manamanni, A. Hamzaoui, and J. Zaytoon, "A fuzzy logic controller synthesis for a boost converter," *Proceeding of IFAC*, 2005.