



## بهبود پایداری سیستم‌های قدرت چند ماشینه با بکارگیری کنترل فازی مقاوم بر روی SMES

رضا قاضی      سهراب نادری

دانشگاه فردوسی مشهد

ایران

واژه های کلیدی: SMES، کنترل فازی، کنترل لغزشی، روش جدول جستجوی فازی.

چکیده:

از دینامیک کنترلر فازی دیگری که بر مبنای کنترلر مد لغزشی<sup>۱</sup>، طراحی شده است، استفاده کرده و آموزش می‌بیند و بر سیستم اعمال می‌گردد، کارایی روش کنترلی پیشنهادی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی بکارگیری این کنترلر بر روی سیستم چند ماشینه نشان داده شده است.

۱- مقدمه:

طبیعت غیرخطی و پیچیدگی روزافزون سیستم‌های قدرت چالش بزرگی را فراروی مهندسان کنترل سیستم قدرت قرار داده است، از جمله این مسائل میراسازی نوسانات توان و ولتاژ می‌باشد. چنانچه سیستمی باندازه کافی از میرایی برخوردار نباشد، چنین نوساناتی می‌تواند برای دقایقی در سیستم ماندگار شده و یا حتی رشد کرده و موجب ناپایداری سیستم شود [۱]، در تلاش جهت بهبود میرایی سیستم قدرت، انواع بسیاری از پایدار کننده‌ها

یکی از کاربردهای ابررسانای ذخیره کننده انرژی مغناطیسی (SMES)<sup>۱</sup>، افزایش میرایی و بهبود پایداری سیستم‌های قدرت می‌باشد. عملکرد مؤثر این جبرانگر به میزان قابل توجهی به استراتژی کنترلی بکار رفته در آن بستگی داشته و متناسب با قوام سیگنالهای کنترلی می‌تواند عکس‌العمل مؤثری را از خود در مقابل اغتشاشات وارده به سیستم به نمایش بگذارد. در این مقاله کنترلر فازی جدیدی مبتنی بر روش جدول جستجوی فازی<sup>۲</sup>، جهت بهبود پایداری سیستم قدرت پیشنهاد شده است، هدف اصلی این روش تضمین پایداری سیستم بدون استفاده از اطلاعات زاویه بار<sup>۳</sup>، (به خاطر مشکلات عدیده‌ای که اندازه‌گیری آن در عمل بوجود می‌آورد)، به عنوان یکی از ورودیهای اصلی کنترلر بکار رفته در جبرانگر می‌باشد، کنترلر فازی پیشنهادی

۱- Superconducting magnetic energy storage

۲- Table look up scheme

۳- Load angle

۴- Sliding mode control

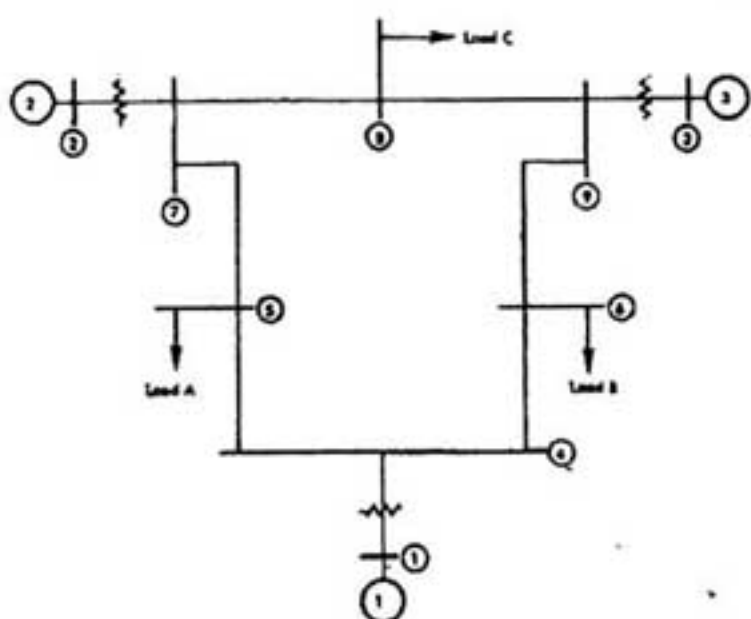
پیشنهاد شده‌اند، منجمله استفاده از انواع پایدار-سازهای سیستم قدرت (PSS) [۲-۴]، تغییردهنده‌های فاز استاتیک (SPS) [۵]، استفاده از جبران کننده‌های توان راکتیو (SVC) [۶و۷] و کنترل بهینه سیستم توربین - گاورنر. از زمان تست واحد ۳۰ مگاژولی BPA که با موفقیت همراه بود [۸] و همچنین بدلیل پیشرفت در تکنولوژی ساخت ابررساناها در دماهای بالا، استفاده از SMES در سیستم قدرت مورد توجه فراوانی قرار گرفته است [۸-۱۲]. با این وجود استفاده مؤثر از SMES به میزان فزاینده ای به استراتژی کنترلی بکار رفته در آن بستگی دارد، از اینرو انواع مختلفی از کنترلرها پیشنهاد شده و بر روی SMES بکار گرفته شده است [۱۳-۱۵]. روشی که در طراحی کنترلرهای این ادوات بکار می رود عموماً مبتنی بر مدل‌های خطی شده تقریبی ژنراتورها و جبرانگر می‌باشد، واضح که به هنگام وقوع یک اغتشاش بزرگ، رفتار سیستم به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر کرده و کنترلر طراحی شده براساس مدل خطی سیستم ممکن است نتواند پایداری کافی را تأمین کند، لذا طی سالهای اخیر تحقیقات فراوانی صورت گرفته است تا کاربرد تئوری کنترل غیرخطی را در سیستم‌های قدرت افزایش داده و از این طریق پایداری سیستم بهبود داده شود [۱۵-۱۷]. در مدل کردن سیستم قدرت علاوه بر طبیعت غیرخطی ژنراتورها، پارامترهایی مانند راکتانس معادل خطوط انتقال نیز ثابت نیستند و به طور کلی نمی‌توان تنها با سیگنالهای در دسترس آنها را بطور دقیق شناسایی کرد [۱۸]، این عدم قطعیت پارامترها، طراحی کنترلرهای سیستم قدرت را مشکل‌تر خواهد کرد [۱۹]، لذا کنترلرهایی می‌بایست بیشتر مدنظر قرار گیرند که توانایی مواجهه با این عدم قطعیت‌ها را نیز دارا باشند، از جمله این نوع کنترلرها، می‌توان به کنترلرهای مبتنی بر منطق فازی اشاره کرد. چنانچه بتوان این قبیل کنترلرهای غیرخطی را در

- ۱-Power System Stabilizers
- ۲-Static Phase Shifter
- ۳-Static Var Compensator

سیستم بکار گرفته و پایداری آن را نیز با روشهای سیستماتیک اثبات کرد می‌توان عملکرد قابل قبولی را از سیستم به هنگام بروز اغتشاشات انتظار داشت. از اینرو در این مقاله سعی شده است یک کنترلر فازی مبتنی بر ایده کنترل مدلفزشی جهت بهبود عملکرد سیستم طراحی شده و پایداری آن مورد بحث قرار گیرد. هر چند این تکنیک کنترلی، پایداری سیستم را به دلیل برآوردن شرط پایداری لیپانف تضمین می‌کند اما وابستگی آن به اطلاعات زاویه بار نقطه ضعیفی در بهره‌برداری از این سیستم کنترلی محسوب می‌شود چرا که از نظر ملاحظات عملی، مشکلاتی در اندازه‌گیری زاویه مورد نظر وجود دارد [۱۸و۲۰]. لذا جهت حذف مشکل فوق، کنترلر فازی دیگری مبتنی بر روش جدول جستجوی فازی پیشنهاد شده است که بدون نیاز به اطلاعات زاویه بار خصوصیات برجسته کنترلر لغزشی را که تضمین پایداری است بدست دهد. کارایی روش کنترلی جدید، با نمایش نتایج حاصل از شبیه‌سازی بکار گیری آن روی جبرانگر در سیستم چند ماشینه به وضوح به چشم می‌خورد

## ۲- توصیف مدل سیستم:

شکل ۱ سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد، این سیستم ۹ باس سه ماشینه بوده و SMES در ترمینال ژنراتور ۱ قرار گرفته است.



شکل ۱: سیستم سه ماشینه مورد مطالعه

رفتار دینامیکی غیرخطی ژنراتورهای سنکرون به وسیله مدل دو محوری ژنراتورها توصیف می‌شود [۱]. ولتاژهای گذرای آرمیچر در دو محور  $d$  و  $q$  به ترتیب با معادلات زیر توصیف می‌شوند.

$$\frac{de'_{di}}{dt} = \frac{1}{T'_{doi}} (-e'_{di} + (X'_{qi} - X_{qi})i_{qi}) \quad (1)$$

$$\frac{de'_{qi}}{dt} = \frac{1}{T'_{dqi}} (-e'_{qi} + e_{fi} - (X'_{di} - X_{di})i_{di}) \quad (2)$$

که  $e_f$  ولتاژ تحریک میدان بوده و  $T'_{do}$  و  $T'_{dq}$  ثابت زمانی گذرا در محورهای  $d$  و  $q$  می‌باشند. معادلات مکانیکی روتور عبارتند از:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{M_i} (P_{mi} - D_{gi}\omega_i - P_{ei} - P_{smi}) \quad (3)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_0(\omega_i - 1) \quad (4)$$

که  $P_m$  و  $D_g$  و  $M_g$  به ترتیب عبارتند از توان خروجی توربین بخار، ضریب میرایی<sup>۱</sup> و زمان شروع حرکت مکانیکی.  $P_e$  توان الکترومغناطیسی گذرنده از فاصله هوایی بوده و  $P_{sm}$  توان ذخیره شده در SMES است. ولتاژهای ترمینال که توصیف کننده رابطه بین ژنراتورها و خطوط انتقال می‌باشند با روابط زیر مشخص می‌گردند:

$$i_a = G_v e'_a + B_v e'_q + \sum_{j=1(n)} \left\{ e'_j (G_v \cos \delta_{vj} + B_v \sin \delta_{vj}) + \right. \quad (5)$$

$$\left. e'_j (B_v \cos \delta_{vj} - G_v \sin \delta_{vj}) \right\} \quad (6)$$

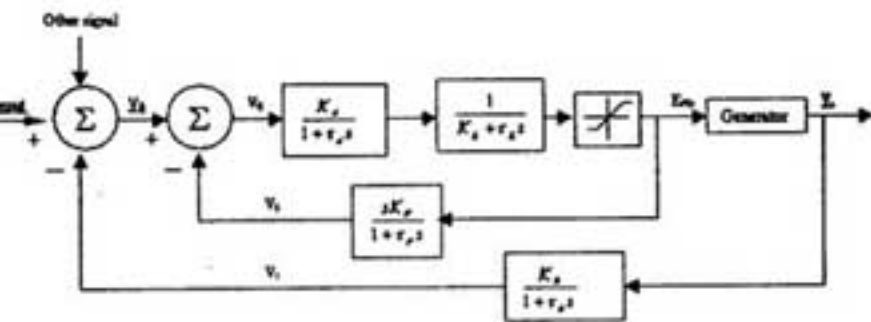
$$V_{di} = e'_{di} - r_i i_{di} - X'_{qi} i_{qi} \quad (7)$$

$$V_{qi} = e'_{qi} - r_i i_{qi} + X'_{di} i_{di} \quad (8)$$

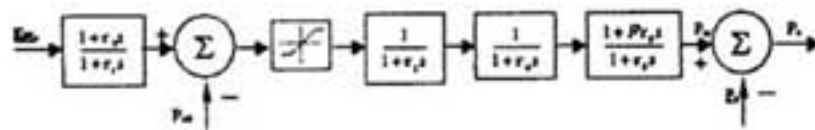
$$V_i = \sqrt{V_{di}^2 + V_{qi}^2} \quad (9)$$

$$P_{ei} = e'_{di} i_{di} + e'_{qi} i_{qi} + (X'_{di} - X'_{qi}) i_{di} i_{qi} \quad (10)$$

که در آن  $G_{ij} + iB_{ij}$  عنصر مربوط به سطر  $i$  و ستون  $j$  ماتریس کاهش یافته سیستم سه ماشینه بوده و  $\delta_{ij}$  زاویه انتقال بین باسهای  $i$  و  $j$  می‌باشد [۱]. شکل ۲ و ۳ به ترتیب سیستم تحریک و گاورنر بکار گرفته شده در سیستم را نمایش می‌دهد.

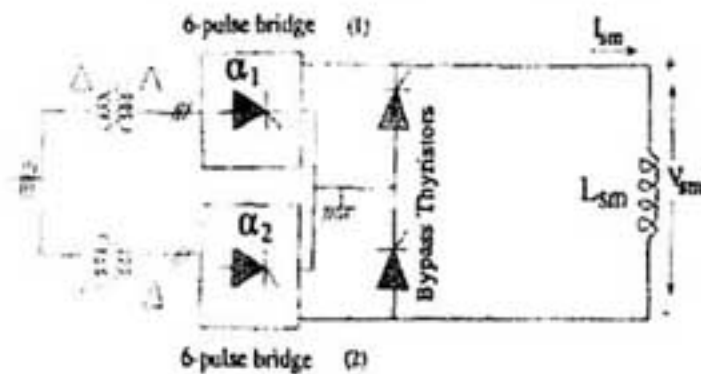


شکل ۲: نمایش سیستم تحریک



شکل ۳: نمایش گاورنر بکار گرفته

آرایش واحد SMES بکارگرفته شده روی سیستم در شکل ۴ نمایش داده شده است که شامل ترانسفورماتور  $Y-\Delta / Y-Y$ ، کانورتر ۱۲ پالس و یک سیم پیچ ابر رسانا است. شارش توان بدرون سیستم از طریق کنترل زاویه آتش کانورترها امکان پذیر است، بازاء  $\delta < 90$  کانورترها در مود کانورتری (مود شارژ شدن) و بازاء  $\delta > 90$  در مورد اینورتری (مود خالی شدن) کار می‌کنند [۲۱].



شکل ۴: نمایش واحد SMES

با توجه به اینکه کانورترها در یک مود پیوسته کارکنند حد بالای جریان  $1.38 I_{sm0}$  (p.u) و حد پایین آن  $0.31 I_{sm0}$  (p.u) در نظر گرفته می‌شود، برای ولتاژها نیز حدود بالا و پایین به ترتیب  $+0.438$  (p.u) و  $-0.438$  (p.u) می‌باشد [۲۲]. کلیه مشخصات مربوط به ژنراتورها، گاورنرها، سیستم‌های تحریک و SMES در ضمیمه آورده شده است. گرچه SMES توانایی تزریق هر دو توان اکتیو و راکتیو را داراست اما این جبرانگر زمانی می‌تواند این دو توان را بصورت مستقل به سیستم تزریق کند که کنترل غیریکسانی بر روی زوایای آتش کانورترها



اعمال گردد [۲۳]، تحت این شرایط بهره برداری بهینه تری از جبرانگر بعمل آمده و معادلات حاکم بر آن به صورت زیر تعدیل میشود:

$$V_{sm} = V_{sm0} (\cos \alpha_1 + \sin \alpha_2) \quad (11)$$

که  $V_{sm}$  ولتاژ طرف DC کانورتر ۱۲ پالسه بوده و  $V_{sm0}$  برابر با ماکزیمم ولتاژ dc بدون بار ایده ال کانورتر ۶ پالسه می باشد. جریانها و توانهای تزریقی جبرانگر به ترمینال ژنراتور نیز بصورت زیر بیان می شوند:

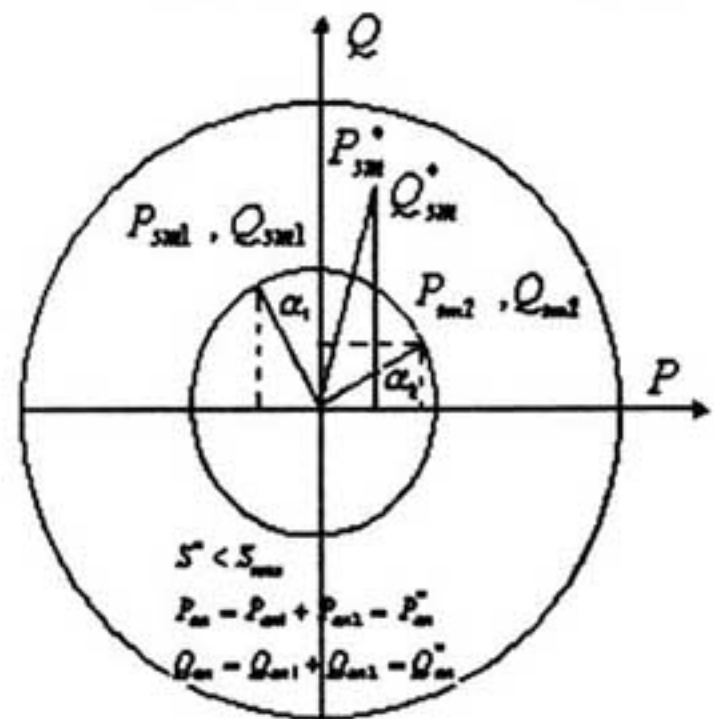
$$I_{sd} = 0.866 I_{sm} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) \quad (12)$$

$$I_{sq} = 0.866 I_{sm} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (13)$$

$$P_{sm} = V_{sm0} I_{sm} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (14)$$

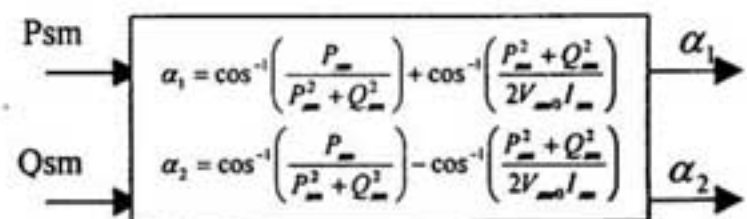
$$Q_{sm} = V_{sm0} I_{sm} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) \quad (15)$$

نواحی کنترلی SMES تحت شرایط کنترل نامساوی زوایای آتش در شکل ۵ نشان داده شده است. بدلیل مزایای ناشی از کنترل غیر یکسان زوایای آتش کانورترها، در این مقاله نیز از روش کنترل نامساوی زوایای آتش بهره برده شده است.



شکل ۵: نمایش نواحی کنترلی جبرانگر

با توجه به مطالب فوق پس از تعیین مقادیر مطلوب توانهای  $P_{sm}$  و  $Q_{sm}$ ، زوایای آتش کانورترها توسط بلوک دیاگرام نمایش داده شده در شکل ۶ تعیین شده و به کانورترها اعمال می گردد.



شکل ۶: بلوک دیاگرام تعیین زوایای آتش

از آنجا که هدف اصلی این نوشتار پرداختن به الگوی کنترلی مناسبی جهت بهبود رفتار دینامیکی ژنراتور است، کنترلر فازی مبتنی بر تئوری کنترل مد لغزشی را، جهت دستیابی به  $P_{sm}$  مطلوب طراحی کرده و برای جلوگیری از پیچیدگی بیشتر الگوی کنترلی ساده زیر برای تعیین  $Q_{sm}$  مطلوب در نظر گرفته شده است.

$$Q_{sm}^* = \frac{k_{vs}}{1 + sT_{dc}} \Delta V_l + Q_{sm0} \quad (16)$$

### ۳- طراحی کنترلر فازی لغزشی:

یکی از روش های اصلی پرداختن به مدل حاوی عدم قطعیت<sup>۱</sup>، استفاده از روش کنترل مد لغزشی می باشد، مد لغزشی یک روش سیستماتیک را جهت تثبیت پایداری در حضور مدل همراه با پارامترهای حاوی عدم قطعیت بدست خواهد داد [ ۲۴ ]. از آنجا که سیستم قدرت مصداق بارزی از چنین سیستمهای غیرخطی حاوی عدم قطعیت می باشد، طراحی کنترلر بر مبنای ایده مد لغزشی مورد تأکید قرار گرفته است. در ادامه نحوه بکارگیری کنترل مد لغزشی در سیستم چند ماشینه را بررسی می کنیم. ایده کلی کنترل مد لغزشی را می توان بصورت زیر بیان کرد: چنانچه یک سیستم دینامیک تک ورودی / تک خروجی داشته باشیم که رفتارش بصورت زیر قابل بیان باشد

$$\dot{x}^n = f(X) + u \quad (17)$$

$$x \in R, X = (x, \dot{x}, \dots, x^{n-1})^T \in R$$

$$f(X) = \hat{f}(X) + \Delta f(X) \quad (18)$$

$$|\Delta f(X)| \leq F(X)$$

بطوریکه  $u$  ورودی و  $X$  خروجی سیستم و  $f(X)$  در حالت کلی نامعین باشد، قانون کنترلی  $u = u(X)$  را به طریقی تعیین شود که سیستم حلقه بسته بسمت حالت های مطلوب از پیش تعیین شده یعنی  $X_d = (x_d, \dot{x}_d, \dots, x_d^{n-1})^T$  میل کند [ ۲۵ ].

معادله دینامیکی ماشین سنکرون (معادله ۳) را می‌توان به فرم زیر نیز بازنویسی کرد.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (19)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{M}(-Dx_2 + P_m - P_e + \xi) \quad (20)$$

که  $x_1 = \delta_1 - \delta_0$  و  $x_2 = \frac{dx_1}{dt}$  و  $\delta_0$  عبارتست از نقطه تعادل پایدار زاویه فاز،  $\xi$  بیانگر یک اغتشاش در نظر گرفته نشده و/یا خطای مدل می‌باشد، کنترل مدلفزشی قادر خواهد بود در مقابل پارامتر ناشناخته  $\xi$  نیز عملکرد پایداری را از خود در مقابل اغتشاشات ارائه دهد، در ادامه خط سوئیچینگ  $S^1$  به فرم زیر تعریف می‌شود.

$$S = cx_1 + x_2 \quad (21)$$

که  $c$  شیب خط سوئیچینگ بوده و بزرگتر از صفر است،

می‌توان اثبات کرد که جهت میل دادن متغیرهای حالت سیستم بسمت حالات مطلوب می‌بایست  $S$  را بسمت صفر میل داد، از اینرو یک تابع لیاپانف برای  $S$  در نظر گرفته و سعی می‌کنیم الگوی کنترلی را به نحوی تعیین کنیم تا مشتق آن را منفی سازد. این تابع و مشتق اول آن بصورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$V = \frac{1}{2}S^2 \quad (22)$$

$$\dot{V} = S\dot{S} = (C - \frac{D}{M})S^2 + SP_o < 0 \quad (23)$$

$$P_o = (\frac{D}{M} - C)Cx_1 + \frac{1}{M}(P_m - P_e + \omega) \quad (24)$$

از معادله ۲۳ می‌توان دو شرط زیر را برای تضمین پایداری استخراج کرد:

$$C < \frac{D}{M} \quad (25)$$

$$P_o < 0 \quad \text{if } S > 0 \quad (26)$$

$$P_o > 0 \quad \text{if } S < 0$$

جایگذاری  $P_o$  در معادله ۲۶ و ۲۵ و بازنویسی آن روابط زیر را به دست می‌دهد.

$$P_e = P_m + (D - MC)Cx_1 + \eta \quad \text{if } S > 0 \quad (27)$$

$$P_e = P_m + (D - MC)Cx_1 - \eta \quad \text{if } S < 0 \quad (28)$$

که در آن فرض شده است  $|\xi| \leq \eta$  و  $\eta$  نیز کاملاً معلوم باشد. معادلات ۲۵ تا ۲۸ قانون کنترل مدلفزشی را بدست می‌دهد. قانون کنترلی به دست آمده را می‌توان به نحوی توسعه داد که نسبت به تغییرات پارامترهای ژنراتور نیز مقاوم باشد، از اینرو اگر فرض کنیم ثابت اینرسی  $M$  و ضریب میرایی  $D$  ژنراتورها در بازه‌های  $M_{min} \leq M \leq M_{max}$  و  $D_{min} \leq D \leq D_{max}$  تغییر کند در این صورت معادلات ۲۵ تا ۲۸ را می‌توان به فرم زیر تصحیح کرد:

$$C < \frac{D_{min}}{M_{max}} \quad (29)$$

$$P_e < P_e^* \quad \text{if } S > 0 \quad (30)$$

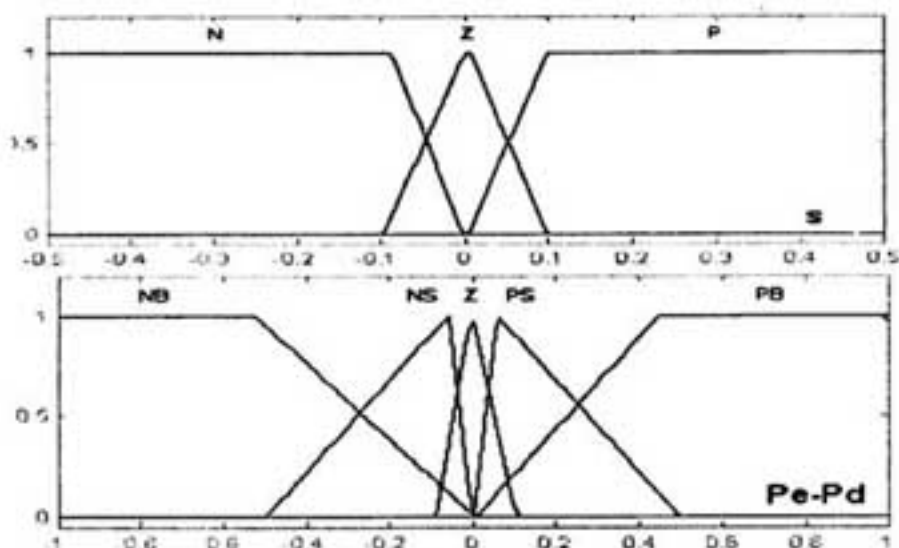
$$P_e > P_e^* \quad \text{if } S < 0 \quad (31)$$

$$P_e^* = P_m + (D_{max} - M_{min}C)Cx_1 + \eta \quad \text{if } S > 0 \quad (32)$$

$$P_e^* = P_m + (D_{max} - M_{min}C)Cx_1 - \eta \quad \text{if } S < 0 \quad (33)$$

معادلات فوق فرم نهایی شیب خط سوئیچینگ  $c$  و توان الکتریکی خروجی مطلوب  $P_e$  را تعیین می‌کند.

جهت دست یافتن به یک سیستم فازی که معیارهای فوق را برآورده کرده و بنابراین پایداری آن تضمین شود، متغیرهای زبانی  $S$  و انحراف توان الکتریکی خروجی از میزان مطلوب یعنی  $P_e - P_e^*$  را بعنوان ورودیهای کنترل معرفی کرده و به ترتیب ۳ و ۵ تابع تعلق به هر یک از آنها نسبت داده میشود است، این موضوع در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷ نمایش توابع عضویت تعریف شده

دیده را با کنترلر ابتدایی جایگزین کرده و کارایی آن در سیستم بررسی خواهد شد.

Rule	S		
R <sup>1</sup>	N	NB	PS
R <sup>2</sup>	N	NS	PT
R <sup>3</sup>	N	Z	NS
R <sup>4</sup>	N	PS	NM
R <sup>5</sup>	N	PB	NB
R <sup>6</sup>	Z	NB	PM
R <sup>7</sup>	Z	NS	PS
R <sup>8</sup>	Z	Z	Z
R <sup>9</sup>	Z	PS	NS
R <sup>10</sup>	Z	PB	NM
R <sup>11</sup>	P	NB	PB
R <sup>12</sup>	P	NS	PM
R <sup>13</sup>	P	Z	PS
R <sup>14</sup>	P	PS	NT
R <sup>15</sup>	P	PB	NS

جدول (۱)

#### ۴- طراحی کنترلر فازی مبتنی بر جدول جستجو:

همچنانکه می‌دانیم روش‌های فازی زیادی وجود دارد که با استفاده از آنها می‌توان دینامیک انواع سیستم‌ها را بسته به خصوصیت موجود در آنها مدل کرد، اگر چنانچه روابط دینامیکی سیستم مشخص باشد، مشکل چندانی در طراحی کنترلر فازی شناسایی کننده وجود نخواهد داشت، اما زمانیکه تنها اطلاعات ورودی/خروجی سیستم در اختیار است، آزادی عمل کمتر بوده و باید با احتیاط بیشتری در ساخت سیستم فازی کارا گام برداشت، از جمله روش‌های شناسایی و کنترل دینامیک ناشناخته سیستم‌های غیرخطی، می‌توان به شبکه‌های عصبی مبتنی بر روش پس انتشار خطا<sup>۱۱</sup> و همچنین کنترلرهای فازی مبتنی بر روش جدول جستجو نام برد. [ ۱۸ و ۲۵ ]. نکته مهم در بنا نهادن چنین سیستم‌هایی انتخاب ورودیهایی مؤثر در روند شناسایی می‌باشد، در اینجا از متغیرهای  $\omega$ ،  $P_e$ ،  $P_m$  و  $\Delta V$  بخاطر نقش فوق‌العاده ای که در نمایش حالات سیستم و همچنین به طور غیرمستقیم در کنترلر مدلفزشی دارند استفاده شده

ایده کلی جبران توسط SMES بدین صورت است که: وقتی محور ژنراتور، بدلیل وقوع خطا در حال سرعت گرفتن است با جذب توان اکتیو اضافی در خروجی از شتاب روتور می‌کاهد و بلعکس زمانیکه سیستم در حال افت سرعت است با تزریق توان اکتیو به صورت لحظه‌ای، جلوی افت بیشتر سرعت را می‌گیرد. در اینجا نیز از همین خصوصیت استفاده کرده و قوانین موردنیاز کنترلر با توجه به ورودیهایی که قبلاً به صورت سیستماتیک ساخته شد استنتاج می‌گردد. این قوانین در جدول (۱) لیست شده‌اند، قسمت آنگاه این قوانین به صورت تابعی خطی از هر دو ورودی در نظر گرفته شده است،

$$f^i = p_i |S| + q_i |P_e - P_e^*| \quad (۳۴)$$

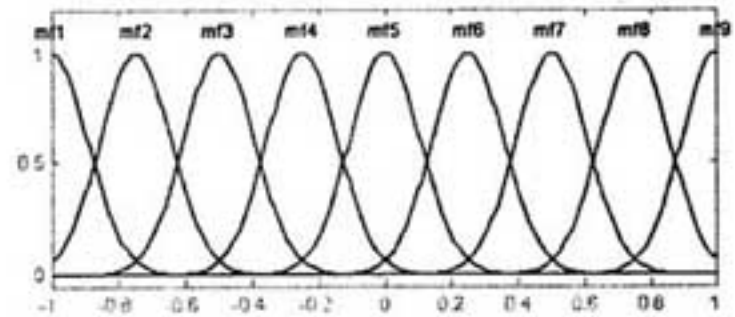
که ثوابت  $p_i$  و  $q_i$  به روش سعی و خطا جهت دستیابی به نتیجه بهتر تعیین می‌شوند، در نهایت نیز متغیر کنترلی  $P_{smes}$  توسط روش فازی تشریح شده و با استفاده از موتور استنتاج ضرب، فازی ساز یکتا و غیرفازی ساز میانگین مراکز به صورت زیر استخراج می‌گردد.

$$P_{smes} = \frac{\sum_{i=1}^{15} \omega_i f^i}{\sum_{i=1}^{15} \omega_i} \quad (۳۵)$$

در این صورت است که می‌توان عملکرد پایداری را از سیستم فازی طراحی شده انتظار داشت. اما همچنانکه اشاره شد این کنترلر فازی حاوی عیب بزرگی به هنگام پیاده‌سازی عملی آن می‌باشد، بدین صورت که در سیستم‌های قدرت حقیقی، اندازه‌گیری زاویه بار مشکلات فراوانی را به همراه دارد [ ۱۸ و ۲۰ ]، بنابراین هر ایده‌ای که بتواند اطلاعات زاویه بار را به عنوان ورودی کنترلر حذف کرده و پایداری را نیز تضمین کند، حائز اهمیت بوده و مورد استقبال فراوان خواهد بود. از اینرو در ادامه سعی بر اینست که کنترلر فازی دیگری معرفی شود که از روش جدول جستجوی فازی استفاده کرده و با استفاده از اطلاعات موجود در سیستم حاوی کنترلر لغزشی آموزش ببیند پس از آن کنترلر آموزش



است، اقدام بعدی انتساب توابع تعلق<sup>۱۲</sup> مناسبی برای هر یک از ورودیهای جدید میباشد، این توابع تعلق که روی بازه [۱، -۱] نرمالیزه شده‌اند در زیرنمایش داده شده است.



شکل ۸ نمایش توابع عضویت تعریف شده برای آموزش

همچنانکه در شکل نیز ملاحظه می شود برای هر یک از ورودیها ۹ تابع تعلق بصورت گوسین در نظر گرفته شده است تا بدین ترتیب قابلیت یادگیری سیستم افزایش یافته و از نظر همواری پاسخ نیز مشکل چندانی وجود نداشته باشد. ایده کلی روش جدول جستجوی فازی را می توان بصورت زیر تشریح کرد:

چنانچه  $n$  ورودی و یک خروجی را برای سیستم فازی تعریف کرده و توابع تعلق مناسبی را به هر یک اختصاص دهیم و اگر اطلاعات ورودی/خروجی مورد استفاده در مرحله  $p$  ام آموزش بصورت زیر باشد.

$$(x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p) \rightarrow (y^p)$$

با ورود این اطلاعات، تابع تعلق که بیشترین میزان عضویت را نصیب ورودی مربوط به خودش کرده، انتخاب شده و برای تعریف قانون  $p$  ام مورد استفاده قرار می گیرد. اگر فرض کنیم توابع تعلق انتخاب شده مربوط به این اطلاعات بصورت  $(A_1^p, A_2^p, \dots, A_n^p) \rightarrow B^p$  باشد، در اینصورت قانون مربوط به مرحله  $p$  ام بصورت زیر تعریف می شود:

if  $x_1$  is  $A_1^p$  and ... and  $x_n$  is  $A_n^p$ , Then  $y$  is  $B^p$   
و در نهایت جهت جلوگیری از وجود قوانین متضاد (قوانین با قسمت اگر مساوی و قسمت آنگاه متفاوت)، درجه هر قانون را بصورت

$D(rule) = \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^p}(x_{0i}^p) \mu_{B^p}(y_0^p)$  تعریف کرده و بدین ترتیب تنها قوانینی را انتخاب کرده و در کنترل مورد استفاده قرار می دهیم که بیشترین درجه را از بین قوانین متضاد به خود اختصاص داده باشند.

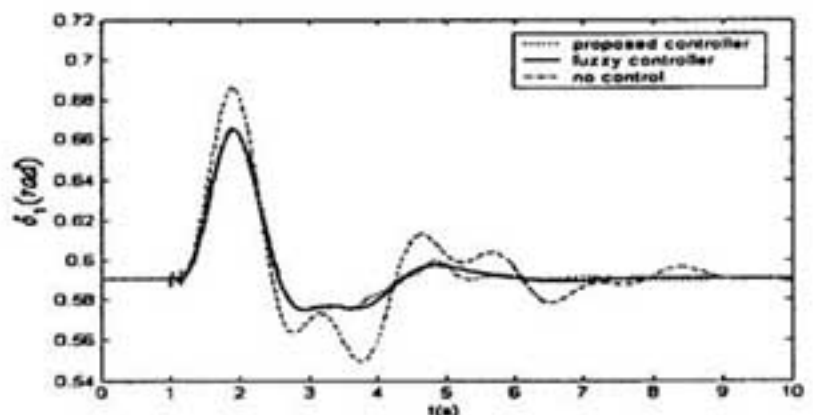
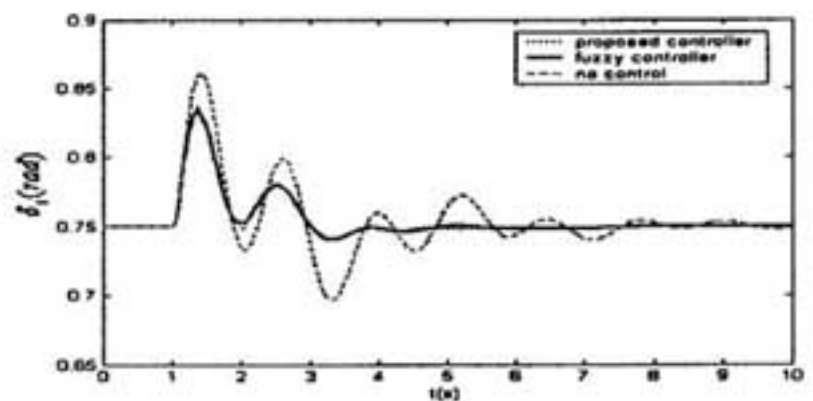
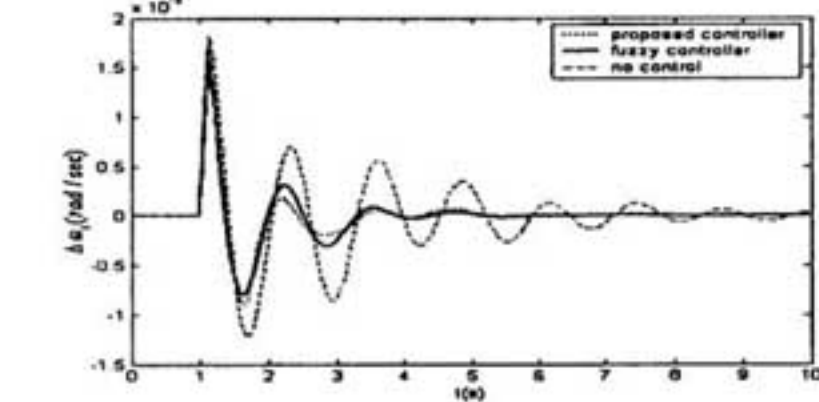
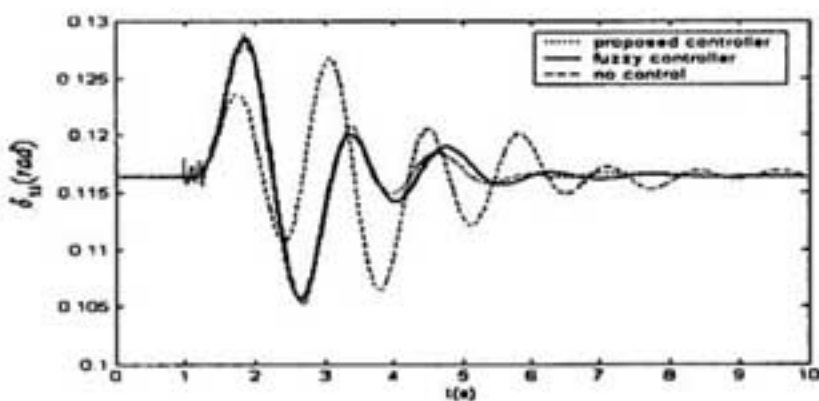
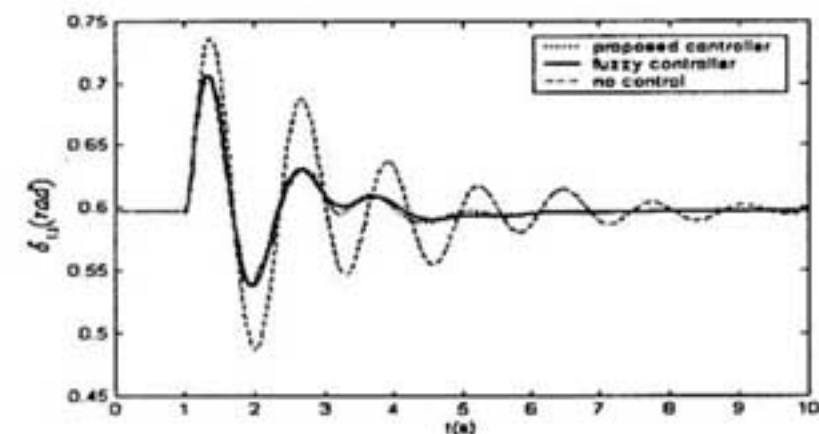
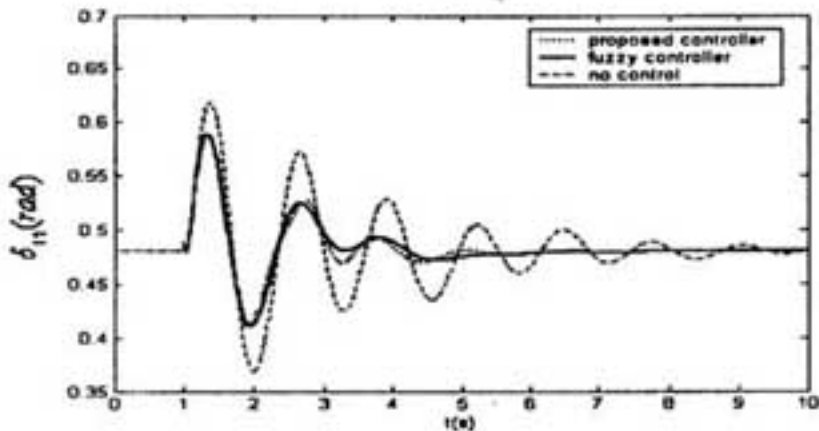
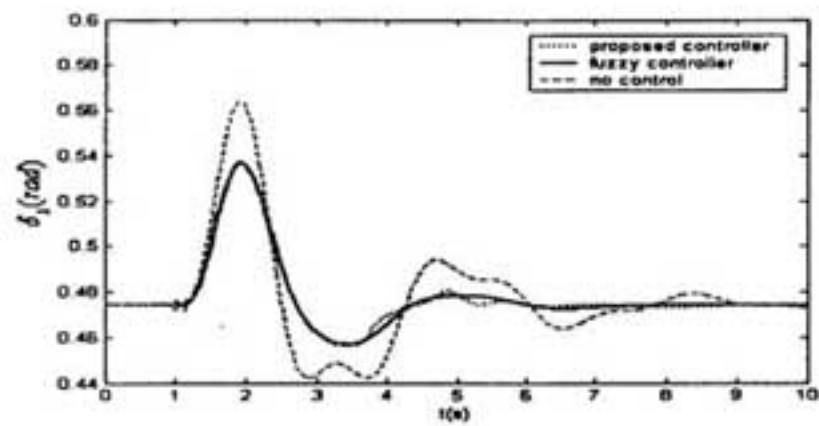
نقش اطلاعات مورد استفاده در آموزش سیستم بر هیچکس پوشیده نیست، سیستم زمانی می تواند رفتار سیستم مجهولی را به درستی دنبال کند که اطلاعات جامع و مؤثری از سیستم مجهول استخراج شده و برای آموزش مورد استفاده قرار گیرد، در اینجا نیز چون هدف دنبال کردن خروجی کنترلر مد لغزشی با استفاده از ورودیهای تعریف شده برای کنترلر جدید است از اطلاعات بدست آمده از سیستم حاوی کنترلر مد لغزشی استفاده کرده و عملکرد آنرا طی اغتشاشات متعددی بررسی می کنیم تا اطلاعات جامعی از عملکرد آن بدست آوریم. داده های مورد استفاده در آموزش کنترلر فازی توسط ده حالت زیر که برای سیستم در نظر گرفته شده است استخراج شده اند:

- یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بین باسهای ۱ و ۵
- یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بین باسهای ۷ و ۸
- یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بین باسهای ۶ و ۹
- یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بین باسهای ۱ و ۵ و افزایش گشتاور مکانیکی باندازه ۲۰٪+
- یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بین باسهای ۱ و ۵ و کاهش گشتاور مکانیکی باندازه ۲۰٪-
- یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بین باسهای ۳ و ۹
- یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بین باسهای ۲ و ۷
- یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بین باسهای ۸ و ۹ قطع شدن خط رابط بمدت ۱۵ سیکل
- یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بین باسهای ۶ و ۹ قطع شدن خط رابط بمدت ۱۵ سیکل
- یک خطای اتصال کوتاه سه فاز بین باسهای ۴ و ۵ قطع شدن خط رابط بمدت ۱۵ سیکل

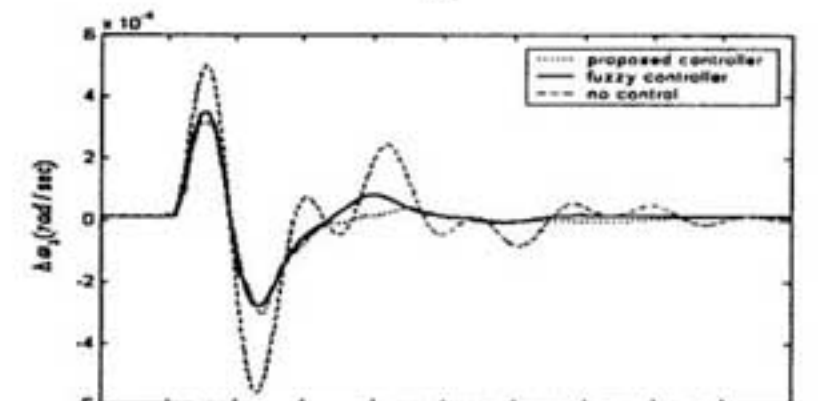
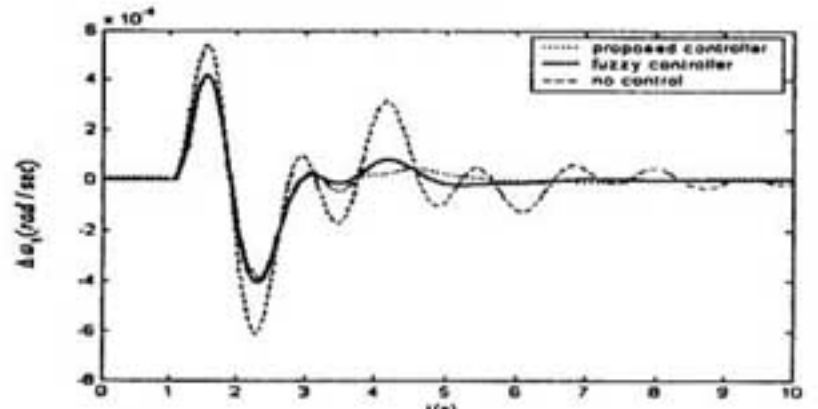
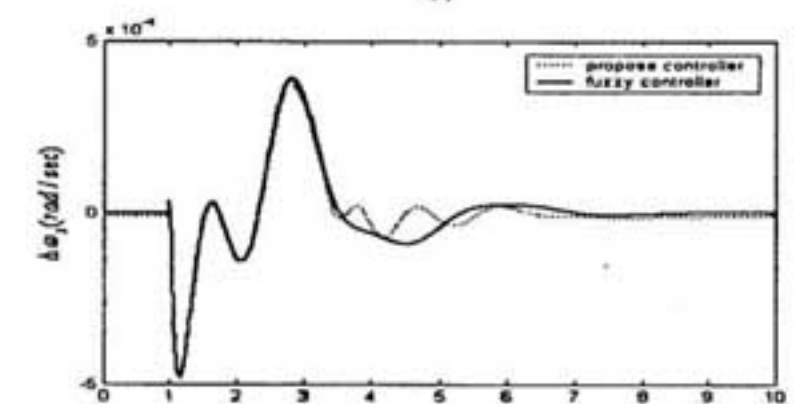
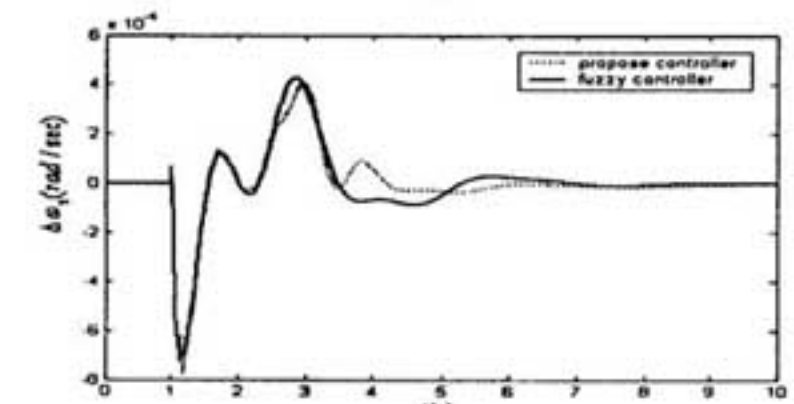
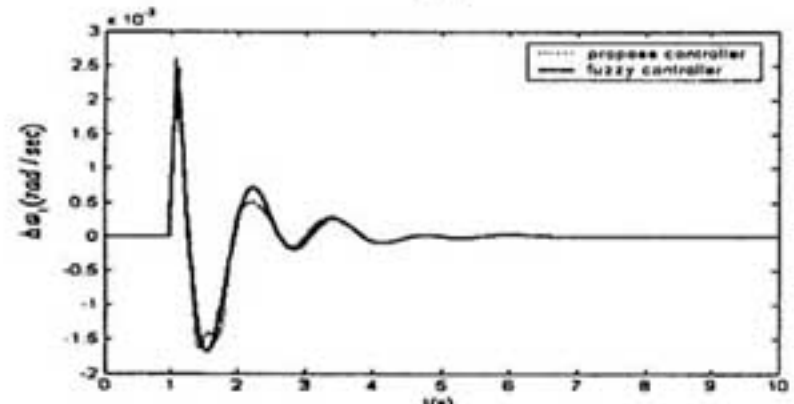
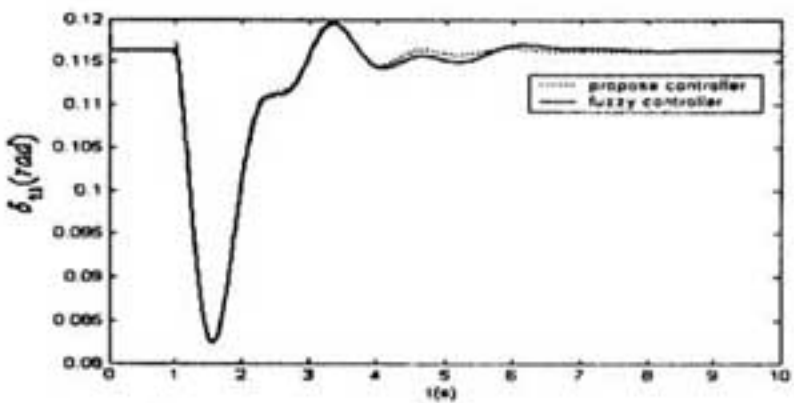
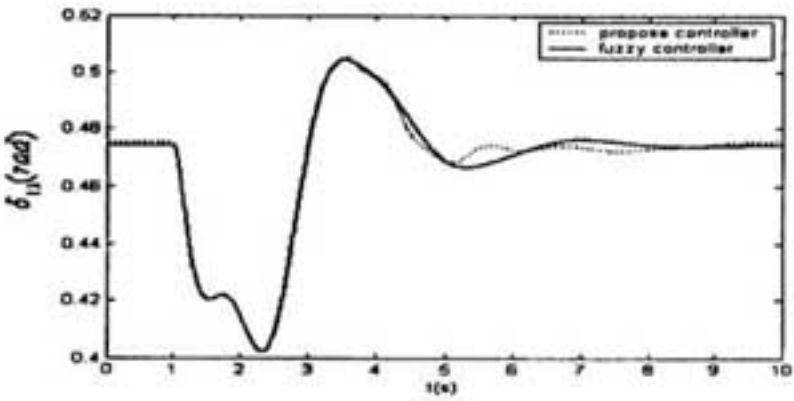
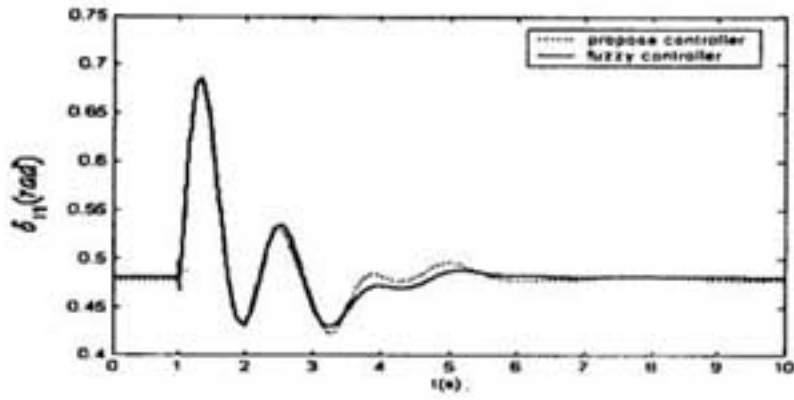
در روش آموزش توسط جدول جستجو، همچنانکه امر آموزش ادامه می‌یابد یکسری قوانین بصورت اتوماتیک بسته به اطلاعات مورد استفاده در آموزش استخراج می‌گردد، با توجه به تعداد توابع تعلق اختصاص داده شده به هر یک از ورودی/خروجیها، حداکثر<sup>۹</sup> قانون می‌تواند تولید شود.

### ۵- نتایج شبیه سازی:

جهت بررسی کارایی کنترلر پیشنهادی، این کنترلر را بر روی یک واحد SMES بکار گرفته و عملکرد و کارایی آن توسط شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی سیستم توصیف شده ۹ باس سه ماشینه نشان داده شده است. همچنانکه نتایج شبیه‌سازی به وضوح نشان می‌دهد، کنترلر جدید پاسخ حاصل از کنترلر مدلفزشی را به خوبی دنبال کرده و بنابراین پایداری سیستم را در مواجهه با اغتشاشات به همان خوبی کنترلر مدلفزشی تضمین خواهد کرد. شکل ۹ پاسخ کنترلر را برای یک اتصال کوتاه سه فاز بمدت ۵ سیکل بطور همزمان روی باسهای ۶ و ۷ نشان می‌دهد.

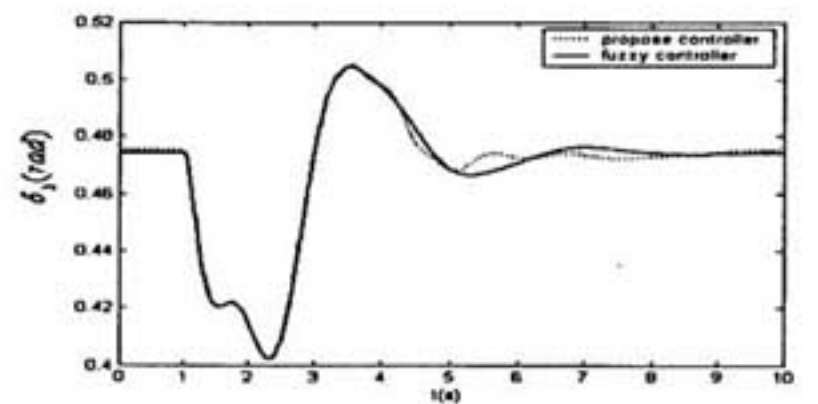
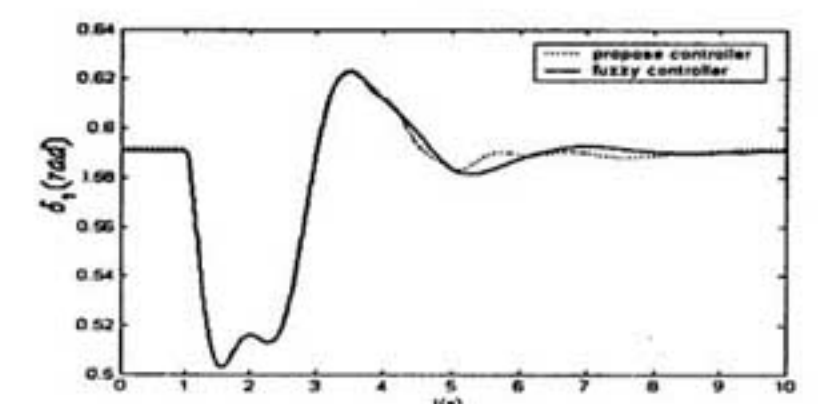
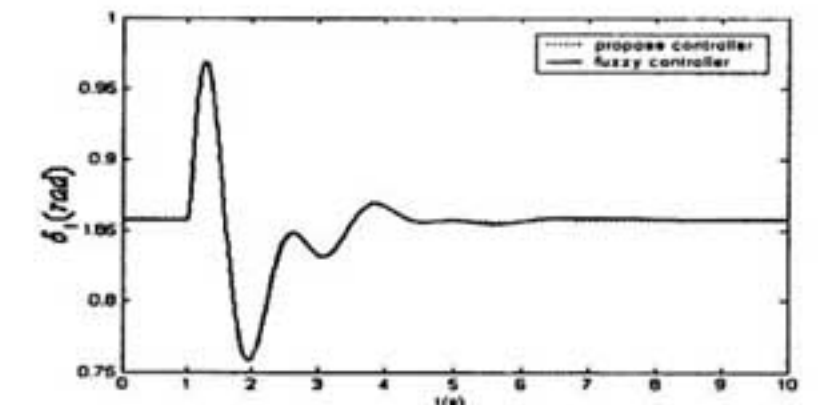






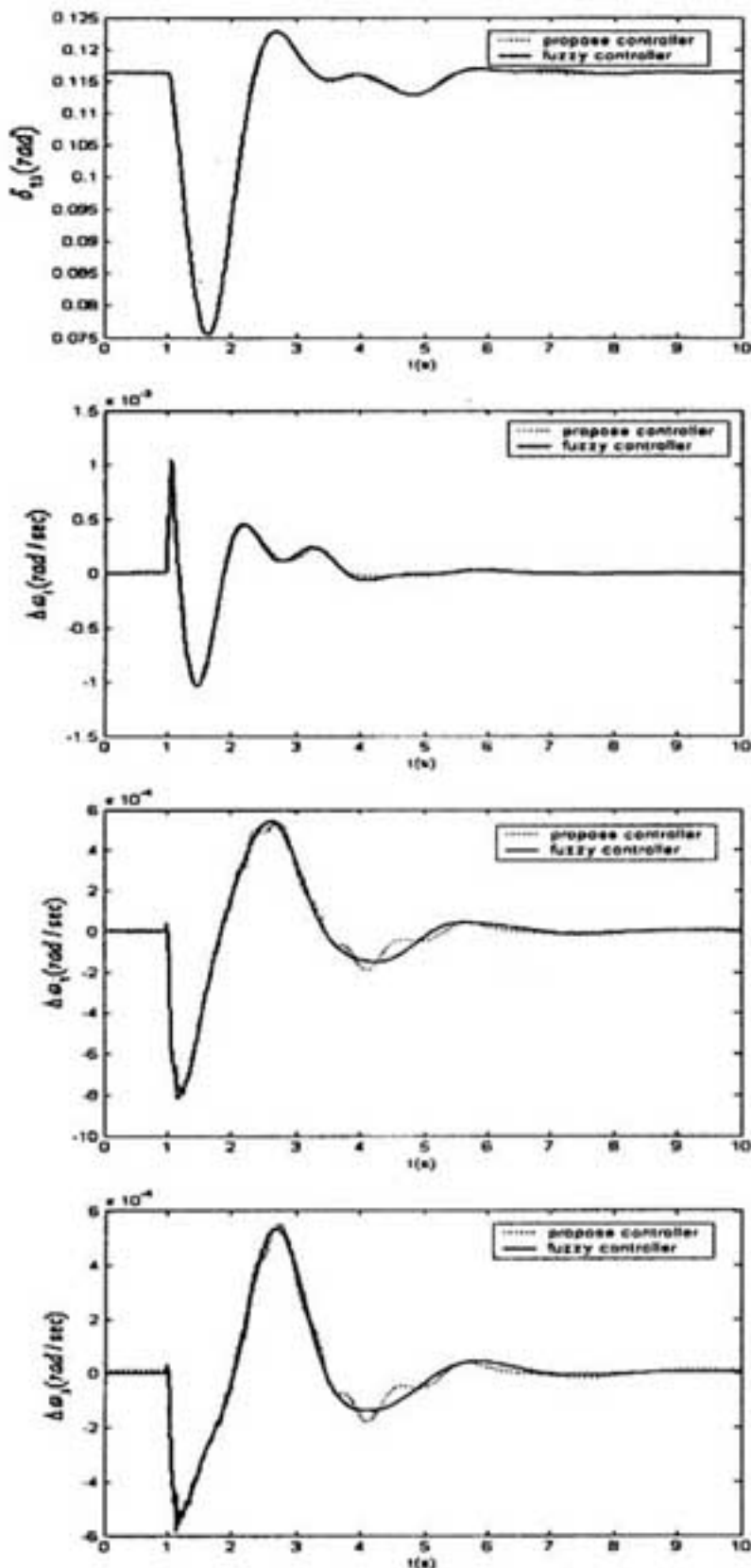
شکل ۹: پاسخ کنترلر به اغتشاش نوع اول

شکل ۱۰: پاسخ کنترلر را برای یک اتصال کوتاه سه فاز بمدت ۴ سیکل روی باس ۶ همراه با کاهش ۲۰ درصدی توان ورودی ژنراتور ۲ نشان می دهد.



شکل ۱۰: پاسخ کنترلر به اغتشاش نوع دوم

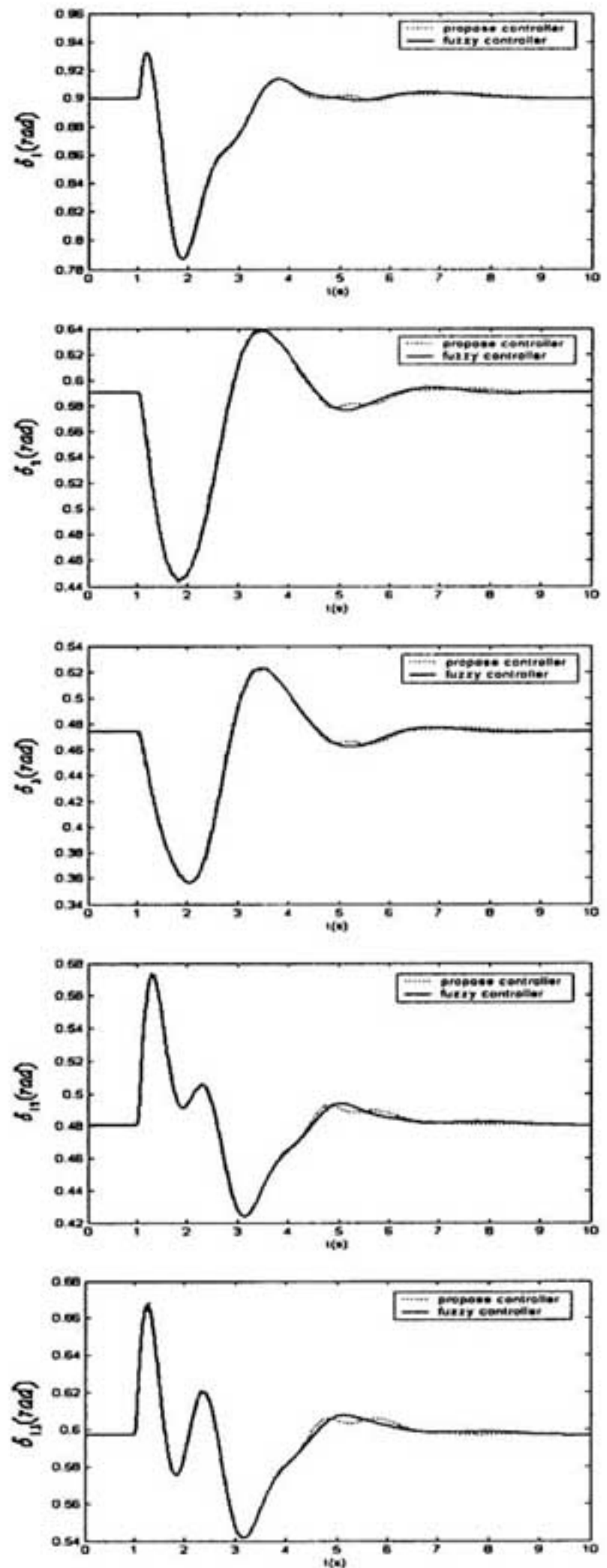
شکل ۱۱ پاسخ کنترلر برای افت ۲۰ درصدی گشتاور ورودی ژنراتور ۲ همراه با کاهش ۱۰ درصدی توان ورودی ژنراتور ۳ را بمدت ۴ سیکل نشان می دهد.



شکل ۱۱: پاسخ کنترلر به اغتشاش نوع سوم

## ۶- نتیجه گیری و بحث:

در این مقاله، بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت با تأکید بر تضمین پایداری مورد تأکید قرار گرفته و کنترلر فازی جدیدی مبتنی بر روش جدول جستجوی فازی پیشنهاد شد که بدون نیاز به اطلاعات زاویه بار سیستم، همان رفتار کنترلر مد لغزشی که به نوعی پایداری آن اثبات شده است را به خوبی نگاشت می کند، لذا عملکرد پایداری داشته و پایداری را برای طیف وسیعی از اغتشاشات وارده تضمین خواهد کرد.



Industry Applications, Vol.IA-22,No.6,pp.1091-1104,1986.

[13] A.H.M.A.Rahim, and A.M.Mohammad, 'Improvement of synchronous generator damping through superconducting magnetic energy storage systems', IEEE Trans on energy conversion, 1994, vol.9, pp.736-742.

[14] I.M.El-Amin, and M.Mushtag Hussain, "Application of a superconducting coil for transient stability enhancement", Electric power system research, 1989, vol.17, pp.219-228.

[15] L.Gao, L.Chen, Y.Fan and H.Ma, "DFL-Nonlinear control design with application in power systems", Automatica, 1992, vol.28, pp.975-979.

[16] Y.Wang, D.J.Hill, L.Gao, and R.H.Middleton, "transient stability enhancement and voltage regulation of power systems", IEEE Trans. On power systems PWRs-8, 1993, pp.620-627.

[17] J.W.Chapman, M.D.Ilic, C.A.King, L.Eeg, and H.Kaufman, "stabilizing a multimachine power system via decentralized feedback linearizing excitation control", IEEE Trans on power systems PWRs-8, 1993, pp.830-839.

[18] T.Senju, S.Yamane and K.Uezato, "Improvement of multi-machine power system stability by variable series capacitor (VSR) using Neural Network", IEEE pp.628-633, 1998.

[19] Y.Lin.Tan and Y.Wang, "Augmentation of transient stability using a superconducting coil and adaptive nonlinear control", IEEE Trans on power systems, vol.13, no.2, may 1998.

[20] S.Kannan, S.Jayaram and M.M.A.Salama, "Fuzzy Logic based supplementary controller for static synchronous series compensator", IEEE Trans on power system, pp.489-492, 1998.

[21] O.Wasynczuk, "Damping subsynchronous resonance using energy storage", IEEE Trans on Industry Applications and systems, vol.PAS-101, no.4 April 1982.

[22] C.Juiw, Y.Shang Lee, "Application of superconducting magnetic energy storage unit to damping of synchronous generator", IEEE Trans on energy conversion, vol.6, no.4, 1991.

[23] M.G.Rabbani, J.B.X.Devotta and S.Elangovan, "Application of simultaneous active and reactive power modulation of SMES Unit under unequal  $\alpha$ -mode for power system stabilization", IEEE Trans on power system, vol.14, no.2, may 1999.

-۷ مراجع مورد استفاده:

[1] P.M.Anderson and A.A.Fouad, power system control and stability, iowa state university press. Ames, Iowa, 1997.

[2] E.V.Larsen and D.A.Swann, "applying power system stabilizers". IEEE transactions on power Apparatus and systems, vl.PAS-100, pp.3017-3046, 1981.

[3] F.P.DeMello and C.Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as Affected by Excitation Control", IEEE Transactions on power Apparatus and systems, Vol.PAS-88, pp.316-329, 1969.

[4] Y.Y.Hsu and C.Y.Hsu, "Design of A Proportional-integral Power System stabilizer", IEEE transaction on power systems, PWRs, Vol.1, No.2, pp.46-53.

[5] H.Stemmeler and G.Guth, "The thyristor controlled static phase-shifter A new Tool for power flow control in AC transmission system", Brown Boveri Review, Vol.69, pp.73-78, 1982.

[6] A.J.Ramos and H.Tyll, "dynamic performance of A radial weak power system with multiple static VAR compensator", 89 WM 183-5, PWRs.

[7] M.O'Briem and G.Ledwich, "static reactive power compensation controls for improved system stability", IEE Proceeding, Vol,134, Pt.C, No.1, pp.38-42, 1987.

[8] H.J.Boening and J.F.Hauer, "Comissioning test of the bonneville 30 MJ superconductive magnetic energy storage unit", IEEE trans on Power Appar.Syst.vol.PAS-104, no.2, February 1985, pp.302-312.

[9] J.D.Rogers, R.I.Schermer, B.L.Miller, and J.F.Hauer, "30 MJ Super-conducting Magnetic Energy storage system for Electric Utility Transmission stabilization", Proceeding of IEEE, Vol.71, no.9, pp.1099-1107, 1983.

[10] T.Ise, Y.Murakami and K.Tsuji, "Simultaneous Active and Reactive power control of superconducting magnetic energy", Vol .PWRD-1, no.1, pp.143-150, 1986.

[11] J.E.C.Williams, "Super-conducting magnets and their applications", proceeding of IEEE, Vol.7, no.8, pp.1132-1141, 1989.

[12] L.H.Walker, "Forced-Commutated Reactive power compensator", IEEE Transactoins on



Governor	1	2	3
$P_{max}$	250	175	132
$\tau_1$	30	0.83	0.083
$\tau_2$	3.5	0.00	0.00
$\tau_3$	0.52	0.200	0.200
$\tau_4$	0	0.050	0.050
$\tau_5$	0.415	8.00	5.00
F	-2.00	0.271	0.280

SMES

$$V_{sm0}=0.1p.u ; I_{sm0}=0.6495p.u ; L_{sm}=0.5H; w_{sm0}=6.0Mj$$

- [24] H.X.Li , H.B.Gatland, and A.W.Grean, "Fuzzy Variable structure control", IEEE Transaction on systems, man, AND cybernetics-part B:cybernetics,vol.27,No.2,Apriil 1997.  
 [25] Li-Xin Wang,"A Course in fuzzy systems and control", Prentice-Hall,Inc.1997.

ضمیمہ:

Generator	1	2	3
Rated MVA	247.5	192.0	128.0
KV	16.5	18.0	13.8
Power factor	1	0.85	0.85
Type	Hydro	Steam	Steam
$x_d$	0.1460	0.8958	1.3125
$x_d'$	0.0608	0.1198	0.1813
$x_q$	0.0969	0.8645	1.2578
$x_q'$	0.0969	0.0521	0.0742
$\tau'_{do}$	8.96	6.00	5.89
$\tau'_{qo}$	0.01	0.535	0.600

Exciter	1	2	3
$k_A$	100	25	25
$\tau_A$	0.02	0.2	0.2
$k_E$	-0.02	-0.0505	-0.0601
$\tau_E$	-0.100	0.5685	0.6758
$E_{FDmax}$	3.00	3.96	3.33
$E_{FDmin}$	-3.00	-3.96	-3.33
$k_F$	0	0.091	0.108
$\tau_F$	0	0.35	0.35
$k_R$	1	1	1
$\tau_R$	0	0.06	0.06