

بهبود پایداری سیستم‌های قدرت به وسیله کنترل مقاوم تحریک ژنراتور با روش پسخور کمی

اصغر اکبری فرود، حسین سیفی و علی خاکی صدیق

آزمایش قرار گرفته است و برتری آن بر سیستم تحریک معمولی، در پیشگیری از خاموشی‌های بزرگ نشان داده شده است [3]. در نوعی دیگر از کنترل کننده غیر خطی که با روش DFL طراحی شده است ژنراتور و توربین به صورت یک سیستم چندرودی/چندخروجی در نظر گرفته شده است و هدف از آن، کنترل زاویه روتور و ولتاژ پایانه ژنراتور می‌باشد [4]. با استفاده از پسخور حالت، یک AVR/PSS² هماهنگ و مقاوم طراحی شده که "تنظیم کننده چهارحلقه‌ای غیر متمرکز" نامیده شده است [5]. همین کنترل کننده در تحقیق دیگری بسط داده شده تا برای میرایی نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. عملکرد این کنترل کننده با آنالیز مدال و شبیه‌سازی زمانی بر روی یک شبکه بزرگ (شبکه اروپا) مورد آزمایش قرار گرفته است [6]. با استفاده از پسخور حالت در تحقیقی دیگر، یک کنترل کننده غیر متمرکز برای تحریک ژنراتور طراحی شده است. در این طراحی، عدم قطعیت‌های ناشی از شبکه در نظر گرفته شده است. در این مقاله هدف از طراحی کنترل کننده، بهبود پایداری گذرای سیستم می‌باشد [7]. روش دیگری که برای طراحی کنترل کننده تحریک استفاده شده است، روش پسخور³ می‌باشد. این روش، یکی از روش‌های طراحی در کنترل تطبیقی می‌باشد. هدف از این طراحی نیز، بهبود پایداری گذرای سیستم در برابر اغتشاش‌های بزرگ است [8]. از کنترل مد لغزشی نیز در طراحی کنترل کننده‌های تحریک استفاده شده است. در یکی از این تحقیق‌ها، کنترل کننده از اطلاعات خروجی استفاده می‌کند [9]. از این روش برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت نیز استفاده شده است [10]. نکته قابل توجه در کنترل کننده‌های غیر خطی این است که اغلب پیچیده هستند و پیاده‌سازی آنها نسبت به کنترل کننده‌های خطی مشکل‌تر است. از سوی دیگر در کنترل کننده‌های پیشنهادی برخی از نامعینی‌های سیستم که ناشی از نامعینی‌های پارامتری ژنراتورهاست در نظر گرفته نشده است.

تئوری پسخور کمی از روش‌های طراحی کنترل کننده‌های مقاوم است که توانایی بالایی در مدل‌سازی نامعینی‌های پارامتری دارد [11]. از این تئوری در سیستم‌های قدرت در چند مورد استفاده شده است. با استفاده از تئوری پسخور کمی پارامترهای پایدارساز معمولی به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که محدوده وسیعی از شرایط بهره‌برداری را شامل شود [12]. از تئوری پسخور کمی برای طراحی حلقه کنترل LFC نیز استفاده شده است [13]. در این موارد از تئوری پسخور کمی خطی استفاده شده است.

به علت وجود نامعینی‌ها در مدل‌سازی سیستم‌ها، کنترل کننده‌های سنتی نمی‌توانند در جمیع شرایط کاری عملکرد مطلوبی داشته باشند. نامعینی‌ها به دو نوع ساختاری و غیر ساختاری تقسیم می‌شوند. در نامعینی‌های ساختاری، طراح می‌داند که کدامین پارامترها و کمیت‌های

چکیده: عملکرد کنترل کننده طراحی شده برای یک سیستم، به دقت مدل‌سازی انجام شده از آن سیستم وابسته است. اغلب مدل‌سازی‌ها با تقریب زیادی همراه است. کنترل کننده‌های رایج سیستم تحریک به همین دلیل اغلب نمی‌توانند در تمام حالت‌های بهره‌برداری مشخصات مطلوب را در خروجی سیستم تضمین نمایند. در این مقاله یک سیستم کنترل تحریک مقاوم با استفاده از تئوری پسخور کمی طراحی شده است. در طراحی این کنترل کننده، تمامی نامعینی‌های پارامتری ژنراتور، اعم از نامعینی در X_d, X'_d, H, D, T_{d0} و نامعینی ناشی از شبکه، همچون تغییر شرایط بهره‌برداری، تغییر ولتاژ و تغییر راکتانس شبکه، در نظر گرفته شده است. در طراحی این کنترل کننده مقاوم، از روش دوم هورویتز در تئوری پسخور کمی غیر خطی استفاده شده است.

کلید واژه: پایداری سیستم‌های قدرت، تئوری پسخور کمی غیر خطی، سیستم تحریک، کنترل مقاوم ژنراتور.

1- مقدمه

سیستم تحریک ژنراتور نقش مهمی در پایداری سیستم قدرت دارد. یک سیستم تحریک با پاسخ سریع و گین بالا، می‌تواند به نحو مطلوبی در بهبود پایداری گذرای سیستم مؤثر باشد. با طراحی پایدارساز سیستم قدرت و اضافه کردن آن به سیستم تحریک، پایداری نوسانی سیستم قدرت نیز بهبود پیدا می‌کند. در مقالات متعددی کنترل کننده‌هایی برای تحریک طراحی شده است که همگی سعی در بهبود عملکرد تحریک ژنراتور را دارند. با استفاده از خطی‌سازی پسخور¹ (DFL)، یک کنترل کننده تحریک و همچنین کنترل کننده دیگری که کنترل هماهنگ توربین و تحریک را بر عهده دارد، طراحی شده است [1]. هدف از طراحی این دو کنترل کننده غیر خطی، بهبود پایداری گذرا و تنظیم بهتر ولتاژ پایانه ژنراتور بعد از رفع خطا می‌باشد. در این روش کنترلی، مدتی بعد از آغاز اغتشاش، حلقه پسخور از کنترل کننده اول به دومی تغییر می‌یابد. انتخاب لحظه تغییر کنترل کننده، مشکل اصلی این روش است. در [2] این مشکل با استفاده از یک تابع عضویت فازی تا حدودی مرتفع شده است. این کنترل کننده‌ها بر روی شبکه تک‌ماشینه آزمایش شده‌اند. نوعی دیگر از کنترل کننده غیر خطی که بر اساس DFL طراحی شده است در یک شبکه بزرگ 5000 شینه (شبکه شمال آمریکا) در برابر اغتشاش‌های بزرگ مورد

این مقاله در تاریخ 24 بهمن ماه 1385 دریافت و در تاریخ 21 خرداد ماه 1387 بازنگری شد.

اصغر اکبری فرود، استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه سمنان، سمنان
(email: aakbari@semnan.ac.ir)

حسین سیفی، استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
(email: seifi_ho@modares.ac.ir)

علی خاکی صدیق، استاد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
(email: sedigh@eetd.kntu.ac.ir)

2. Automatic Voltage Regulation/Power System Stabilizer

3. Back Stepping

1. Direct Feedback Linearization

معادلات مکانیکی

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

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{-D}{2H} \Delta\omega(t) + \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e(t)) \quad (2)$$

دینامیک الکتریکی ژنراتور

$$\dot{E}'_q(t) = \frac{1}{T'_{d0}} (E_f(t) - E_q(t)) \quad (3)$$

که

EMF: $E'_q(t)$ گذرا در محور q ژنراتورEMF: $E_q(t)$ در محور q ژنراتورEMF: $E_f(t)$ معادل در سیم پیچی تحریک T'_{d0} : ثابت زمانی اتصال کوتاه گذرا در محور d $\delta(t)$: زاویه ژنراتور نسبت به شین بی نهایت، برحسب رادیان $\Delta\omega(t)$: سرعت نسبی ژنراتور (رادیان بر ثانیه) $\omega_0 = 2\pi f_0$: سرعت ماشین سنکرون $P_e(t)$: توان اکتیو تولیدی ژنراتور

P_m : توان مکانیکی، برحسب پریونیت (توان مکانیکی ثابت در نظر گرفته شده است و تغییرات آن در قالب نامعینی در نظر گرفته می شود)

معادلات الکتریکی

$$E_q(t) = \frac{X_{ds}}{X'_{ds}} E'_q(t) - \frac{(X_d - X'_d)}{X'_{ds}} V_s \cos \delta(t) \quad (4)$$

$$P_e(t) = \frac{V_s E_q(t)}{X_{ds}} \sin \delta(t) \quad (5)$$

$$I_q(t) = \frac{V_s}{X_{ds}} \sin \delta(t) = \frac{P_e(t)}{X_{ad} I_f(t)} \quad (6)$$

$$Q(t) = \frac{V_s}{X_{ds}} E_q(t) \cos \delta(t) - \frac{V_s^2}{X_{ds}} \quad (7)$$

$$E_q(t) = X_{ad} I_f(t) \quad (8)$$

$$V_t(t) = \frac{1}{X_{ds}} \times \quad (9)$$

$$(X_s^2 E_q^2(t) + V_s^2 X_d^2 + 2X_s X_d X_{ds} P_e(t) \cot g \delta(t))^{\frac{1}{2}}$$

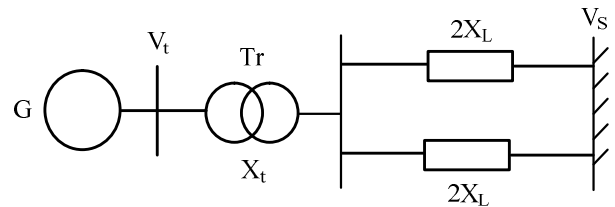
که

 $I_f(t)$: جریان تحریک $I_q(t)$: جریان محور q $Q(t)$: توان راکتیو $V_t(t)$: ولتاژ پایانه ژنراتور

$$X_{ds} = X_r + X_L + X_d$$

$$X'_{ds} = X_r + X_L + X'_d$$

$$X_s = X_r + X_L$$

 X_r : راکتانس ترانسفورماتور X_d : راکتانس محور d ژنراتور X'_d : راکتانس گذرای محور d ژنراتور X_L : راکتانس خط انتقال X_{ad} : راکتانس متقابل بین سیم پیچی تحریک و سیم پیچی استاتور V_s : ولتاژ شین بی نهایت

شکل 1: سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت.

سیستم، منبع نامعینی‌ها هستند و میزان نامعینی هر کدام را می‌داند. برخلاف نامعینی‌های ساختاری، در نامعینی‌های غیر ساختاری، طراح تنها می‌داند که بین مدل و سیستم واقعی عدم تطابقی وجود دارد و همچنین می‌داند که میزان اختلاف بین سیستم واقعی و مدل، به‌زای ورودی‌های یکسان، چه قدر است. روش‌هایی که تاکنون برای طراحی کنترل کننده مقاوم تحریک ژنراتور به کار رفته‌اند، عمدتاً قادر هستند نامعینی‌های غیر ساختاری را در نظر بگیرند. تئوری پسخور کمی روشی است که در مدل سازی نامعینی‌های ساختاری، از سایر روش‌های کنترل مقاوم، توانا تر است. در تعیین اغلب پارامترهای ژنراتور که المان اصلی شبکه قدرت می‌باشد، می‌تواند خطا وجود داشته باشد، پارامترهایی همچون D ، T'_{d0} ، H ، X'_d و X_d . از سوی دیگر نامعینی‌های ناشی از تغییر در نقطه کار و همچنین نامعینی‌های ناشی از اغتشاش‌ها نیز به راحتی با نامعینی پارامتری قابل مدل سازی هستند؛ تغییر در نقطه کار، یعنی تغییر در توان تولیدی ژنراتور (P_m) و نامعینی‌های ناشی از اغتشاش‌ها باعث تغییر در ولتاژ و امپدانس می‌شود (توان اکتیو، ولتاژ و امپدانس از پارامترهای سیستم‌های قدرت می‌باشند). در این مقاله با استفاده از تئوری پسخور کمی غیر خطی [14] و [15] کنترل کننده مقاومی برای تحریک ژنراتور طراحی شده است. این کنترل کننده قادر است با وجود هرگونه نامعینی در پارامترهای ژنراتور، اعم از نامعینی در D ، H ، X'_d و X_d ، تغییر در نقطه کار و همچنین نامعینی‌های ناشی از اغتشاش‌ها، مشخصات مطلوب در خروجی سیستم را که در اینجا زاویه روتور ژنراتور است تأمین نماید. کنترل کننده‌ای که با روش تئوری پسخور کمی غیر خطی طراحی می‌شود، یک کنترل کننده خطی می‌باشد که پیاده سازی آن نسبت به کنترل کننده‌های غیر خطی، راحت تر است. کنترل کننده مقاومی که در این مقاله طراحی شده است، غیر متمرکز می‌باشد و از اندازه گیری‌های محلی استفاده می‌کند. با استفاده از تئوری پسخور کمی غیر خطی، از مدل غیر خطی سیستم (بدون خطی سازی حول نقاط کار) استفاده می‌شود. در این حالت کنترل کننده طراحی شده، در برابر اغتشاش‌های بزرگ عملکرد مطلوبی خواهد داشت. در صورت استفاده از تئوری پسخور کمی خطی، باید از خطی سازی سیستم حول نقطه کار استفاده شود و کنترل کننده طراحی شده در این حالت، نمی‌تواند در برابر اغتشاش‌های بزرگ، عملکرد مورد انتظار را داشته باشد.

در قسمت 2 مدل سازی ارائه شده است. در قسمت 3 استفاده از تئوری پسخور کمی غیر خطی در طراحی این کنترل کننده تشریح شده است. در بخش 4 روش پیشنهادی بر روی یک سیستم نمونه پیاده شده است و در 5 الگوریتم تعیین مبنا بیان شده است. در قسمت 6 نتایج شبیه سازی و در پایان نتیجه درج شده است.

2- مدل سازی

سیستم تک ماشین شکل 1 در نظر گرفته می‌شود. در ادامه معادلات دیفرانسیل و جبری این سیستم درج شده است.

$$F = \frac{-2HX'_d V_s}{\omega_b}, \quad G = \frac{-X'_d V_s D}{\omega_b}$$

$$K = -V_s X'_d P_m, \quad L = \frac{2HX'_d V_s}{\omega_b}$$

$$M = \frac{X'_d V_s D}{\omega_b}$$

با جایگذاری (17) در (10) و همچنین جایگذاری از (15) در (11) و جایگذاری از (11) منتهی در (10)، (18) به‌دست می‌آید

$$E_f(t) = \frac{A_1}{\sin \delta(t)} \ddot{\delta}(t) + \left(\frac{A_2 + A_7}{\sin \delta(t)} \right) \dot{\delta}^2(t) + \frac{A_4 \cos \delta(t)}{\sin^2 \delta(t)} \dot{\delta}(t) \dot{\delta}(t) + \frac{A_5 \cos \delta(t)}{\sin^2 \delta(t)} \dot{\delta}^2(t) + \left(\frac{A_3 \cos \delta(t)}{\sin^2 \delta(t)} + \frac{A_6}{\sin \delta(t)} + A_6 \sin \delta(t) \right) \dot{\delta}(t) + \frac{A_9}{\sin \delta(t)} \quad (18)$$

$$A_1 = \frac{-2HT'_d X'_d}{V_s \omega_b}, \quad A_2 = \frac{-T'_d X'_d D}{V_s \omega_b}$$

$$A_3 = \frac{-T'_d X'_d P_m}{V_s}, \quad A_4 = \frac{2HT'_d X'_d}{V_s \omega_b}$$

$$A_5 = \frac{T'_d X'_d D}{V_s \omega_b}, \quad A_6 = \frac{-T'_d (X_d - X'_d)}{X_{ds}}$$

$$A_7 = \frac{-2HX'_d}{V_s \omega_b}, \quad A_8 = \frac{-DX'_d}{V_s \omega_b}$$

$$A_9 = \frac{X'_d P_m}{V_s}$$

رابطه (18) یک معادله دیفرانسیل درجه 3 و از نوع غیر خطی است که بیانگر رابطه بین زاویه روتور ژنراتور یعنی δ و ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچی تحریک می‌باشد.

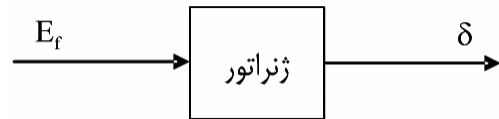
3- طراحی کنترل‌کننده مقاوم برای تحریک ژنراتور

برای طراحی کنترل‌کننده مقاوم با روش تئوری پسخور کمی، دو روش وجود دارد که به نام‌های روش اول و دوم هورویتز شناخته می‌شوند. در روش اول، یک سیستم غیر خطی نامعین با یک مجموعه از توابع خطی معادل جایگزین می‌گردد. این مجموعه معادل خطی، همان رفتاری را دارد که سیستم غیر خطی اولیه داراست. یکی از محاسن روش اول این است که امکان استفاده از آن برای فرآیندهایی است که مدل تحلیلی برای آن وجود ندارد ولی اطلاعات ورودی و خروجی فرآیند در دسترس هستند.

در روش دوم هورویتز، یک سیستم غیر خطی نامعین به دو بخش غیر خطی و خطی نامعین تقسیم می‌شود. بخش غیر خطی به‌صورت اغتشاش در ورودی و بخش خطی، به‌فرم یک سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان مدل می‌شود (شکل 3).

یکی از مزایای روش دوم، مناسب‌تر بودن آن برای طراحی کنترل‌کننده به‌منظور تعقیب و تنظیم به‌طور هم‌زمان می‌باشد [16].

برای طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی در این مقاله از روش دوم هورویتز استفاده شده است، زیرا در طراحی این کنترل‌کننده، تعقیب و تنظیم هر دو



شکل 2: مدل تک‌ورودی/تک‌خروجی ژنراتور.

در اینجا هدف این است که برای ژنراتور، یک مدل تک‌ورودی/تک‌خروجی به فرم شکل 2 به‌دست آید، به‌طوری که ورودی آن ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچی تحریک و خروجی، زاویه روتور ژنراتور (δ) باشد. در این صورت می‌توان با کنترل ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچی تحریک، بر وضعیت زاویه روتور تأثیر گذاشت و باعث بهبود پایداری شد. همچنین اگر بتوان کنترل‌کننده مقاومی برای این سیستم طراحی نمود، بدین معنی خواهد بود که در برابر عدم قطعیت‌های مدل شده در طراحی کنترل‌کننده، زاویه روتور ژنراتور، با ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچی تحریک به‌طور مطلوب کنترل خواهد شد. این به معنی بهبود پایداری خواهد بود.

رابطه (10) با استفاده از (3) حاصل می‌شود

$$E_f(t) = T'_{d0} \dot{E}'_q(t) + E_q(t) \quad (10)$$

و (11) با استفاده از (5) حاصل می‌شود

$$E_q(t) = \frac{X_{ds} P_e(t)}{V_s \sin \delta(t)} \quad (11)$$

و (12) با استفاده از (4) به‌دست می‌آید

$$E'_q(t) = \frac{X'_d}{X_{ds}} \left(E_q(t) + \frac{(X_d - X'_d) V_s \cos \delta(t)}{X'_d} \right) \quad (12)$$

با مشتق‌گیری از (12)، (13) و با مشتق‌گیری از (11)، (14) حاصل می‌شود

$$\dot{E}'_q(t) = \frac{X'_d}{X_{ds}} \left(\dot{E}_q(t) - \frac{(X_d - X'_d) V_s \dot{\delta}(t) \sin \delta(t)}{X'_d} \right) \quad (13)$$

$$\dot{E}_q(t) = \frac{X_{ds} V_s \dot{P}_e(t) \sin \delta(t) - X_{ds} V_s \dot{\delta}(t) P_e(t) \cos \delta(t)}{(V_s \sin \delta(t))^2} \quad (14)$$

و (15) با استفاده از (2) حاصل می‌شود

$$P_e(t) = -\frac{2H}{\omega_b} \Delta \dot{\omega}(t) - \frac{D}{\omega_b} \Delta \omega(t) + P_m$$

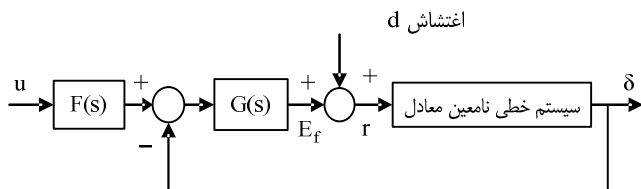
$$= -\frac{2H}{\omega_b} \ddot{\delta}(t) - \frac{D}{\omega_b} \dot{\delta} + P_m \quad (15)$$

و با مشتق‌گیری از (15)، (16) حاصل می‌شود

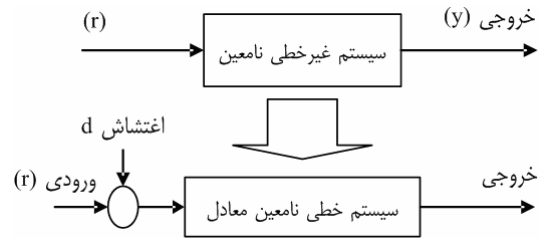
$$\dot{P}_e(t) = -\frac{2H}{\omega_b} \ddot{\delta}(t) - \frac{D}{\omega_b} \dot{\delta}(t) \quad (16)$$

با جایگذاری از (15) و (16) در (14) و سپس جایگذاری (14) در (13)، (17) حاصل می‌شود

$$\dot{E}'_q(t) = \frac{F \ddot{\delta}(t) \sin \delta(t) + G \dot{\delta}(t) \sin \delta(t) + K \dot{\delta}(t) \cos \delta(t)}{(V_s \sin \delta(t))^2} + \frac{L \ddot{\delta}(t) \dot{\delta}(t) \cos \delta(t) + M \dot{\delta}^2(t) \cos \delta(t)}{(V_s \sin \delta(t))} - \frac{(X_d - X'_d) V_s \dot{\delta}(t) \sin \delta(t)}{X_{ds}} \quad (17)$$



شکل 4: ساختار کنترل کننده مقاوم با روش تئوری پسخور کمی.



شکل 3: روش دوم هورویتر.

4- طراحی کنترل کننده مقاوم برای یک مثال نمونه

پارامترهای مختلف سیستم شکل 1 به همراه نامعینی‌ها عبارتند از

$$\begin{aligned} 1,6 \leq X_q \leq 1,8 \text{ (p.u.)} \quad , \quad 0,25 \leq X_d' \leq 0,35 \text{ (p.u.)} \\ 7,5 \leq T_{d0}' \leq 8,5 \text{ sec} \quad , \quad 1,7 \leq X_d \leq 1,9 \text{ (p.u.)} \\ \omega_0 = 314,16 \text{ (rad/s)} \quad , \quad 4,5 \leq D \leq 5,5 \text{ (p.u.)} \\ 3 \leq H \leq 4 \text{ (s)} \end{aligned} \quad (24)$$

با توجه به توضیحات بخش قبل، مقرر شد که عبارت‌هایی همچون $\sin \delta$ و $\cos \delta$ نیز جزء پارامترهای نامعین در نظر گرفته شوند. با این توصیف، محدوده تغییرات پارامتر δ طبق (25) در نظر گرفته می‌شود

$$0,2 \leq \delta \leq 1,5 \text{ rad} \quad (25)$$

حدود تغییرات نقطه کار از (26) تبعیت می‌کند

$$0,2 \leq P_m \leq 1,0 \text{ p.u.} \quad (26)$$

برخی از نامعینی‌ها در اثر اغتشاش‌های شبکه ایجاد می‌شود. اثر این اغتشاش‌ها، تغییر در ولتاژ V_s و همچنین راکتانس شبکه است. حدود این نامعینی‌ها در (27) درج شده است

$$0,2 \leq X_L \leq 0,4 \text{ p.u.} \quad , \quad 0,2 \leq V_s \leq 1,0 \text{ p.u.} \quad (27)$$

با توجه به نامعینی‌های فوق، محدوده تغییرات ضرایب k_1 ، k_2 و k_3 به شرح زیر تعیین می‌گردد

$$\begin{aligned} -0,88 \leq k_1 \leq -0,38 \\ -0,92 \leq k_2 \leq -0,47 \\ -10,7 \leq k_3 \leq -8,03 \end{aligned} \quad (28)$$

هدف، طراحی کنترل کننده و پیش‌فیلتری مناسب است که ورودی پله را بتواند ردیابی کند و شرایط زیر را دارا باشد
الف) شرط پایداری مقاوم

$$\left| \frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq 1,2 \quad \text{ب) حدود مقاوم}$$

$$B \leq F(j\omega) \frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \leq A \quad \text{ج) ردیابی مقاوم}$$

که

$$\begin{aligned} A &= \frac{0,6584(j\omega + 30)}{(j\omega)^2 + 4(j\omega) + 19,752} \\ B &= \frac{120}{(j\omega)^3 + 17(j\omega)^2 + 852(j\omega) + 1200} \end{aligned}$$

$$\frac{Y(j\omega)}{d(j\omega)} < 0,01 \quad \text{د) حذف اغتشاش در ورودی}$$

مورد هدف می‌باشد. تمامی جملات (18) غیر خطی هستند، به منظور طراحی کنترل کننده مقاوم برای این سیستم، با استفاده از دو تکنیک، سیستم خطی معادل به دست آمده است. این دو تکنیک عبارتند از:
1) سه جمله از جملات (18) (جملاتی که در (19) زیر آنها خط کشیده شده است)، به صورت اغتشاش در ورودی در نظر گرفته می‌شوند

$$\begin{aligned} E_f(t) - \frac{A_4 \cos \delta(t)}{\sin^2 \delta(t)} \ddot{\delta}(t) \dot{\delta}(t) - \frac{A_5 \cos \delta(t)}{\sin^2 \delta(t)} \delta^2(t) \\ - \frac{A_9}{\sin \delta(t)} = \frac{A_1}{\sin \delta(t)} \ddot{\delta}(t) + \left(\frac{A_2 + A_7}{\sin \delta(t)} \right) \dot{\delta}(t) \\ + \left(\frac{A_3 \cos \delta(t)}{\sin^2 \delta(t)} + \frac{A_8}{\sin \delta(t)} + A_6 \sin \delta(t) \right) \dot{\delta}(t) \end{aligned} \quad (19)$$

یعنی

$$\begin{aligned} d(t) = - \left(\frac{A_4 \cos \delta(t)}{\sin^2 \delta(t)} \ddot{\delta}(t) \dot{\delta}(t) \right. \\ \left. + \frac{A_5 \cos \delta(t)}{\sin^2 \delta(t)} \delta^2(t) + \frac{A_9}{\sin \delta(t)} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

جملات سمت راست (19) هنوز غیر خطی می‌باشد. برای ساختن یک سیستم خطی، از تکنیک شماره 2 استفاده شده است.

2) عباراتی مثل $\sin \delta(t)$ و $\cos \delta(t)$ را می‌توان به صورت عباراتی نامعین در نظر گرفت و با توجه به آنکه دامنه تغییرات آنها مشخص و معین است، می‌توان آنها را با بقیه ضرایب ترکیب نمود و ضرایب نامعین جدیدی به شرح زیر تعریف کرد

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{A_1}{\sin \delta(t)} \\ k_2 &= \frac{A_2 + A_7}{\sin \delta(t)} \\ k_3 &= \frac{A_3 \cos \delta(t)}{\sin^2 \delta(t)} + \frac{A_8}{\sin \delta(t)} + A_6 \sin \delta(t) \end{aligned} \quad (21)$$

دامنه تغییرات ضرایب نامعین جدید قابل تعیین است؛ زیرا دامنه تغییرات اجزای تشکیل دهنده هر ضریب شناخته شده و قابل تعیین می‌باشد.

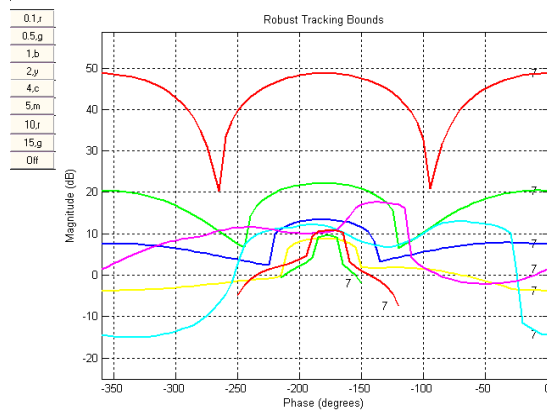
به این ترتیب، (19) به رابطه زیر تبدیل خواهد شد

$$E_f(t) + d(t) = r'(t) = k_1 \ddot{\delta}(t) + k_2 \dot{\delta}(t) + k_3 \delta(t) \quad (22)$$

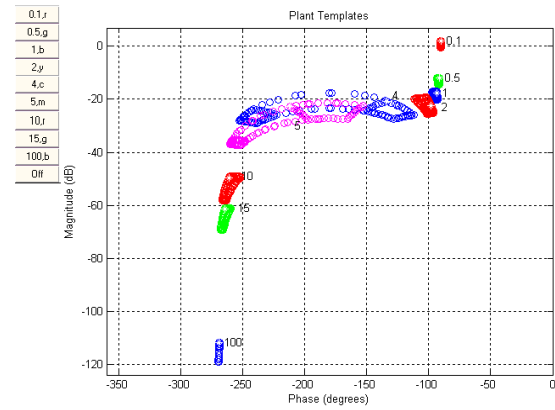
تابع تبدیل سیستم خطی نامعین معادل عبارت است از

$$T(s) = \frac{\delta(s)}{r(s)} = \frac{1}{s(k_1 s^2 + k_2 s + k_3)} \quad (23)$$

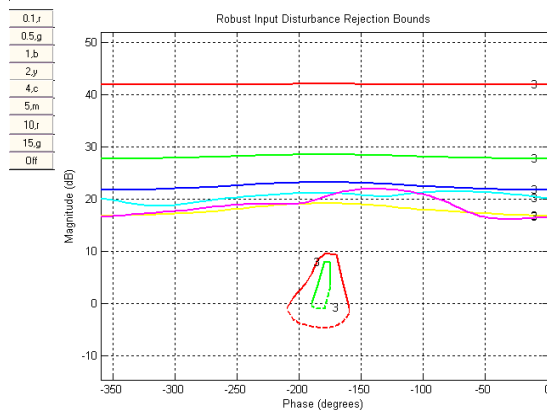
حال برای این سیستم خطی نامعین معادل، با اغتشاش تعریف شده در ورودی، می‌توان با استفاده از تئوری پسخور کمی کنترل کننده و پیش‌فیلتر مناسب را طراحی کرد (شکل 4).



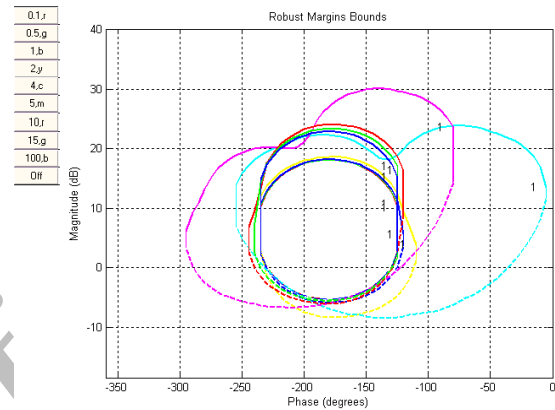
شکل 7: باندهای ردیابی مقاوم.



شکل 5: تمپلت‌ها.



شکل 8: باندهای حذف اغتشاش ورودی.



شکل 6: باندهای حدود مقاوم.

$$F(s) = \frac{1}{0.005337s^3 + 0.092388s^2 + 0.4354s + 1.0} \quad (30)$$

5- الگوریتم تعیین مبنا

در سیستم کنترل طراحی شده، خروجی سیستم، زاویه روتور (δ) است (شکل 4). در روش معمول کنترل ژنراتور، هدف تثبیت ولتاژ پایانه در مقدار برنامه‌ریزی شده می‌باشد. در این قسمت از مقاله، الگوریتمی ارائه می‌گردد که مقدار مبنا (u) را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که ولتاژ پایانه در مقدار برنامه‌ریزی شده تثبیت گردد.

با جایگذاری به‌جای عبارت $E_q(t)$ از (5) در (9)، (31) حاصل می‌شود

$$V_i(t) = \frac{1}{X_{ds}} \times \left[\frac{X_s^2 X_{ds}^2 P_e^2(t)}{V_s^2 \sin^2 \delta(t)} + V_s^2 X_d^2 + 2X_s X_d X_{ds} P_e(t) \cot g \delta(t) \right]^{1/2} \quad (31)$$

با جایگذاری به‌جای $P_e(t)$ از (15) در (31)، (32) حاصل می‌شود.

رابطه (32) مقدار لحظه‌ای ولتاژ پایانه ژنراتور را بر حسب زاویه روتور ($\delta(t)$) بیان می‌کند. در حالت ماندگار مقدار $\dot{\delta}$ و $\ddot{\delta}$ برابر صفر است، بنابراین در حالت ماندگار، (32) به (33) تبدیل می‌شود

$$V_i(t) = \frac{1}{X_{ds}} \left[\frac{X_s^2 X_{ds}^2 \left(\frac{-2H\ddot{\delta}(t)}{\omega_0} - \frac{D\dot{\delta}(t)}{\omega_0} + P_m \right)^2}{V_s^2 \sin^2 \delta(t)} + V_s^2 X_d^2 + 2X_s X_d X_{ds} \left(\frac{-2H\ddot{\delta}(t)}{\omega_0} - \frac{D\dot{\delta}(t)}{\omega_0} + P_m \right) \cot g \delta(t) \right]^{1/2} \quad (32)$$

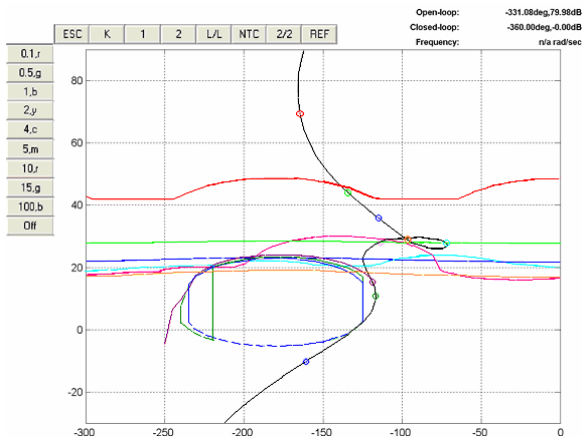
در شکل 5 تمپلت‌ها در بازه فرکانسی 0/1 تا 100 هرتز نشان داده شده است. ذکر یک نکته در اینجا لازم است و آن این است که ضرایب k_1 ، k_2 و k_3 طبق (28)، هر سه اعدادی منفی هستند و بنابراین از یک منفی در تابع تبدیل (23) فاکتور گرفته شده است و به‌صورت یک بهره برابر با 1- در شاخه پیش‌خور ضرب می‌شود.

در شکل 6 باندهای حدود مقاوم ترسیم شده است. در شکل 7 باندهای ردیابی مقاوم و در شکل 8 باندهای حذف اغتشاش ورودی و همچنین در شکل 9 همه باندها ترسیم شده است. در شکل 10 نیز تلاقی تمامی باندها ترسیم شده است. در تلاقی همه باندها، در هر فرکانسی، باندی که زودتر از بقیه ایجاد محدودیت می‌کند، به‌عنوان حد غالب در آن فرکانس در نظر گرفته می‌شود.

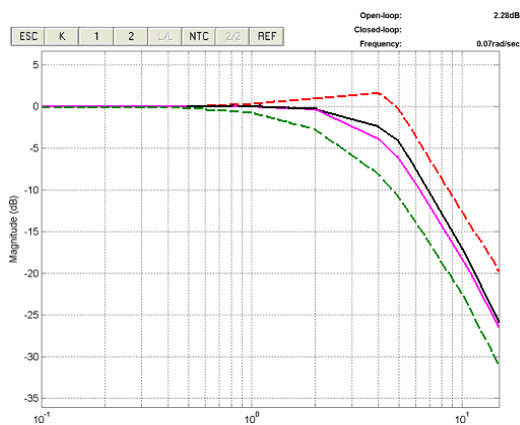
در شکل 11 شکل‌دادن به کنترل‌کننده مقاوم برای سیستم نامی $G_0(j\omega)$ ترسیم شده است. کنترل‌کننده مقاوم طراحی شده طبق (29) می‌باشد

$$G(s) = \frac{44783(s^5 + 15.96s^4 + 94.21s^3 + 364s^2 + 742.5s + 302.3)}{s^5 + 364.14s^4 + 27718s^3 + 265980s^2 + 577930s + 4491.7} \quad (29)$$

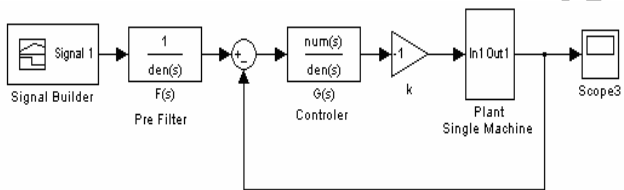
در شکل 12، نحوه تعیین تابع پیش‌فیلتر برای این مثال نمونه نشان داده شده است. تابع پیش‌فیلتر طراحی شده، طبق (30) می‌باشد



شکل 11: طراحی کنترل کننده در دیاگرام نیکولز.



شکل 12: طراحی تابع پیش فیلتر $(F(j\omega))$.



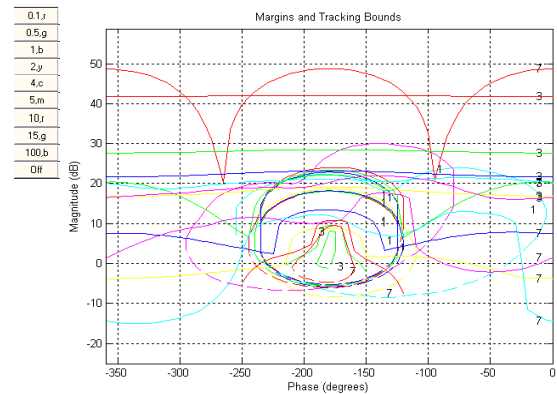
شکل 13: سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت به همراه کنترل کننده مقاوم.

6- نتایج عددی

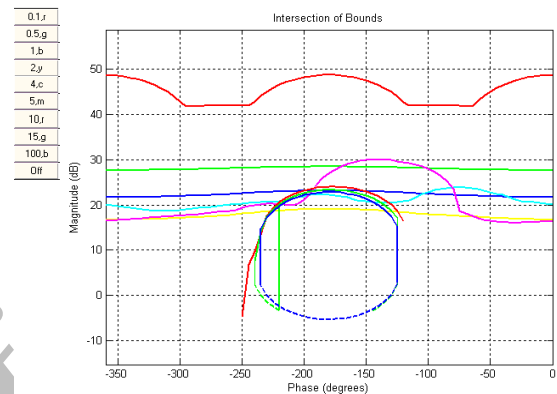
در این بخش دو سری آزمایش برای بررسی عملکرد کنترل کننده مقاوم طراحی شده انجام شده است. در بخش اول عملکرد این کنترل کننده در برابر نامعینی های مختلفی که ممکن است در سیستم وجود داشته باشد، اعم از نامعینی های پارامتری ژنراتور و نامعینی ناشی از تغییرات نقطه کار، مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم، عملکرد این کنترل کننده در برابر اغتشاش ها (که می تواند عامل بخشی از نامعینی ها باشد) مورد آزمایش قرار گرفته است و عملکرد آن با عملکرد یک سیستم تحریک متداول مقایسه شده است.

بخش اول

در شکل 13، کنترل کننده مقاوم طراحی شده، به سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت اعمال شده است. در شکل مزبور بلوک Plant، همان سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت (سیستم غیر خطی اصلی) است که ورودی آن، ولتاژ اعمالی به سیم پیچی تحریک (E_f) و خروجی آن، زاویه روتور ژنراتور (δ) می باشد. $G(s)$ تابع کنترل کننده طراحی شده (ابطه (29)) و $F(s)$ تابع پیش فیلتر طراحی شده (ابطه (30))



شکل 9: همه باندها.



شکل 10: تلاقی باندها.

$$V_{ISS} = \frac{1}{X_{ds}} \times \left[\frac{X_s^2 X_{ds}^2 P_m^2}{V_s^2 \sin^2 \delta_{ss}} + V_s^2 X_d^2 + 2X_s X_d X_{ds} P_m \cot g \delta_{ss} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

در یک نقطه کار، مقدار توان تولیدی (P_m) و همچنین ولتاژ پایانه (V_r) از پیش تعیین شده است. می توان با استفاده از (33) مقدار زاویه روتور (δ) در هر نقطه کار را تعیین کرد. روش کار با روابطی که در ادامه می آید، بیان می شود. این مقدار زاویه روتور، به عنوان مرجع در بلوک کنترلی شکل 3 به کار گرفته می شود. عبارت های V_{ISS} و δ_{ss} ، به مقادیر این دو پارامتر در حالت ماندگار دلالت دارد.

در اینجا برای ساده سازی محاسبات، از جایگزینی های قراردادی زیر استفاده می شود

$$A_1 = \frac{X_s^2 X_{ds}^2 P_m^2}{V_s^2}, \quad A_2 = 2X_s X_d X_{ds} P_m \quad (34)$$

با جایگزینی از (33) در (32) و با اندکی محاسبات ریاضی رابطه زیر حاصل می شود

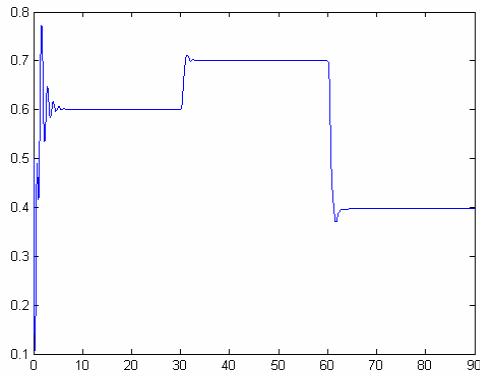
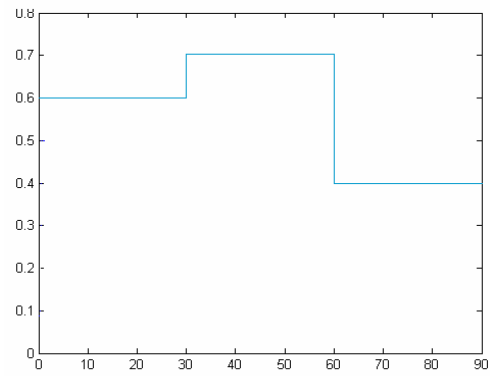
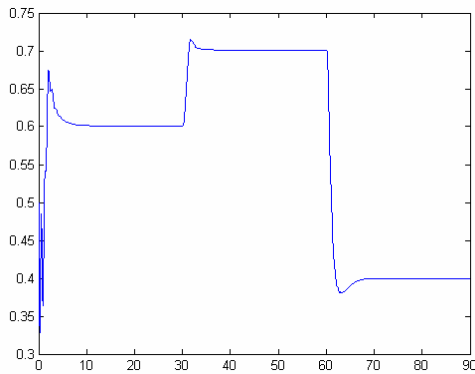
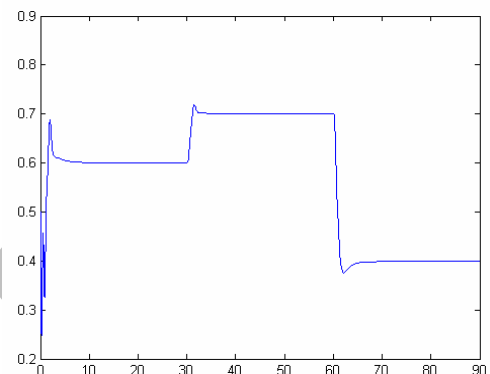
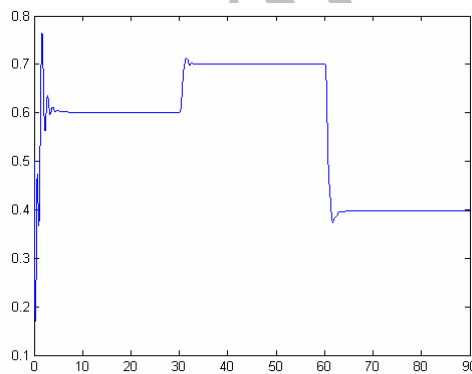
$$A_1 \cot g^2 \delta_{ss} + A_2 \cot g \delta_{ss} - A_3 = 0 \quad (35)$$

که

$$A_3 = V_{ISS}^2 X_{ds}^2 - V_s^2 X_d^2 - A_1 \quad (36)$$

از حل معادله درجه دو بیان شده در (35)، مقدار δ_{ss} تعیین می گردد. این مقدار، به عنوان مرجع زاویه در بلوک کنترلی شکل 3 مورد استفاده قرار می گیرد (ابطه (37))

$$u = \delta_{ss} \quad (37)$$

شکل 16: تغییرات زمانی سیگنال خروجی (δ) به‌ازای حالت 2 جدول 1.شکل 14: تغییرات زمانی سیگنال ورودی (δ_{ref}).شکل 17: تغییرات زمانی سیگنال خروجی (δ) به‌ازای حالت 3 جدول 1.شکل 15: تغییرات زمانی سیگنال خروجی (δ) به‌ازای حالت 1 جدول 1.شکل 18: تغییرات زمانی سیگنال خروجی (δ) به‌ازای حالت 4 جدول 1.

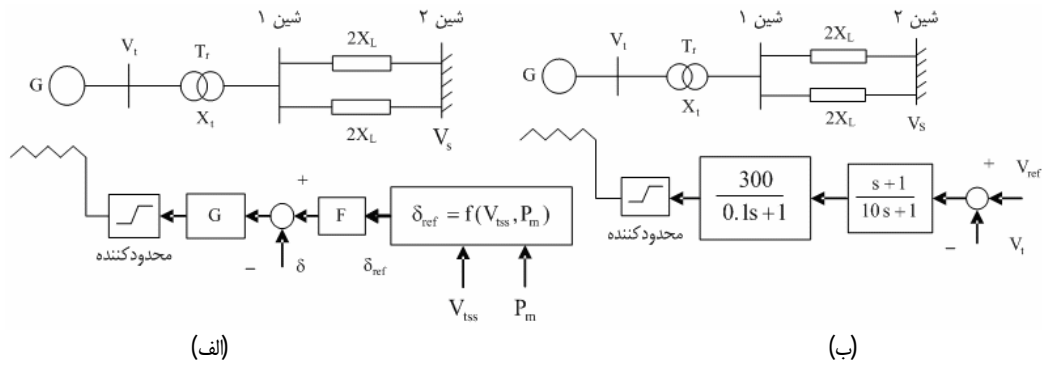
جدول 1: حالت‌های تعریف‌شده برای سیستم تک‌ماشین، با تغییر در پارامترهای نامعین سیستم.

	X_d (p.u.)	X'_d (p.u.)	T'_{d0} (s)	H (s)	D (p.u.)	X_L (p.u.)	V_s (p.u.)	P_m (p.u.)
حالت 1	1,81	0,3	8	3,5	4,9	0,2	1,0	0,37
حالت 2	1,7	0,35	8,5	3	5,5	0,3	0,9	0,6
حالت 3	1,9	0,25	7,5	4	4,5	0,25	0,95	0,5
حالت 4	1,8	0,3	8	4	5,0	0,4	0,8	0,9

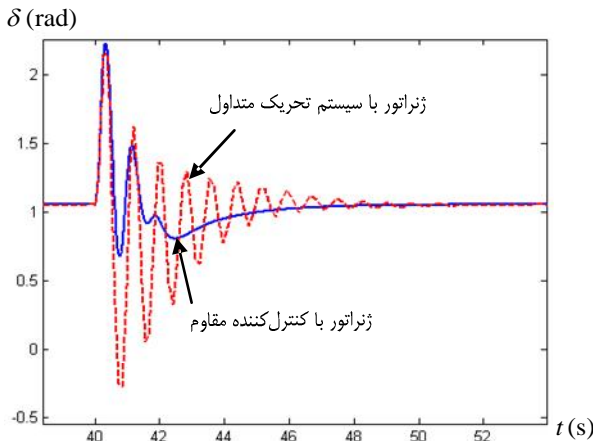
با بررسی پاسخ خروجی سیستم در چهار حالت فوق، نتایج زیر حاصل می‌شود:

- نوسانات موجود در پاسخ زمانی سیستم در فاصله زمانی صفر تا پنج ثانیه، علاوه بر اثر پله ورودی، دربرگیرنده گذرای ناشی از شرایط اولیه نیز می‌باشد و همان‌طور که دیده می‌شود در لحظات بعدی تغییر ورودی (لحظات 30 و 60 ثانیه)، مقدار نوسانات در خروجی سیستم، بسیار کمتر از نوسانات موجود در ابتدای پاسخ است.
- خروجی، ورودی سیستم را به‌خوبی ردیابی می‌کند.

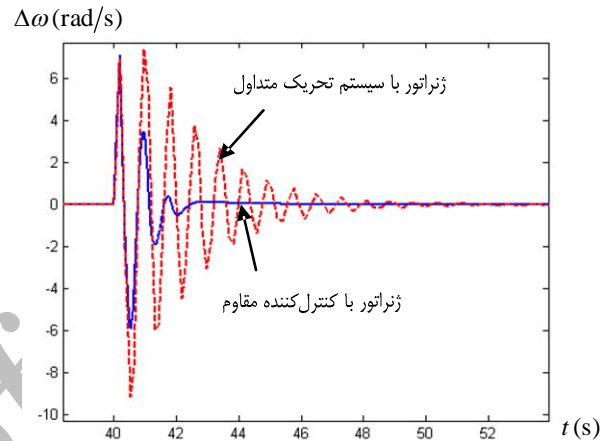
می‌باشد. برای نشان‌دادن عملکرد این سیستم در ردیابی ورودی و همچنین مشخصات زمانی پاسخ خروجی و مقاوم‌بودن کنترل‌کننده طراحی شده در برابر نامعینی‌های تعریف‌شده، به این سیستم یک سیگنال پله به‌صورت شکل 14 اعمال شده است و پاسخ زمانی سیستم به‌ازای چهار حالت به‌دست آمده است. این چهار حالت، با تغییر در پارامترهای نامعین سیستم تعریف شده‌اند. اطلاعات این چهار حالت در جدول 1 درج گردیده است. در شکل‌های 15 الی 18 نیز پاسخ زمانی سیستم (تغییرات زمانی δ) به‌ازای این چهار حالت نشان داده شده است.



شکل 19: (الف) سیستم تک‌ماشین متصل به شین بی‌نهایت مجهز به کنترل‌کننده مقاوم طراحی‌شده و (ب) سیستم تک‌ماشین متصل به شین بی‌نهایت مجهز به سیستم تحریک متداول.



شکل 21: تغییرات زمانی δ در بار 0,9 پریونیت با سیستم تحریک متداول و کنترل‌کننده مقاوم.



شکل 20: تغییرات زمانی $\Delta\omega$ در بار 0,9 پریونیت با سیستم تحریک متداول و کنترل‌کننده مقاوم.

می‌دهد و به مدت 0,2 ثانیه به طول می‌انجامد. تغییرات زمانی $\Delta\omega$ ، δ ، V_t و P_e در دو سیستم (سیستم مجهز به تحریک متداول و سیستم مجهز به کنترل‌کننده مقاوم طراحی‌شده)، به ترتیب در شکل‌های 20 الی 23 نشان داده شده است. با استفاده از الگوریتم بخش 5، برای این نقطه کار $\delta_{ref} = 1,0547$ (p.u.) تعیین گردیده است. با توجه به وجود خطای ماندگار در سیستم تحریک سنتی (شکل 18-ب)، در این نقطه کار مقدار $V_{ref} = 1,049$ (p.u.) قرار داده شده است. لازم به توضیح است که حد بالا و پایین در محدودکننده در شکل 19 به ترتیب 7 و -7 در نظر گرفته شده است.

آزمایش دوم

در آزمایش دوم مشخصات نقطه کار عبارتست از $P_m = 0,6$ (p.u.) و $V_t = 1,05$ (p.u.) و سایر مشخصات سیستم، مشابه آزمایش قبل است. در شین شماره 2 یک اتصال کوتاه سه‌فاز در لحظه $t = 40$ ثانیه رخ می‌دهد و به مدت 0,2 ثانیه به طول می‌انجامد و با خروج یکی از دو خط موازی بین شین‌های 1 و 2 خاتمه می‌یابد. تغییرات زمانی چهار متغیر فوق در شکل‌های 24 الی 27 نشان داده شده است. با استفاده از الگوریتم بخش 5، برای این نقطه کار $\delta_{ref} = 0,79$ (p.u.) تعیین گردیده است. با توجه به وجود خطای ماندگار در سیستم تحریک سنتی (شکل 19-ب)، در این نقطه کار مقدار $V_{ref} = 1,057$ (p.u.) قرار داده شده است.

با بررسی پاسخ زمانی خروجی‌ها، نتایج زیر حاصل می‌گردد:

- 1) کنترل‌کننده مقاوم نوسانات زاویه‌ای را به نحو مطلوبی کاهش داده است که این امر در بهبود پایداری سیستم قدرت مؤثر است.
- 2) کنترل‌کننده مقاوم با تغییر نقطه کار عملکرد یکسانی دارد و با تغییر نقطه کار، نیازی به تغییر پارامترهای کنترل‌کننده نیست.

- سیستم کنترل طراحی‌شده، در برابر نامعینی‌های سیستم مقاوم است و با تغییر پارامترهای نامعین سیستم، از جمله پارامترهای خود زنانور (X_d ، X'_d ، T_{d0} ، H و D) و یا پارامترهای شبکه (V_s و X_L) و همچنین تغییر در نقطه کار (تغییر در P_m)، تغییرات موجود در پاسخ سیستم، در محدوده مجاز می‌باشد.

- میزان بالادگی‌ها، کم است (به‌استثنای لحظات اول که علت آن در بالا تشریح گردید).

- زمان صعود و همچنین زمان نشست نیز معقول و منطقی است.

بخش دوم

در بخش دوم از آزمایش‌ها، عملکرد کنترل‌کننده مقاوم تحریک، با یک سیستم تحریک متداول (شکل 19) مقایسه شده است. در این بخش دو آزمایش بر روی این دو سیستم انجام شده است که در ادامه تشریح شده است. لازم به توضیح است که در این آزمایش‌ها از همان سیستم غیر خطی اصلی که یک بار مجهز به سیستم تحریک متداول و بار دیگر مجهز به کنترل‌کننده مقاوم طراحی‌شده در این مقاله می‌باشد، استفاده شده است.

آزمایش اول

مشخصات سیستم به شرح زیر است

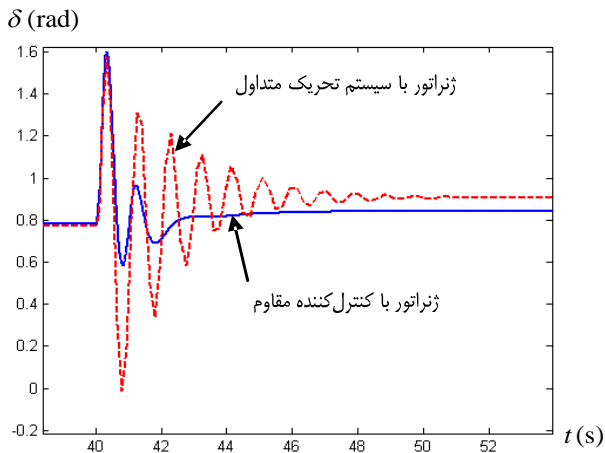
$$X_T = 0,08 \text{ (p.u.)}, T_{d0}' = 8 \text{ sec}, X_d = 1,81 \text{ (p.u.)}$$

$$V_t = 1,04 \text{ (p.u.)}, X'_d = 0,3 \text{ (p.u.)}, X_L = 0,2 \text{ (p.u.)}$$

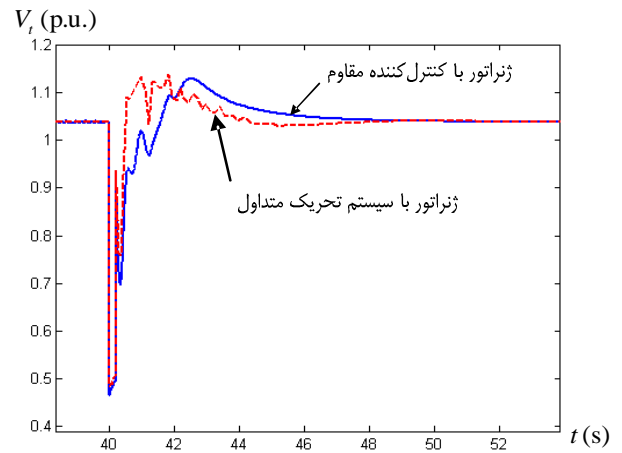
$$H = 3,5 \text{ (s)}, \omega_0 = 314,16 \text{ (rad/s)}, P_m = 0,9 \text{ (p.u.)}$$

$$V_s = 1 \text{ (p.u.)}, D = 4,9 \text{ (p.u.)}$$

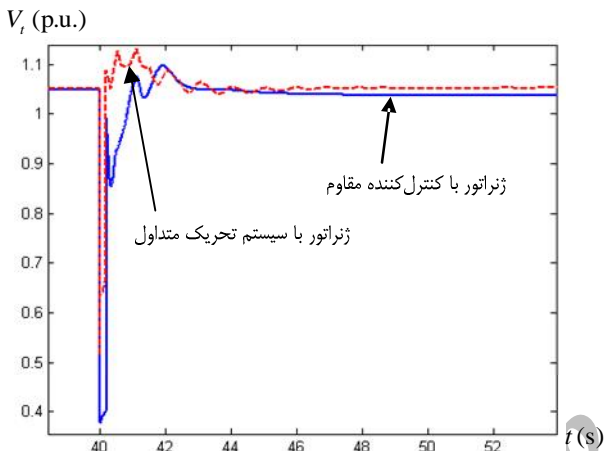
در شین شماره 2 یک اتصال کوتاه سه‌فاز در لحظه $t = 40$ ثانیه رخ



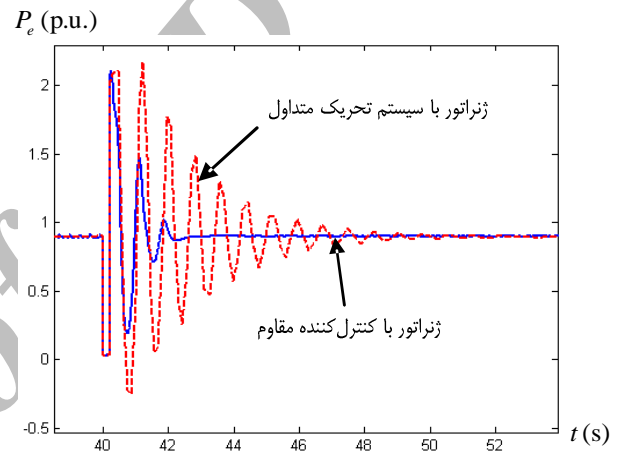
شکل 25: تغییرات زمانی δ در بار 0,6 پریونیت با سیستم تحریک متداول و کنترل کننده مقاوم.



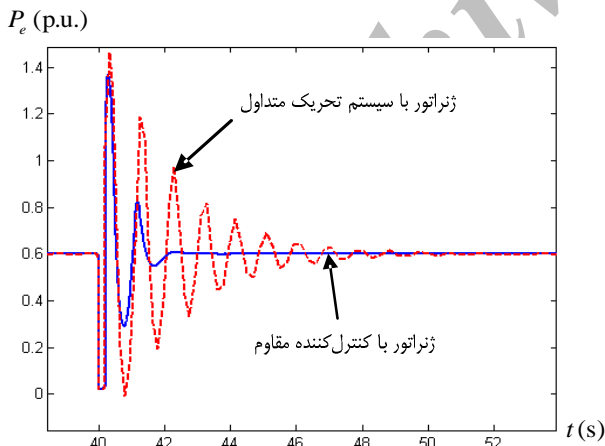
شکل 22: تغییرات زمانی V_t در بار 0,9 پریونیت با سیستم تحریک متداول و کنترل کننده مقاوم.



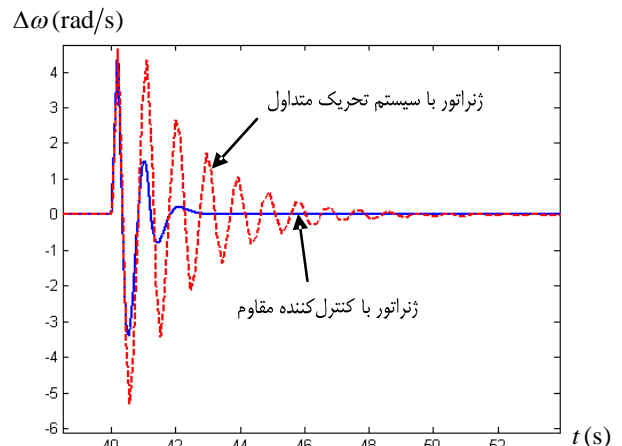
شکل 26: تغییرات زمانی V_t در بار 0,6 پریونیت با سیستم تحریک متداول و کنترل کننده مقاوم.



شکل 23: تغییرات زمانی P_e در بار 0,9 پریونیت با سیستم تحریک متداول و کنترل کننده مقاوم.



شکل 27: تغییرات زمانی P_e در بار 0,6 پریونیت با سیستم تحریک متداول و کنترل کننده مقاوم.



شکل 24: تغییرات زمانی $\Delta\omega$ در بار 0,6 پریونیت با سیستم تحریک متداول و کنترل کننده مقاوم.

اینجا زاویه روتور ژنراتور است تأمین نماید. این کنترل کننده با استفاده از تئوری پسخور کمی غیر خطی طراحی شده است. کنترل کننده طراحی شده یک کنترل کننده خطی می‌باشد که از نظر ساخت، بر کنترل کننده‌های غیر خطی برتری دارد. طراحی کنترل مقاوم تحریک و توربین با استفاده از تئوری پسخور کمی غیر خطی، از تحقیقات آتی محققین این مقاله است. همچنین با توجه به آنکه در این مقاله، آزمایش عملی انجام نشده است، مؤلفین مقاله، پیاده‌سازی عملی طرح مزبور را در دست انجام دارند.

7- نتیجه گیری

در این مقاله، یک کنترل کننده خطی مقاوم برای سیستم تحریک طراحی شده است که انواع نامعینی‌های ممکن در سیستم را که می‌تواند ناشی از تغییر در نقطه کار، تغییرات شبکه و همچنین نامعینی‌های پارامتری ژنراتور باشد را شامل می‌شود. این کنترل کننده قادر است با وجود هرگونه نامعینی‌های فوق، مشخصات مطلوب در خروجی سیستم را که در

مراجع

- [12] P. S. Rao and I. Sen, "Robust tuning of power system stabilizers using QFT," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 478-486, Jul. 1999.
- [13] A. M. Stancovic, G. Tadmor, and T. A. Shakhruk, "On robust control analysis and design for load frequency regulation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 449-454, May 1998.
- [14] O. Yaniv, *Quantitative Feedback Design of Linear and Nonlinear Control Systems*, Kluwer Academic Publications, Norwell, Massachusetts, 1999.
- [15] I. M. Horowitz and Y. K. Liao, "Quantitative non-linear compensation for saturating unstable uncertain plants," *Int. J. Control, Proc.*, vol. 44, no. 4, pp. 1137-1146, Oct. 1986.
- [16] م. رفیعیان، روشی نو در طراحی کنترل کننده‌های QFT برای فرآیندهای چندمتغیره غیر خطی نامعین، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان، 1377.
- اصغر اکبری فرود** مدرک کارشناسی را در رشته مهندسی برق - قدرت در سال 1372 از دانشگاه تهران و مدرک کارشناسی ارشد و دکتری را در همان رشته به ترتیب در سالهای 1376 و 1385 از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. او هم اکنون استادیار دانشگاه سمنان است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده دینامیک، کنترل و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، سیستم‌های توزیع و بازار برق است.
- حسین سیفی**، تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری به ترتیب از دانشگاه شیراز، دانشگاه منچستر (یومبست) و دانشگاه منچستر (یومبست) در سالهای 1359، 1366 و 1368 اخذ نموده و از سال 1368 به دانشگاه تربیت مدرس پیوسته است که هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر این دانشگاه است. زمینه‌های مورد علاقه نامبرده، دینامیک، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است.
- علی خاکی صدیق**، تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری به ترتیب از دانشگاه نیوکاسل، دانشگاه منچستر و دانشگاه سالفورد در سالهای 1363، 1365 و 1367 اخذ نموده و از سال 1367 به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران پیوسته است که هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر این دانشگاه است. زمینه‌های مورد علاقه نامبرده، کنترل چند متغیره، کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی است.
- [1] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton, and L. Gao, "Transient stability enhancement and voltage regulation of power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 620-627, May. 1993.
- [2] Y. Guo, D. J. Hill, and Y. Wang, "Global transient stability and voltage regulation for power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 678-688, Nov. 2001.
- [3] M. D. Ilic, J. W. Chapman, and C. A. King, "Feedback linearizing excitation control on a full - scale power system model," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 1102-1109, May 1994.
- [4] O. Akhrif, F. A. Okou, L. A. Dessaint, and R. Champagne, "Application of a multivariable feedback linearization scheme for rotor angle stability and voltage regulation of power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 620-628, May 1999.
- [5] H. Boules, S. Peres, T. Margotin, and M. P. Houry, "Analysis and design of a robust coordinated AVR/PSS," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 568-575, May 1998.
- [6] A. Elices, L. Rouco, H. Bourlès, and T. Margotin, "Design of robust controllers for damping inter - area oscillations: application to the european power system," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1058-1067, May 2004.
- [7] S. Xie, L. Xie, Y. Wang, and G. Guo, "Decentralised control of multi - machine power systems with guaranteed performance," in *IEE Proc. -Control Theory Application*, vol. 147, no. 3, pp. 355-365, May 2000.
- [8] Y. Zhang, C. Wen, and Y. C. Soh, "Transient stability enhancement of power systems by robust adaptive control with saturation constraint," in *Proc. of IEEE Int. Conf. on Control Applications*, vol. 2, pp. 1187-1192, Aug. 1999.
- [9] X. G. Yan, C. Edwards, S. K. Spurgeon, and J. A. M. Bleijs, "Decentralized sliding - mode control for multi - machine power systems using only output information," in *IEE Proc. -Control Theory Application*, vol. 151, no. 5, pp. 627-635, Sep. 2004.
- [10] F. Pourboghra, F. Farid, C. J. Hatziaodoni, M. Daneshdoost, F. Mehdian, and M. Lotfalian, "Local sliding control for damping interarea power oscillations," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1123-1134, May 2004.
- [11] I. M. Horowitz, *Quantitative Feedback Theory (QFT)*, QFT Publications, 4470 Grinnell Ave., Boulder, Colorado, 80303, 1992.