

طراحی کنترلر پیش‌بین برای سیستم تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ (AVR)

در ژنراتورهای سنکرون

سید مهدی رضوی‌زاده، حسن بناءرضوی، وحید فرشته‌پور

آموزشکده فنی حرفه‌ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، مشهد، ایران

چکیده

حلقه کنترلی AVR در تقویت پایداری گذرا یعنی حفظ پایداری پس از اغتشاشات شدید می‌تواند نقش بسیار موثری ایفا نماید بشرطی که سرعت پاسخ سیستم AVR مناسب باشد زیرا سیستم‌های AVR اولیه به لحاظ کند بودنشان نمی‌توانند ولتاژ مرجع را به درستی دنبال نمایند بدین منظور در این مقاله طراحی یک کنترلر پیش‌بین به منظور رفع این مشکل انجام شده است. در ابتدا پس از بررسی اجزاء مختلف سیستم تنظیم خودکار ولتاژ، با استفاده از شناسایی سیستم با ایجاد ورودی‌های Prbs همراه با نویز رنگی به تعداد ۲۰۰۰ نمونه، خروجی‌های سیستم ثبت و با استفاده از روش PEM، سیستم به میزان ۶۸/۲۱٪ شناسایی گردید. سپس با استفاده از نتایج حاصل از شناسایی، یک کنترلر فیدبک حالت برای کنترل سیستم طراحی شده است. علی‌رغم بهبود چشمگیر پارامترهای حوزه زمان و حاشیه‌ی پایداری سیستم با حضور کنترلر فیدبک حالت ارائه شده، مشاهده می‌شود که سیستم با حضور این کنترلر توانایی دنبال کردن ولتاژ مرجع را ندارد لذا برای فائق آمدن بر این مشکل از یک کنترلر پیش‌بین مبتنی بر مدل، بهره گرفته شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها حاکی از این مطلب است که در این شرایط سیستم بخوبی توانایی دنبال نمودن یک ولتاژ مرجع مشخص را دارا می‌باشد

واژه‌های کلیدی: "تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ، شناسایی سیستم، فیدبک حالت، کنترلر پیش‌بین."

۱- مقدمه

مصرف‌کننده و کنترلر ولتاژ ترمینال است، نقش دیگر این حلقه از بین بردن سریع نوسانات گذرا و آرام کردن سیستم در صورت بروز اغتشاش و یا هر گونه تغییر شرایط در سیستم قدرت است حال چنانچه پس از آرام شدن سیستم، فرکانس و یا ولتاژ از مقدار تعریف شده قبلی فاصله گرفته باشد این خطا را نیز اصلاح می‌نماید.

تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ (AVR) در ژنراتور سنکرون استفاده می‌شود تا تحت هر شرایط عملکردی در سطوح مختلف بار، ولتاژ ترمینال را بصورت ثابت حفظ کند [۱].

نوع بسیاری از سیستم‌های کنترلی موجود در یک نیروگاه به نوع نیروگاه (بخار، آب، گاز) بستگی دارد اما بعضی از حلقه‌های کنترلی (مستقل از نوع نیروگاه) در تمام نیروگاه‌ها وجود دارند. یکی از مهمترین این حلقه‌ها، حلقه کنترل ولتاژ^۱ (AVR) می‌باشد وظیفه این حلقه تأمین توان واکنشی

^۱ Automatic voltage Regulator

است و با استفاده از مینیمم کردن یک تابع هدف که شامل اضافه‌جهش، زمان‌صعود، زمان‌نشست، خطای حالت ماندگار، انتگرال قدم‌مطلق خطا، انتگرال مجذور ورودی، حد فاز و حد بهره می‌باشد، این کار انجام شده است [۱۹].

در [۲۰] نیز از الگوریتم زنبور عسل برای طراحی ضرایب PID کنترلر برای سیستم AVR استفاده شده است. روش پیشنهادی آنها منوط به استفاده از یک تابع هزینه جدید در حوزه زمان بوده است. از مزایای این روش می‌توان به کارایی بسیار راحت و همگراشدن ضرایب PID کنترلر در تکرارهای کم نام برد.

در این مقاله در ابتدا پس از مروری بر پیشینه کارهای انجام گرفته در این زمینه به معرفی تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ در بخش دوم پرداخته شده است. در بخش سوم به تفصیل قسمت‌های اصلی حلقه کنترل ولتاژ بیان می‌شود سپس به کمک روش شناسایی، سیستم AVR مورد نظر را شبیه‌سازی نموده و نتایج در بخش چهارم ارائه شده است. در بخش پنجم نیز با استفاده از روش فیدبک حالت، سیستم AVR شبیه‌سازی و بررسی می‌گردد و در بخش ششم نیز با اعمال کنترل پیش‌بین به سیستم AVR، به بررسی نتایج پرداخته شده است. سرانجام در بخش هفتم نتیجه‌گیری مقاله ارائه می‌شود.

۲- تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ

حلقه تنظیم خودکار ولتاژ (AVR)، دامنه ولتاژ پایانه V را کنترل می‌کند بدین منظور از ولتاژ پایانه بطور پیوسته نمونه برداری و پس از یکسوس شدن، بوسیله صافی کاملاً صاف می‌شود. این سیگنال dc که متناسب با |V| است با یک ولتاژ مرجع |V|_{ref} مقایسه می‌شود. خطای ولتاژ پس از تقویت و تغییر شکل به عنوان ورودی تحریک‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولتاژ خروجی تحریک‌کننده V_f نیز به سیم پیچ میدان ژنراتور اعمال می‌شود [۲۱].

در مجموع حلقه AVR می‌بایست دارای ۳ کارکرد زیر باشد:

- ۱- ولتاژ پایانه |V| رادر محدوده دقت ایستای مورد نیاز تنظیم کند.
- ۲- سرعت پاسخ‌دهی مناسبی داشته باشد.
- ۳- پایدار باشد.

۳- قسمت‌های اصلی حلقه کنترل ولتاژ

در شکل ۱ مدل یک سیستم AVR همراه با قسمت‌های آن را مشاهده می‌کنید که در ادامه به معرفی بخش‌های مختلف آن می‌پردازیم. همچنین مقادیر مجاز پارامترها به همراه

AVR از طریق تنظیم ولتاژ تحریک ژنراتور، ولتاژ ترمینال را کنترل می‌کند. در طول یک دهه گذشته روش‌های کنترلی مختلف پیشرفت‌های زیادی داشته است که از این میان مشهورترین این روش‌ها استفاده از کنترلر PID است که بدلیل ساختار ساده و عملکرد مقاوم در شرایط عملکردی مختلف در صنعت مورد استفاده زیادی قرار گرفته است [۴].

اما تنظیم صحیح ضرایب کنترل PID در صنعت بدلیل عواملی چون تأخیر زمانی و غیرخطی بودن و مرتبه بالا بودن سیستم AVR کار بسیار سختی است بنابراین در سالیان اخیر، روش‌های ابتکاری برای تنظیم ضرایب کنترلر PID پیشنهاد شده‌اند.

اولین روش برای تنظیم این ضرایب روش Ziegler-Nichols می‌باشد. بطور کلی تعیین ضرایب بهینه کنترلر PID با این روش در طرح‌های صنعتی کار مشکلی است و فرد طراح نیاز به تجربه کافی برای تنظیم بهترین عملکرد را دارد زیرا در این روش‌ها با استفاده از مدل تخمین زده شده‌جداولی در اختیار طراح قرار می‌گیرد که ضرایب کنترل‌کننده را مشخص می‌سازد. معمولاً این ضرایب بایستی در عمل با مشاهده رفتار حلقه بسته سیستم تنظیم گردند [۴] - [۳].

بعلاوه می‌توان به روش‌های هوش مصنوعی (AI) همچون کنترل عصبی^۴، شبکه فازی^۵ و کنترل عصبی- فازی اشاره کرد که برای تنظیم ضرایب کنترلر PID پیشنهاد شده‌اند [۵] - [۷].

همچنین ارزیابی و تنظیم کنترل‌کننده PID مقاوم، بوسیله روش تنظیم Lambda پیشنهاد شد [۸]. این روش مخصوص سیستم‌های نامینیمم فاز مرتبه دوم است. اخیراً روش‌های تکاملی محاسباتی همچون الگوریتم ژنتیک و زنبورعسل برای طراحی بهینه کنترلر PID استفاده می‌شود [۹] - [۱۶].

Coelho در سال ۲۰۰۹ برای تنظیم ضرایب PID از روش بهینه‌سازی آشوب استفاده کرده است [۱۷].

Zhu و Later در سال ۲۰۰۹ از الگوریتم آشوب زنبورعسل استفاده کردند برای اینکه بتوانند ضرایب PID در سیستم AVR را بصورت بهینه بدست آورند [۱۸].

در مرجع [۱۹] الگوریتم زنبور عسل را بصورتی طراحی شده که بر پایه کسرهای جزیی PID کنترلر برای سیستم AVR

² Proportional integral derivative

³ Artificial intelligence

⁴ neural network

⁵ Fuzzy network

مقادیر نامی‌شان در جدول ۱ آمده است.

طراحی تحریک‌کننده‌ها عملاً ضریب اطمینانی در نظر گرفته می‌شود تا در مواقع اضطراری نیز حتی‌الامکان سطح تحریک کاهش نیابد.

با وجود تنوع زیاد، عموماً از منابع توان ac که از طریق یکسو کننده‌های نیمه هادی (SCR) یکسو می‌شوند، در انواع سیستم‌های تحریک، استفاده می‌کنند و به علت وجود پدیده اشباع در مدار مغناطیسی، ولتاژ خروجی تحریک یک تابع غیرخطی از ولتاژ میدان است و لذا هیچگونه رابطه ساده‌ای بین ولتاژ پایانه و ولتاژ میدان تحریک وجود ندارد. یک مدل مناسب از تحریک‌کننده پیشرفته مدل خطی‌شده‌ای است که ثابت زمانی اصلی را در نظر گرفته و از پدیده اشباع و سایر عوامل غیرخطی چشم‌پوشی می‌کند. در ساده‌ترین شکل، تابع تبدیل یک تحریک‌کننده پیشرفته را می‌توان در رابطه (۲) با یک ثابت زمانی τ_E و یک بهره K_E بصورت زیر نمایش داد:

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \quad (2)$$

ثابت‌های زمانی تحریک‌کننده‌های پیشرفته خیلی کوچک هستند [۲۲] - [۲۱].

۳ ۴ - مدل ژنراتور

نیروی محرکه الکتریکی (emf) تولید شده توسط ماشین‌های سنکرون تابعی از منحنی مغناطیس‌کنندگی ماشین بوده و ولتاژ پایانه آن به بار ژنراتور بستگی دارد. در مدل خطی شده، تابع تبدیل که ولتاژ پایانه ژنراتور را به ولتاژ میدان آن مربوط می‌سازد می‌توان با بهره K_G و ثابت زمانی τ_G به صورت رابطه (۴) نمایش داد:

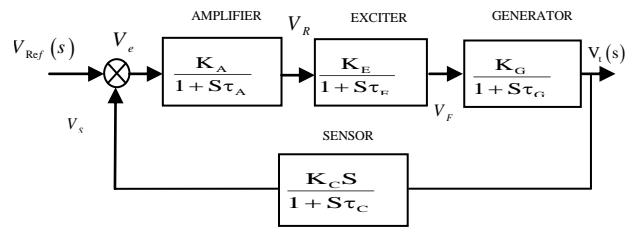
$$\frac{V_t(s)}{V_f(s)} = \frac{K_G}{1 + \tau_G s} \quad (4)$$

این ثابت‌ها به بار وابسته هستند. مقدار K_G می‌تواند بین ۰/۷ تا ۱ و مقدار τ_G بین ۱ و ۲ ثانیه از حالت بار کامل تا حالت بی‌باری تغییر کند [۲۲]. در بخش بعدی به شناسایی سیستم AVR پرداخته شده تا روندی کامل از یک فرآیند کنترلی انجام شده باشد.

۴ ۴ - مدل ژنراتور شناسایی سیستم به روش

کمترین خطای پیش‌بین تکراری (PEM)

برای این منظور از روش (prediction-error minimization) PEM که در [۲۴] بیان شده استفاده می‌شود. در



شکل ۱: بلوک دیگرام سیستم AVR

جدول ۱: مقادیر نمونه پارامترها

پارامترها	محدوده مجاز	مقادیر نامی
τ_G	۱-۲	۱/۵
K_G	۰/۷-۱	۰/۸
K_A	۱۰-۴۰۰	۱۰
τ_A	۰/۰۲-۰/۱	۰/۰۵
K_E	۱۰-۴۰۰	۱۰
τ_E	۰/۵-۱	۰/۵
τ_C	۰/۰۱-۰/۰۶	۰/۰۵

۳ ۴ - مدل تقویت‌کننده

در AVR پس از اینکه ولتاژ اندازه‌گیری و جبران‌شده با ولتاژ دلخواه مقایسه و سیگنال خطا محاسبه می‌شود مثل هر کنترل‌کننده دیگر، سیگنال خطا وارد یک جبران‌کننده می‌شود این جبران‌کننده می‌تواند فقط یک تقویت‌کننده ساده مثل آمپلیدین و یا یک جبران‌کننده پیش‌فاز، پس‌فاز، PI و یا PID باشد ساختار این جبران‌کننده در AVR های ساخت کارخانجات مختلف متفاوت است. تقویت‌کننده با یک بهره K_A و یک ثابت زمان τ_A نمایش داده می‌شود و تابع تبدیل آن بصورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s} \quad (1)$$

مقادیر نوعی در K_A حدود ۱۰ تا ۴۰۰ است. ثابت زمانی تقویت‌کننده خیلی کوچک بوده و در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۱ ثانیه قرار دارد و اغلب از آن چشم‌پوشی می‌شود [۲۳] - [۲۲].

۴ ۴ - مدل تحریک

تحریک‌کننده اصلی‌ترین عضو حلقه AVR است و تأمین‌کننده انرژی مورد نیاز میدان ژنراتور است تحریک‌کننده باید توانایی کافی برای تأمین توان (برای ژنراتورهای بزرگ در حد چند مگاوات) را داشته باشد و دارای سرعت پاسخ‌دهی کافی نیز باشد (زمان‌های صعود کمتر از ۰/۱ ثانیه). البته در

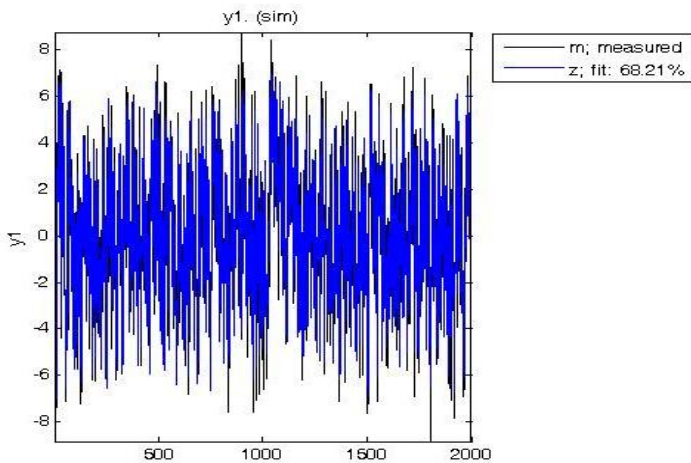
$$B = \begin{bmatrix} -0.28705 \\ 0.053939 \\ 200 \\ -0.20846 \\ 0.011152 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

ب:

$$A = \begin{bmatrix} -2 & 0.53333 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -20 & -200 & -200 \\ 0 & -0.5 & 5 & -2.5 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & -20 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 200 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$



شکل ۲: میزان شناسایی سیستم

۵- فیدبک حالت

در این مقاله از کنترلر فیدبک حالت به جای استفاده از PID کنترلر به منظور کنترل سیستم AVR استفاده شده و با بهره‌گیری از داده‌های حاصل از شناسایی سیستم، به کمک روش بس و گیورا [۲۵]، طراحی فیدبک حالت برای سیستم مورد نظر انجام شده است. در این روش از قضیه زیر برای بدست آوردن بردار فیدبک حالت K استفاده می‌شود.

قضیه فیدبک حالت می‌تواند جایابی دلخواه مقادیر ویژه تحقق (A,B,C) را فراهم آورد اگر و فقط اگر ماتریس کنترل‌پذیری $\Phi_c = [B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B]$ ناپیوسته باشد همچنین بهره فیدبک لازم را می‌توان به صورت رابطه (۷) محاسبه کرد:

PEM نویز رنگی e_t بر حسب v_t نوشته می‌شود یعنی در ساختار ARMAX که برای سیستم بکار می‌رود $C(z^{-1})v_t, A(z^{-1})y_t = B(z^{-1})x_t + C(z^{-1})v_t$ را نیز بسط داده و در رگرسیون خطی بصورت روابط (۵) و (۶) بیان می‌شود:

$$y_t = -a_1 y_{t-1} - \dots - a_n y_{t-n} + b_0 x_t + b_1 x_{t-1} + \dots + b_m x_{t-m} + v_t + c_1 v_{t-1} + \dots + c_r v_{t-r} \quad (5)$$

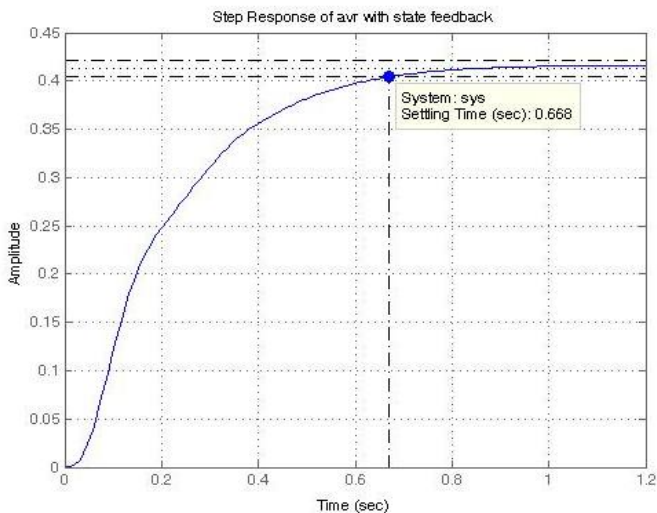
در PEM مقادیر v_{t-1}, \dots, v_{t-r} در u_t^T مجهول هستند و نمی‌توان آنها را همانند x_t و v_t نمونه‌براری نمود بنابراین راه‌حل این است که مسئله PEM را بصورت تکراری از طریق روش نیوتن-رافسون حل کنیم. این روش را حداقل مربعات توسعه داده شده تکراری PEM یا IELS می‌نامیم. در این کار یک ورودی Prbs همراه با نویز رنگی به تعداد ۲۰۰۰ نمونه به سیستم اصلی اعمال کرده و سپس خروجی حاصل شده را همراه با ورودی اصلی برای شناسایی سیستم به وسیله روش PEM استفاده می‌کنیم. نتیجه‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده است بیان‌کننده شناسایی سیستم به میزان ۶۸/۲۱٪ می‌باشد.

$$y_t = \underbrace{\begin{bmatrix} -y_{t-1} & \dots & -y_{t-n} & x_t & \dots & x_{t-m} & v_{t-1} & \dots & v_{t-r} \end{bmatrix}}_{u_t^T} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \\ b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \\ c_1 \\ \vdots \\ c_r \end{bmatrix} + v_t \quad (6)$$

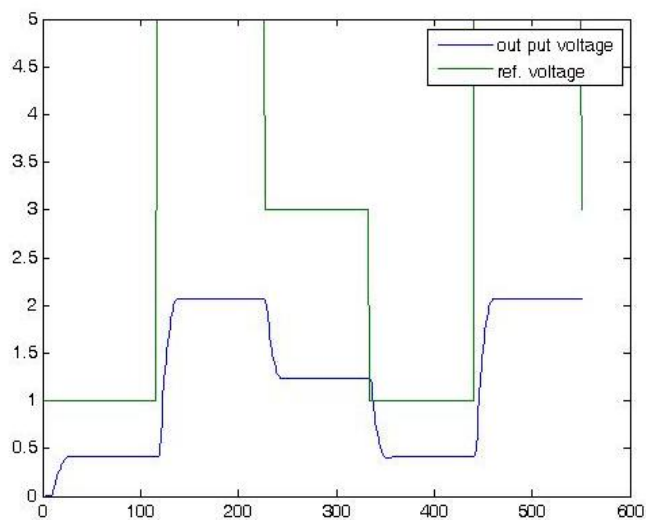
در نهایت نتایج شناسایی فضای حالت سیستم با استفاده از روش شناسایی PEM و بدون استفاده از آن (سیستم تئوری) بترتیب در دو دسته ماتریس‌های زیر آمده است:

الف:

$$A = \begin{bmatrix} -2.1044 & 0.57214 & 0.32273 & -0.2164 & -0.021156 \\ 0.049394 & -1.9161 & 20.003 & 0.046649 & 0.0064534 \\ 0.00016077 & 0.0069535 & -19.911 & -200 & -200 \\ -0.19362 & -0.44246 & 4.9327 & -2.5853 & -0.027967 \\ 1.99 & 0.36297 & -0.39443 & 0.10212 & -20.002 \end{bmatrix}$$



شکل ۴: پاسخ پله سیستم AVR با فیدبک حالت



شکل ۵: پاسخ پله سیستم AVR

با توجه به این موضوع از یک کنترلر پیش‌بین برای بهبود ردیابی ولتاژ مرجع در بخش بعد استفاده می‌شود.

۶- کنترل پیش‌بین

بهبود ردیابی ولتاژ مرجع از روشی که در [۲۶] ارائه شده است بهره برده می‌شود. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل با استفاده از مدل صریحی از سیستم، خروجی‌های آینده را در یک افق زمانی پیش‌بینی کرده و سپس دنباله‌ای از ورودی‌های کنترلی مناسب را برای نیل به اهداف کنترلی محاسبه می‌کند. غالباً این دنباله کنترلی از حل یک مسأله بهینه‌سازی حاصل می‌شود رابطه (۷) تابع هزینه‌ای را که برای محاسبه دنباله کنترلی بهینه در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد.

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} \|\hat{y}(t+i) - \omega(t+i)\|_Q^2 + \sum_{j=1}^{N_R} \|\Delta U(t+j-1)\|_R^2 \quad (7)$$

$$K = (\alpha - a)\Psi^{-1}\Phi_c^{-1} \quad (7)$$

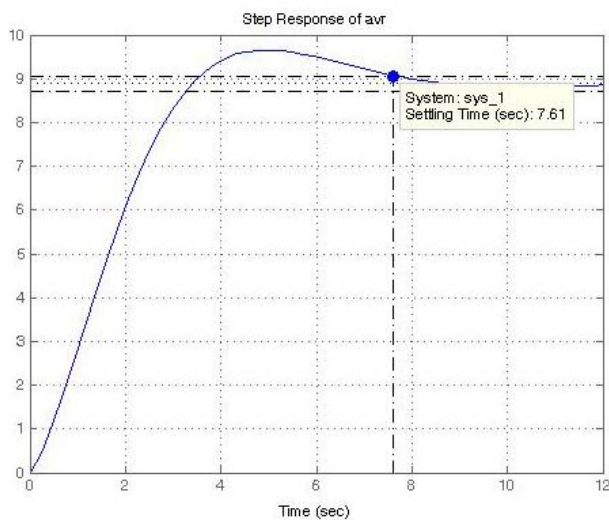
که در آن α ضرایب معادله مشخصه مطلوب و a ضرایب معادله مشخصه سیستم اصلی می‌باشد. همچنین ماتریس Ψ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 \\ 0 & 1 & a_{n-1} & \dots & a_2 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & a_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

در سیستم اصلی بدون فیدبک حالت دو قطب مختلط مزدوج در $-0.4650 \pm j0.5832$ وجود دارد. سیستم اصلی دارای فرجهش $1/63$ و زمان نشست طولانی $7/63$ ثانیه می‌باشد (شکل ۳). با تغییر دو قطب مختلط مزدوج در نزدیک مبدا به نقاط ۳- و ۴- شاهد حذف فرجهش و بهبود بسیار چشمگیر زمان نشست می‌باشیم (شکل ۴). در نهایت ماتریس بهره K به صورت زیر بدست می‌آید:

$$K = [2.0316 \quad 0.2399 \quad 0.0303 \quad -0.8328 \quad -0.2340]$$

با توجه به ضرایب K بدست آمده، سیستم AVR مورد نظر باز هم توانایی مناسبی برای دنبال کردن ولتاژ مرجع را ندارد که شکل ۵ مؤید این موضوع می‌باشد.



شکل ۳: پاسخ پله سیستم AVR

داده شده است.

۷- نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله طراحی یک کنترلر پیش‌بین به منظور کاهش اغتشاشات حالت گذرا در سیستم‌های تنظیم‌کننده ولتاژ در ژنراتور سنکرون است لذا این مقاله در ابتدا به معرفی سیستم تنظیم‌کننده ولتاژ و بخش‌های مختلف آن پرداخته است. سپس با اعمال روش PEM به میزان ۶۸/۲۱٪ سیستم مورد شناسایی قرار گرفت. در ادامه با طراحی یک کنترلر فیدبک حالت و اعمال آن به سیستم، بهبود قابل ملاحظه‌ای در زمان نشست، حذف فراجهدش در پاسخ پله و افزایش حاشیه پایداری سیستم مشاهده می‌شود ولیکن ردیابی ولتاژ مرجع به خوبی انجام نمی‌شود. به همین منظور از یک کنترلر پیش‌بین مبتنی بر مدل برای بهبود ردیابی استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های مورد نظر در محیط نرم-افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. نتایج بدست آمده در هر قسمت نیز عملکرد مناسب روش‌های فوق را تأیید و تصدیق می‌کند.

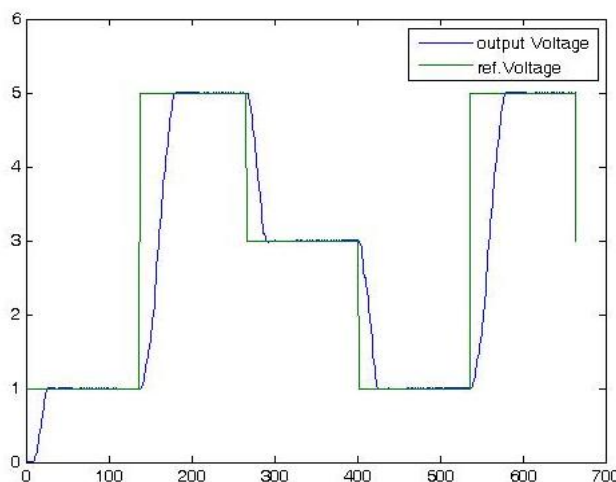
مراجع

- [1] A. H. M. S. Ula and A. R. Hasan, "Design and implementation of a personal computer based automatic voltage regulator for a synchronous generator," IEEE Trans. Energy Convers., vol 7, no. 1, pp. 125–131, Mar. 1992.
- [2] K. J. Astrom and T. Haggund, "The future of PID control," ControEng. Practice, vol. 9, no. 11, pp. 1163–1175, 2001.
- [3] A. Visioli, "Tuning of PID controllers with fuzzy logic," IEE Proc. Control Theory Appl., vol. 148, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2001.
- [4] Y. Li, K. H. Ang, and G. C. Y. Chong, "PID control system analysis and design, problems, remedies, and future directions," IEEE Control Syst. Mag., vol. 26, no. 1, pp. 32–41, 2006.
- [5] S.-R. Qi, D.-F. Wang, P. Han, and Y.-H. Li, "Grey prediction based RBF neural network self-tuning PID control for turning process," in Proc Int. Conf. Mach. Learning Cybern., 2004, pp. 802–805
- [6] A. Rubaai, M. J. Castro-Sitiriche, and A. R. Ofoli, "Design and implementation of parallel fuzzy PID controller for high-performance brushless motor drives: An integrated environment for rapid control prototyping," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 4, pp. 1090–1098, Jul.–Aug. 2008.
- [7] A. Rubaai and P. Young, "EKF-based PI-/PD-like fuzzy-neural- Networkcontroller for brushless drives," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.

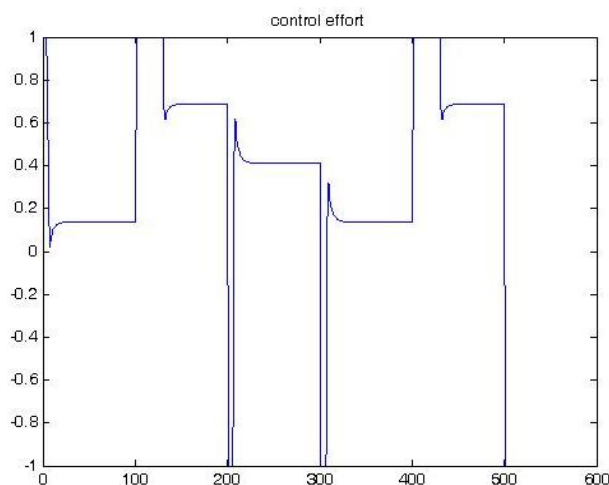
در این رابطه $\hat{y}(t+i)$ خروجی پیش‌بینی شده در i گام جلوتر در لحظه t براساس اطلاعات ورودی و خروجی‌های قبلی سیستم، $\omega(t+i)$ دنباله مرجع یا نقطه تنظیم آینده سیستم، ΔU مطابق تعریف زیر دنباله‌ای از میزان افزایش ورودی‌های محاسبه شونده لحظه t نسبت به لحظه قبل در گام زام خواهد بود:

$$\Delta U(t+j-1) = U(t+j-1) - U(t+j-2)$$

پارامترهای N_1 و N_2 ، N_u به ترتیب افق کنترلی و حداکثر و حداقل افق پیش‌بینی و ماتریسهای Q و R ماتریسهای وزنی مثبت معین می‌باشند که



شکل ۶: مدل تعقیب ولتاژ مرجع



شکل ۷: سیگنال کنترل

پارامترهای کنترل‌کننده بوده و بایستی به شکل مناسب تنظیم شوند.

با در نظر گرفتن یک ورودی مرجع و افق پیش‌بین ۲۰ و افق کنترل ۵ نتایج شبیه‌سازی برای دنبال کردن ولتاژ مرجع در شکل ۶ و برای سیگنال کنترلی در شکل ۷ نشان

- particle swarm optimization algorithm,” IEEE CCECE, 2011.
- [21] O. L. Elgerd, *Electric energy systems, theorysecond edition*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1982.
- [22] H. Saadat, *Power systems analysis*, Mc Graw-Hill Book Company, 1999.
- [23] M. Karrari, *power systems daynamics and control*, amir kabir Book Company, 2010.
- [24] L. Ljung. *System Identification: Theory for the User*, Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hal PTR, 1999.
- [25] R. W. Bass and I. Gura, “High order system design via state-space considerations,” Preprints, Joint Automatic Control Conf.(Troy, N. Y., June 1965), pp. 311-318.
- [26] E.F. Camacho and C. Bordons, “Model Predictive Control”. Springer, 1999.
- 47, no. 6, pp. 2391–2401, Nov.–Dec. 2011.
- [8] B. Lennartson and B. Kristiansson, “Evaluation and tuning of robust PID controllers,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 3, no. 3, pp. 294–302, 2009.
- [9] R. A. Krohling and J. P. Rey, “Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithms,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 5, no. 1, pp. 78–82, Feb. 2001.
- [10] D. Devaraj and B. Selvabala, “Real-coded genetic algorithm and fuzzy logic approach for real-time tuning of proportional-integral-derivative controller in automatic voltage regulator system,” *IET Generation Transmission Distribution*, vol. 3, no. 7, pp. 641–649, 2009.
- [11] J. Zhang, J. Zhuang, H. Du, and S. Wang, “Self-organizing genetic algorithm based tuning of PID controllers,” *Inform. Sci.*, vol. 179, no. 7, pp. 1007–1018, Mar. 2009.
- [12] Z.-L. Gaing, “A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 2, pp. 384–391, Jun. 2004.
- [13] V. Mukherjee and S. P. Ghoshal, “Intelligent particle swarm optimized fuzzy PID controller for AVR system,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 12, pp. 1689–1698, 2007.
- [14] J. S. Chiou and M.-T. Liu, “Numerical simulation for fuzzy-PID controllers and helping EP reproduction with PSO hybrid algorithm,” *Simulation Modeling Practice Theory*, vol. 17, no. 10, pp. 1555–1565, Nov. 2009.
- [15] S. Bhati, D. Nitnawwre, “Genetic OptimizationTuning of an Automatic Voltage Regulator System,”*International Journal of Scientific Engineering and Technology*vol. 1, no.3 (2012) 120–124
- [16] . M. Aghababa, A.M. Shotorbani, R. M. Shotorbani An Adaptive Particle Swarm Optimization Applied to Optimum Controller Design for AVR Power Systems *International Journal of Computer Applications* vol. 11, no.10 (2010) pp. 22–29
- [17] L.S. Coelho, Tuning of PID controller for an automatic regulator voltage system using chaotic optimization approach, *Chaos, Solut. Fractals* 39 (4) (2009) 1504–1514.
- [18] H. Zhu, L. Li, Y. Zhao, Y. Guo, Y. Yang, CAS algorithm based optimum design of PID controller in AVR system, *Chaos, Solut. Fractals* 42 (2009) 792–800.
- [19] M. Zamani, M.K. Ghartemani, N. Sadati, M. Parniani, Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization, *Control Eng. Pract.* 17 (12) (2009) 1380–1387.
- [20] M.S. Rahimian and K. Raahemifar, “Optimal PID controller design for AVR system using