

کاربرد روش کنترلی نوین Flatness در یک مدل سیستم قدرت SMIB

محسن رادان^۱، بهادر فانی محمد آبادی^۲، غضنفر شاهقلیان^۳

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، نجف آباد، ایران mohsenradan69@yahoo.com

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه برق، نجف آباد، ایران bahador_fani@yahoo.com

^۳ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه برق، نجف آباد، ایران shahgholian_47@yahoo.com

چکیده - در این مقاله از یک روش کنترلی جدید مبتنی بر Flatness جهت طراحی یک کنترل کننده بهینه گذرا و کاربرد عملی آن در یک مدل ماشین سنکرون با تحریک استاتیک و بازو بست سریع شیر بخار استفاده می شود. ویژگی برجسته ی همواری دیفرانسیلی این است که متغیرهای حالت و ورودی می توانند به طور مستقیم بر حسب خروجی مسطح و تعداد محدودی از مشتقاتش بیان گردد. رفتار گذرای یک ماشین سنکرون متصل به شین بی نهایت از طریق شبیه سازی در نرم افزار قدرتمند متلب نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از شبیه سازی برای اختلالات گذرا در یک ماشین متصل به شین بی نهایت ارائه شده و با دیگر الگوریتم های کنترلی برای نشان دادن اثربخشی طرح پیشنهادی مقایسه شده است.

کلید واژه - پایداری گذرا، خطی سازی فیدبک، خروجی مسطح، Flatness.

خطی سازی فیدبک و شبکه های عصبی مولفان برای بهبود پایداری استفاده کردند [۱ و ۴]. بسیاری از مولفان از روش خطی سازی فیدبک با حالت ورودی خروجی برای سیستم های MIMO و سیستم های SISO در مدل ماشین سنکرون استفاده و به نتایج خوبی دست پیدا کرده اند [۳ و ۱]. طرح ورودی خروجی نیاز به انتخاب دلخواه خروجی که به ورودی وابسته است و این کار می تواند منجر به مشکل پایداری دینامیکی داخلی همراه بشود. اما رویکرد مبتنی بر همواری دیفرانسیلی از خصوصیات دینامیکی سیستم برای تولید یک خروجی مناسب استفاده می کند [۵]. خطی سازی فیدبک مبتنی بر همواری دیفرانسیلی نتایج قابل توجهی در کارهای قبلی انجام شده توسط محققان دست یافته است [۹].

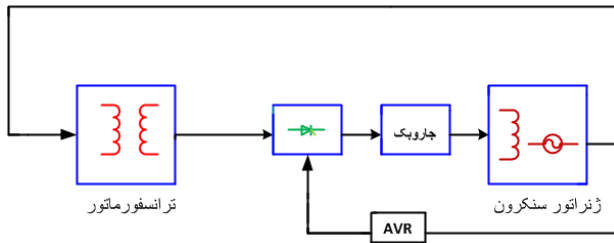
2- مدل سازی سیستم قدرت SMIB

مدل SMIB تک ماشین متصل به باس بی نهایت سیستم قدرت شامل یک ژنراتور سنکرون، یک توربین، یک گاورنر، یک سیستم تحریک و یک خط انتقال متصل شده به باس بی نهایت است که در شکل (۱) نشان داده می شود. همان طور که از شکل (۱) مشخص است سیستم تحت مطالعه علاوه بر ژنراتور سنکرون دارای حلقه کنترلی گاورنر و توربین و سیستم تحریک استاتیک است [۱۲-۸]. معادلات ژنراتور به اضافه توربین و گاورنر

۱- مقدمه

پایداری سیستم های قدرت و حفظ سنکرونیسم در برابر اغتشاش های گذرای شدید اهمیت زیادی دارد. بروز خطای اتصال کوتاه در شبکه های انتقال و نحوه عملکرد رله های متناظر، ممکن است باعث ناپایداری سیستم گردد [۲ و ۱]. لذا اتخاذ روش های کنترلی پیش گیرانه در این موارد بسیار ضروری است. در اکثر سیستم های قدرت، توسعه چشم گیر مراکز صنعتی در مناطق دوردست و مشکلات احداث نیروگاه در این مناطق سبب شده است تا فاصله نیروگاه های جدید از مراکز بار زیاد باشد [۳]. این امر قابلیت اطمینان سیستم های قدرت را کاهش می دهد، چرا که وقوع یک خطای اتصال کوتاه در خطوط انتقال بحرانی ممکن است موجب ناپایداری ژنراتورهای این نیروگاه ها شده و سبب خاموشی سراسری در شبکه برق گردد. بنابراین طراحی سیستم های کنترل پایداری گذرا جهت پیشگیری از حوادث نامطلوب الزامی گاورنر و AVR ژنراتور هر دو نقش مهمی در پایداری سیستم های قدرت به ترتیب با کنترل توان مکانیکی به توربین و کنترل ولتاژ ترمینال ایفا می کنند [۴]. پس در سیستم های پیچیده قدرت یک اغتشاش بزرگ پاسخ سریعی از این کنترل ها انتظار نمی رود. پس از روش های کنترل بهینه،

یکسوکننده کنترل شده، تامین می شود. شکل (۲) بلوک دیاگرام تحریک استاتیک را نشان می دهد [6].

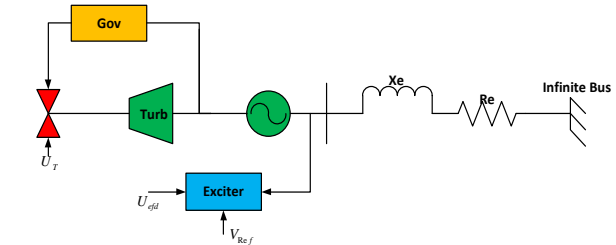


شکل (۲) یک نمونه از سیستم های تحریک استاتیک

۴- بازو بست سریع شیر توربین بخار

برای ایجاد تغییرات سریع در توان مکانیکی، نیاز به پاسخ بسیار سریع توربین است. می توان اثبات کرد که کاهش توان توربین باید در یک سوم اول دوره نوسان یعنی در طی چند دهم ثانیه اول پس از اختلال رخ دهد. بازیابی توان به مقدار لازم پس از خطا باید زمانی حدود نصف دوره نوسان یعنی کمتر از یک ثانیه، طول بکشد عمل لازم برای کنترل در توربین برای تولید این پاسخ سریع به بستن سریع شیر موسوم است. بازو بست سریع شیر روشی است قابل اعمال به واحدهای حرارتی که به حفظ پایداری گذرای سیستم قدرت کمک می کند. این روش شامل بستن و باز کردن سریع شیرهای بخار به صورتی از قبل تعیین شده است تا به دنبال آشکار شدن خطای شدید سیستم انتقال، توان شتاب دهنده ژنراتور را کاهش دهد [6-8]. و به طور خلاصه هنگامی که توان مکانیکی به مقدار نهایی خود، مساوی با مقدار پیش از خطا برسد، بستن سریع شیر به بستن آنی موسوم بوده ، و چنانچه مقدار نهایی توان مکانیکی کوچکتر از مقدار پیش از خطا باشد، بستن شیر به بستن مداوم موسوم است. تغییرات توان مکانیکی مربوط به این دو حالت در شکل (3) نشان داده شده است. چون بلافاصله پس از آشکار شدن خطا عمل کنترل ضروری است، معمولاً سیستم های کنترل حلقه بسته مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین در قسمت بعد از این کنترل کننده برای بهبود پایداری گذرا در سیستم قدرت استفاده می شود و نتایج حاصل از شبیه سازی آن در قسمت بعدی آورده شده و با دیدن این نتایج به موثر بودن این کنترل پی خواهیم برد.

یک معادله درجه ۵ می شود که در زیر با معادلات (۱) الی (۵) نشان داده می شوند.



شکل (۱) مدل سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت با کنترل کننده ها

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt} = p_m - D(\omega - \omega_s) - i_d e'_d - i_q e'_q \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2)$$

$$T'_{d0} \dot{e}'_q = E_{FD} - e'_q - (x_d - x'_d) i_d \quad (3)$$

$$\dot{p}_{gv} = \frac{1}{\tau_g} (u_T - p_{gv} - (\omega - \omega_0) / R_T) \quad (4)$$

$$\dot{p}_m = \frac{1}{\tau_t} (p_{gv} - p_m) \quad (5)$$

معادلات ولتاژ ترمینالها و جریانها به صورت معادلات (۶) الی (۱۱) خواهد بود.

$$i_d = \left(\frac{1}{k_z}\right) (- (R_e + r_a) (E'_d - V_B \sin \delta) + (x'_q + X_e) (E'_q - V_B \cos \delta) \quad (6)$$

$$i_q = \left(\frac{1}{k_z}\right) (- (X_e + x'_d) (E'_d - V_B \sin \delta) + (R_e + r_a) (E'_q - V_B \cos \delta) \quad (7)$$

$$k_z = \frac{1}{(R_e + r_a)^2} + (X_e + x'_d) (x_q + X_e) \quad (8)$$

$$V_d = (R_e i_d + V_B \sin \delta - X_e i_q) \quad (9)$$

$$V_q = (R_e i_q + X_e i_d + V_B \cos \delta) \quad (10)$$

$$V_t = \sqrt{(V_d^2 + V_q^2)} \quad (11)$$

۳- سیستم های تحریک استاتیک

از نام سیستم های تحریک استاتیک مشخص است که این سیستم ها قسمت گردنده ندارند. به عبارت دیگر ژنراتور جریان مستقیم و یا جریان متناوب ندارند. در این سیستم ها توان لازم تحریک ژنراتور با ترمینال خود ژنراتور، که با ترانسفورماتور

مجموعه‌ای از خروجی‌های مسطح یافت شوند به گونه‌ای که همه‌ی حالت‌ها و ورودی‌ها بتوانند بدون انتگرال‌گیری بر حسب این خروجی‌ها تعیین شوند. فرم عمومی معادله (۱۲) را برای یک سیستم دینامیکی غیر خطی در نظر بگیرید. یک سیستم را به طور دیفرانسیلی مسطح گوئیم اگر مجموعه‌ای از متغیرهای خروجی مستقل دیفرانسیلی (y) وجود داشته باشد به طوری که شروط (۱۳) الی (۱۵) برآورده شود:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (12)$$

$$y = \phi[x, u, \dot{u}, \dots, u^{(\alpha)}] \quad , \text{rank}\{\phi\} = m \quad (13)$$

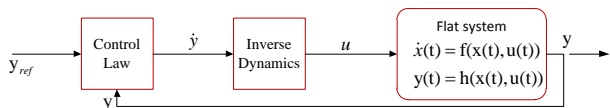
$$x = \varphi[y, \dot{y}, \dots, y^{(\beta)}] \quad , \text{rank}\{\varphi\} = n \quad (14)$$

$$u = \psi[y, \dot{y}, \dots, y^{(\beta+1)}] \quad , \text{rank}\{\psi\} = m \quad (15)$$

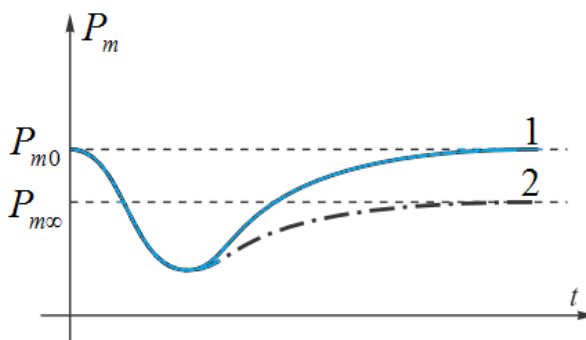
در روابط فوق α و β به ترتیب تعداد مشتقات ورودی و خروجی هستند. بلوک دیاگرام کنترل مبتنی بر همواری دیفرانسیلی برای سیستم مسطح بصورت شکل (۵) است. همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌کنید یک قانون کنترل با الگوریتم Flatness تلفیق شده است. ویژگی Flatness می‌تواند بسیار مفید باشد زمانی که با مسیرها سر و کار دارد. از مسیرهای y مسیرهای x و u سریعاً نتیجه می‌شوند. این ویژگی اجازه به تعقیب مسیر بصورت حلقه باز می‌دهد. سیستم مسطح معادل یک سیستم خطی کنترل‌پذیر با فیدبک درونی است که پایدارسازی فیدبک مسیر مطلوب را نتیجه می‌دهد. شکل (۵) تصویری فضایی از مفهوم همواری دیفرانسیلی را نشان می‌دهد.

۶- کنترل سیستم SMIB مبتنی بر Flatness

بررسی خروجی مسطح نشان می‌دهد که همه متغیرهای سیستم توابع خروجی مسطح و مشتقاتش است. در اینجا دو متغیر را اثبات می‌شود که مسطح هستند یعنی تابعی از خروجی و مشتقاتش هستند. خروجی مسطح ما زاویه بار و توان مکانیکی ورودی چون در این کار دو ورودی کنترلی داریم پس متغیر دو خروجی از متغیرهای حالت ما به نام‌های زاویه بار و توان مکانیکی ورودی توریب می‌باشد.



شکل (۴) بلوک دیاگرام کنترلی همواری دیفرانسیلی



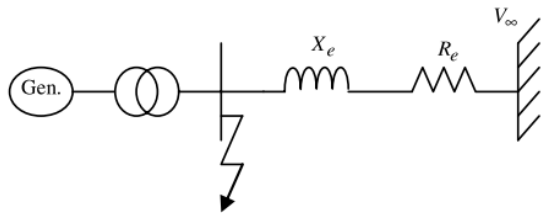
شکل (۳) تغییرات توان مکانیکی در حالت:
۱- بستن سریع شیرآبی ۲- بستن سریع شیر مداوم

۵- تکنیک Flatness (همواری دیفرانسیلی)

در حقیقت رفتار متغیرهای حالت سیستم می‌تواند بر اساس مسیرهای داده شده طراحی شود [9]. سیستم‌های مسطح ابتدا توسط فلایس و همکاران با بکارگیری فرمولبندی جبر دیفرانسیل معرفی شد [10]. در جبر دیفرانسیل یک سیستم به عنوان یک حوزه‌ی دیفرانسیلی که بوسیله‌ی مجموعه‌ای از متغیرها تولید می‌شود، شناخته می‌شود. سیستم را مسطح گویند اگر بتوان مجموعه‌ای از متغیرها را یافت (با عنوان خروجی مسطح) به طوری که سیستم روی حوزه‌ی دیفرانسیلی تولید شده توسط مجموعه‌ی خروجیهای مسطح، جبری باشد. ادوارد سونگ و همکاران نشان داده‌اند که کنترل مبتنی بر همواری دیفرانسیلی کنترلی مقاوم است. همچنین عملکرد تعقیب گذرای بهبود یافته‌ای در مقایسه با روش کنترل دیگر حاصل می‌کند. روش مبتنی بر همواری دیفرانسیلی برای سیستم‌های کنترل در سطح تولید مسیر و تعقیب مسیرهای مرجع به خوبی پذیرفته شده است و هدایت سیستم به سمت مقادیر مطلوب با ملاحظه‌ی قیود سیستم را به خوبی حاصل می‌کند [۹ و ۱۰].

۵-۱- توصیف تکنیک Flatness

وقتی یک سیستم مسطح است اشاره به این نکته دارد که ساختار غیر خطی سیستم به خوبی مشخصه‌بندی شده و ساختار می‌تواند در طراحی الگوریتم‌های کنترل برای طراحی حرکت، تولید مسیر و پایدارسازی بکار رود. ویژگی برجسته‌ی همواری دیفرانسیلی این است که متغیرهای حالت ورودی می‌تواند به طور مستقیم بر حسب خروجی مسطح و تعداد محدودی از مشتقاتش بیان گردد. به بیان دیگر یک سیستم مسطح است اگر

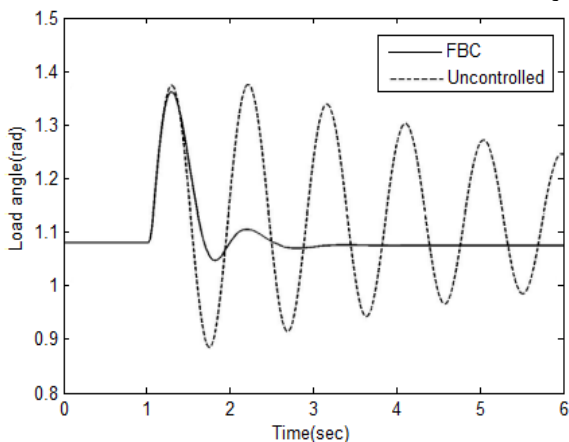


شکل (۶) خطای سه فاز در سیستم قدرت SMIB

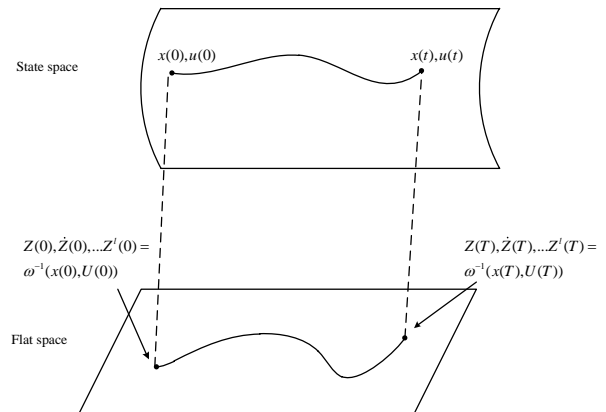
۷- شبیه سازی ها

شبیه سازی ها به طور همزمان برای هر دو حالت بکارگیری کنترل کننده معروف (تنظیم کننده خودکار ولتاژ، تنظیم کننده سرعت و همچنین بازو بست سریع شیر بخار، تحریک اجباری) و کنترل غیرخطی (همواری دیفرانسیلی)، به منظور اعتبار سنجی عملکرد کنترل کننده غیرخطی تحت اختلال سیگنال بزرگ انجام شده است و نتایج برای کمیت های مهم سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت به نمایش در آمده است. شکل (۶) شماتیک شبیه سازی را نشان می دهد.

برای برقراری شبیه سازی در این قسمت از نرم افزار متلب استفاده شده است. نتایج در حالت استفاده از کنترل غیرخطی (FBC) با نتایج کنترل معمولی که در فصل دوم مورد استفاده قرار گرفت به طور همزمان نمایش داده شده اند و موفقیت آمیز بودن برنامه کنترل غیرخطی در بهبود رفتار گذرای SMIB در مقایسه با کنترل معمولی تحت شرایط خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن و صفر شدن ولتاژ نشان داده شده است. شکل های (۷) الی (۱۱) نتایج شبیه سازی پارامترهای مختلف را در شرایط مختلف بررسی کرده است.



شکل (۷) پاسخ حوزه زمان زاویه بار ژنراتور با خطای اتصال کوتاه



شکل (۵) تصویری فضایی از مفهوم همواری دیفرانسیلی [۵۶]

برای تضمین همگرایی خروجی های مسطح به سمت مقادیر مرجعشان قانون کنترلی با عنوان تکنیک خطی سازی فیدبک مورد استفاده قرار می گیرد. این قوانین کنترل توسط معادلات (16) و (17) بیان می شوند.

$$(\ddot{y}_1 - \ddot{y}_{1-ref}) + k_{13}(\dot{y}_1 - \dot{y}_{1-ref}) + k_{12}(y_1 - y_{1-ref}) + k_{11}(y_1 - y_{1-ref}) = 0 \quad (16)$$

$$(\ddot{y}_2 - \ddot{y}_{2-ref}) + k_{22}(\dot{y}_2 - \dot{y}_{2-ref}) + k_{21}(y_2 - y_{2-ref}) = 0 \quad (17)$$

این قانون یک تعقیب مسیر به طور مجانبی را حاصل می کند. در واقع قوانین کنترل (۱۸) خطاهای بین مولفه های توان مکانیکی خروجی توربین و زاویه بار و مقادیر مرجعشان را مورد بررسی قرار می دهند. قبل از یافتن ضرائب عبارتهای خطای تعقیب متغیرهای حالت توان مکانیکی خروجی توربین و زاویه بار را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$e_i^{(j)} = y_i^{(j)} - (y_i^*)^{(j)} \quad (18)$$

$$e_1^{(3)} = k_{11}e + k_{12}\dot{e} + k_{13}\ddot{e} \quad (19)$$

$$e_2^{(2)} = k_{21}e_{21} + k_{22}\dot{e}_{22} \quad (20)$$

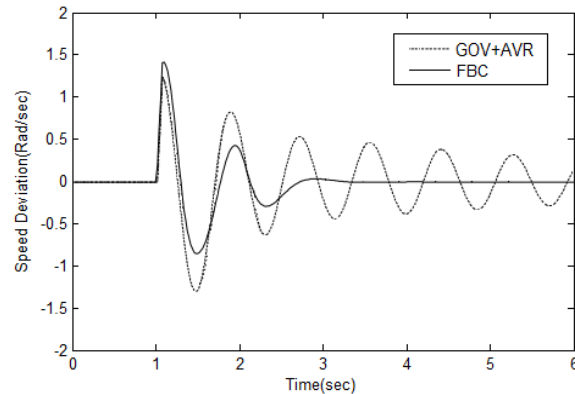
در واقع برای یافتن ضرائب کنترل کننده چند جمله ای مطلوبمان را تشکیل می دهیم. سپس با مقایسه ای چند جمله ای با رابطه قبل ضرائب بدست می آیند. وقتی این شرط برقرار باشد یعنی خروجی مسطح سیستم به طور مجانبی پایدار نمایی است و لذا چون متغیرهای حالت نیز در این سیستم مسطح برحسب خروجی مسطح بیان شده اند، پس پایدارند [۹ و ۱۱]. همانطور که می بینید ویژگی Flatness اجازه می دهد تا بردار کنترل تنها بر حسب بردار خروجی مسطح و مشتقاتش فرمول بندی گردد.

نتیجه گیری و پیشنهاد

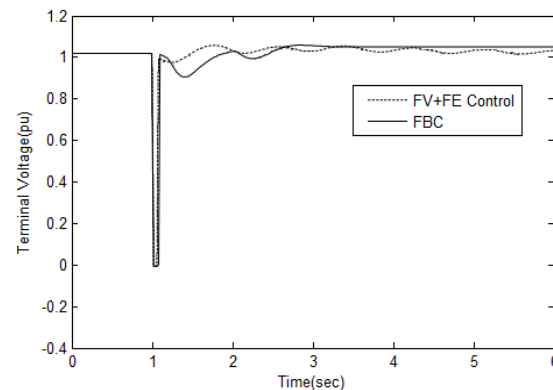
با مشاهده نتایج شبیه سازی به تاثیر این کنترلر پیشنهادی پی میبریم با استفاده از خروجی مسطح به جواب مطلوب خود در کمترین زمان ممکن رسیده و جواب شبیه سازی ها سریعتر و صاف و بسیارمطلوب و مورد نظر ما می باشد. همچنین برای کارهای آینده این تکنیک را به سیستم چند ماشینه میتوان اعمال کرد.

مراجع

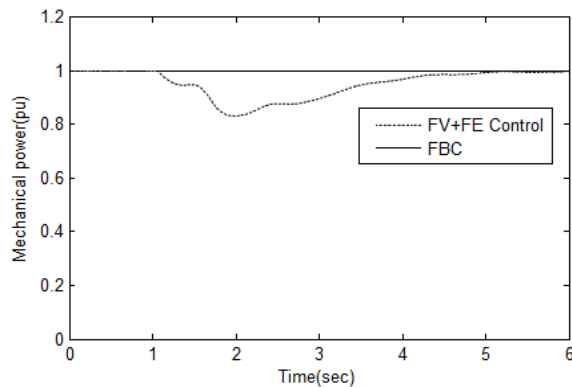
- [1] PM Anderson, AA. Fouad, Power System Control and Stability, IEEE press, Wiley interscience, ۲۰۰۳.
- [2] Kundur, P., Power System Stability and control, new york: McGraw-Hill, 1994.
- [3] C. Zhu, R. Zhou, and Y.Wang, "A new nonlinear voltage controller for power systems," Int. J. Elect. Power Energy Syst., vol. 19, pp. 19-27, ۲۰۰۸.
- [4] Y. Cao and O. P. Malik, "A nonlinear variable structure stabilizer for power system stability," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 3, pp. 489-495, Sep. ۲۰۰۹.
- [5] A.M Zajaczkowski "Adaptive field voltage controller of a synchronous Generator" 21 Seminar on Fundamentals of Electro technique and circui heory."Institute of theoreticaland Industrial Electrotechnics, Silesian Technical University in Gliwice. pp 455-458 200۵.
- [6] W.Mielczarski and A.M. Zajaczkowski, "Mechatronic systems techniques in the implementation of non-linear controllers of Synchronous generators", In Mechatronic Systems Techniques and Applications, Ed. C.T. Leondes, Vol 3,1-61, Gordon and Breach, Amsterdam, 2000.
- [7] Guruorasada Rau, V. and N. Krishnamoorthy, stability Analysis of power systems. Omega scientific Publisher, New Dehli, ۲۰۰۷.
- [8] Y. Cao and O. P. Malik, "A nonlinear variable structure stabilizer for power system stability," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 3, pp. 489-495, Sep. ۲۰۰۸.
- [9] M. Fliess, J. Lévine, Ph. Martin, and P. Roucho, "Flatness and defect of nonlinear systems: introductory theory and examples", Int. J. control, 61(6) 1327-1361, ۲۰۱۰.
- [10] Gensior A, Nguyen T M P, Rudolph J, Güldner H. Flatness-based loss optimization and control of a doubly fed induction generator system. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 6: 1457-146, 2011.
- [11] Dannehl J, Fuchs F. Flatness-based control of an induction machine fed via voltage source inverter - concept, control design and performance analysis. *IEEE Industrial Electronics Annual Conference*, 1: 5125 -5130, 2006.
- [12] Thounthong P, Pierfederici S, Davat B.. Analysis of differential flatness-based control for a fuel cell hybrid power source. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 3: 909-920, 2010.
- [13] J-J. E. Slotine, W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, ۲۰۱۲.



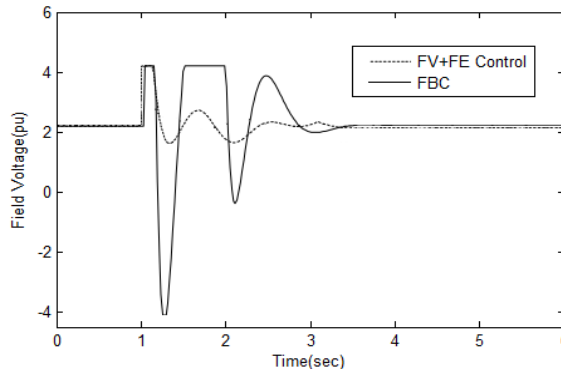
شکل (۸) پاسخ حوزه زمان انحراف سرعت ژنراتور با خطای اتصال کوتاه



شکل (۹) پاسخ حوزه زمان ولتاژ ترمینال ژنراتور با خطای اتصال کوتاه



شکل (۱۰) پاسخ حوزه زمان توان مکانیکی ژنراتور با خطای اتصال کوتاه



شکل (۱۱) پاسخ حوزه زمان ولتاژ میدان ژنراتور با خطای اتصال کوتاه