

آنالیز دینامیک کاربردی و طراحی کنترل مقاوم یک واحد ژنراتور القایی توربین بادی

علیرضا خسروی، علی اکبر جلالی، احسان صرامی فروشانی

دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده برق - پژوهشکده الکترونیک
akhosravi@iust.ac.ir, ajalali@iust.ac.ir

کلمات کلیدی: کنترل مقاوم، تکنیک H_∞ ، آنالیز μ ، ژنراتور القایی و توربین بادی

چکیده

در این مقاله به آنالیز دینامیک کاربردی و طراحی کنترل کننده مقاوم با تکنیک H_∞ برای یک واحد ژنراتور القایی با توربین بادی پرداخته شده است. از آنجایی که سیستم، انرژی اصلی خود را از یک ورودی غیریکنواخت (باد) بدست می آورد، از کنترل مقاوم که روش مناسبی برای حل این قبیل مسایل می باشد، استفاده شده است. با بررسی معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم و تعیین عدم قطعیت های سیستم، کنترل کننده مقاومی با تکنیک H_∞ طراحی شده است که نتایج حاصل از آن با کنترل کننده مبتنی بر جایابی قطب [۱] مقایسه شده است. پاسخ سریع با حداقل خطای ماندگار، تضعیف اغتشاش، زمان نشست مناسب، پایداری و مقاومت سیستم در شرایط تندبادهای سخت، بیانگر بهبود پاسخ سیستم با روش کنترل مقاوم می باشد.

۱- مقدمه

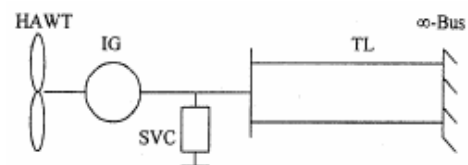
اصولا کنترل یک سیستم که توان را از یک ورودی غیریکنواخت مثل باد تولید می کند یک مساله بسیار مشکل است. سرعت باد به علت تندبادهای لحظه به لحظه در حال تغییر است و مواردی مثل وجود برجهای بسیار بلند آشفتهگی بیشتری را در آن ایجاد می کند. کوششهایی برای غلبه بر این مشکل (غیر یکنواختی باد) برای سیستمهای ژنراتوری سنکرون بادی به وسیله ثابت نگه داشتن سرعت روتور در نزدیکی یک مقدار ثابت با استفاده از کنترل درجه تیغه ها انجام شده است. در بعضی از این گونه سیستمها از یک ژنراتور سنکرون بدون جاروبک با آهن ربای دائمی استفاده شده است و توربین بادی تنها به عنوان یک منبع توان فرض شده است. اما مزیت ژنراتور القایی در مقایسه با ژنراتورهای سنکرون در قیمت کمتر و قابلیت اعتماد بیشتر است. آنها

کنترل ساده تر و تجهیزات معین دارند. یک پیشرفت جدید در توسعه کنترل یک منبع توان راکتیو استاتیکی، ممکن ساختن بررسی کوپل یک ژنراتور القایی با کنترل منبع توان راکتیو استاتیکی شبیه یک آلترناتیو در استفاده از ژنراتورهای سنکرون می باشد. در این مقاله به آنالیز دینامیک کاربردی و طراحی کنترل کننده مقاوم با تکنیک H_∞ برای یک واحد ژنراتور القایی با توربین بادی افقی پرداخته شده است. که در این راستا سیستم مورد شناسایی قرار گرفته و نامعینهای مدل محاسبه شده و برای تنظیم توان خروجی تحت آشوبهای مختلف، کنترل کننده مقاوم با تکنیک H_∞ طراحی شده است که نتایج آن با کنترل کننده مبتنی بر جایابی قطب [۱] مقایسه شده است.

#

۲- ترکیب سیستم ژنراتور بادی

ترتیب اتصال سیستم ژنراتور بادی در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم شامل یک توربین بادی افقی^۳ (HAWT)، ژنراتور القایی^۲ (IG) که به شبکه انتقال هوایی متصل شده، جبران کننده توان راکتیو استاتیکی^۴ (SVC) که به ترمینالهای ژنراتور برای تنظیم ولتاژ متصل شده است.



شکل (۱) سیستم ژنراتور- باد

۳- مدل سیستم

۳-۱- مدل توربین بادی

توربین بادی به وسیله منحنی بدون بعد ضریب توان (C_p) و همچنین یک تابع از نرخ سرعت (λ) و درجه تیغه (β) مشخص می شود. به منظور محدود کردن فشار مکانیکی و

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v_\omega} \quad (1)$$

که R شعاع روتور توربین بادی، Ω سرعت زاویه ای روتور توربین بادی و v_ω سرعت باد می باشد. برای توربین بادی شبیه سازی شده در این مقاله می توان یک فرمول تقریبی بر حسب λ و β برای C_p در نظر گرفت:

$$C_p = (0.44 - 0.017\beta) \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right] - 0.0018(\lambda - 3)\beta \quad (2)$$

گشتاور مکانیکی خروجی توربین بادی به وسیله معادله زیر محاسبه می شود:

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A C_p v_\omega^2 / \lambda \quad (3)$$

که ρ چگالی هوا و A فضای جاروب شده توسط تیغه می باشد.

۳-۲ مدل ژنراتور القایی

یک ژنراتور القایی که با توربین بادی چرخانده می شود در جایی که پیوستگی شار وجود دارد می تواند با محورهای سنکرون q و d توصیف شود [۲]:

$$\dot{\varphi}_{ds} = \omega_b (V_{ds} - R_s i_{ds}) \quad (4)$$

$$\dot{\varphi}_{qs} = \omega_b (V_{qs} - R_s i_{qs}) \quad (5)$$

$$\dot{\varphi}_{dr} = \omega_b (V_{dr} - R_r i_{dr}) - \omega_m \varphi_{qr} \quad (6)$$

$$\dot{\varphi}_{qr} = \omega_b (V_{qr} - R_r i_{qr}) + \omega_m \varphi_{dr} \quad (7)$$

معادله حاکم بر گشتاور الکترومغناطیسی در PU به فرم زیر است:

$$T_e = \varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds} \quad (8)$$

روتورهای ژنراتور القایی و توربین بادی شبیه یک جرم واحد در نظر گرفته شده است، بنابراین معادلات حرکت می تواند چنین نوشته شود [۲]:

¹ Horizontal Axis Wind Turbine

² Induction Generator

³ Static VAR Compensator

$$V_{ds} = V_{db} + R_{TL}i_{dTL} - x_{TL}i_{qTL} + \frac{x_{TL}}{\omega_b} \dot{i}_{dTL} \quad (۱۵)$$

$$V_{qs} = V_{qb} + R_{TL}i_{qTL} + x_{TL}i_{dTL} + \frac{x_{TL}}{\omega_b} \dot{i}_{qTL} \quad (۱۶)$$

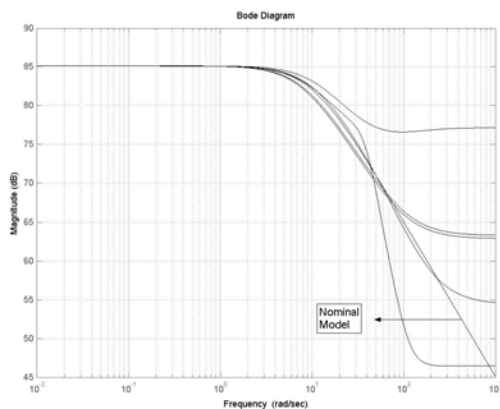
$$\dot{\omega}_m = \frac{\omega_b}{2H}(T_m - T_e) \quad (۹)$$

که H معادل ثابت لختی (اینرسی) برای هر دو روتور توربین بادی و ژنراتور القایی می باشد.

۴- شناسایی سیستم، تعیین مدل نامی و نامعینی ها

برای تعیین مدل ژنراتور القایی [۵]، با استفاده از ورودی چریپ^۲ و مدل‌های ARX^3 و BJ^4 سیستم را مورد شناسایی قرار می دهیم، که بر اساس معیار نرم ۲ خطا، بهترین مدلها انتخاب شده است. مدل نامی که بر اساس شکل (۲) از میانگین این مدلها بدست آمده، دارای تابع تبدیلی به فرم

$$P_0(s) = \frac{-144500}{0.8s+8} \quad \text{می باشد.}$$



شکل (۲) پاسخ فرکانسی مدلها و مدل نامی

برای تعیین عدم قطعیت های سیستم به صورت مدل ضربی با استفاده از رابطه (۱۷) و در نظر گرفتن ماکزیمم حد عدم قطعیت، وزن عدم قطعیت سیستم بر اساس شکل (۳)، به صورت $W^{-1}(s) = 0.04s + 0.002$ انتخاب شده است.

$$W = \left| \frac{P}{P_0} - 1 \right| \quad (۱۷)$$

۳-۳ مدل جبران کننده توان راکتیو

برای خازن ثابت، یک رابطه بین جریان و ولتاژ در محورهای سنکرون d و q با استفاده از مرجع [۳] می توان استفاده کرد:

$$v_{qs} = \frac{1}{\omega_b} \dot{v}_{ds} - x_c i_{dc} \quad (۱۰)$$

$$v_{ds} = -\frac{1}{\omega_b} \dot{v}_{qs} + x_c i_{qc} \quad (۱۱)$$

برای TCR^1 ، انتقال کامل با زاویه آتش گیت ۹۰ درجه بدست آمده است. اثر افزایش زاویه آتش، کاهش ترکیبات هارمونیک اصلی جریان القاگر است و کاهش توان راکتیو به خوبی کاهش جریان می باشد. با استفاده از آنالیز فوریه ترکیبات اصلی از جریان القاگر می تواند با فرمول زیر محاسبه شود [۳]:

$$i_L = \frac{2(\pi - \alpha) - \sin[2(\pi - \alpha)]}{\pi x_L} V_s = \frac{V_s}{x_{Leq}} \quad (۱۲)$$

که x_{Leq} معادل راکتانس TCR است و α زاویه آتش گیت می باشد. معادلات تفاضلی i_L برای محورهای سنکرون d و q در قابهای مرجع سنکرون می تواند به صورت زیر نوشته شود [۳]:

$$\dot{i}_{dL} = \omega_b (V_{ds} + x_{Leq} i_{qL}) / x_{Leq} \quad (۱۳)$$

$$\dot{i}_{qL} = \omega_b (V_{qs} - x_{Leq} i_{dL}) / x_{Leq} \quad (۱۴)$$

۴-۳ مدل خط انتقال

معادلات d و q که دینامیکهای معرفی شده خط انتقال را توصیف می کنند به صورت ذیل می باشند [۴]:

² Chirp

³ Auto Regressive with eXternal input model

⁴ Box-Jenkins (BJ) model

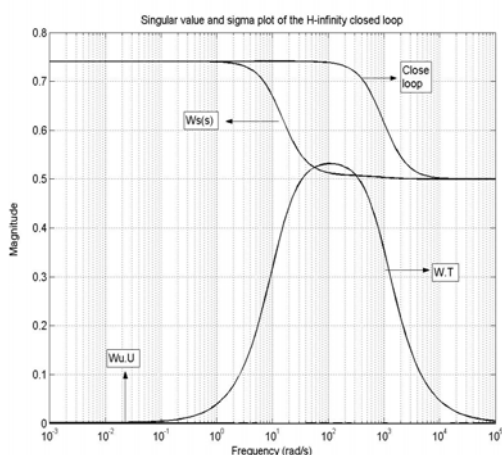
¹ Thyristor- Controlled Reactor

$$W_U = e^{-5} \quad (19)$$

طراحی با استفاده از نرم افزار *MATLAB* صورت گرفته است. این نرم افزار طراحی را با بهره گیری از الگوریتم دوپله انجام می دهد که پس از تکرارهای متعدد، مقدار γ بهینه برابر با 0.7412 بدست آمده است. تابع تبدیل کنترل کننده به صورت زیر می باشد.

$$K(S) = (-0.06517S + 0.654) * (S^5 + 6.45S^4 + 73.2S^3 + 34.21S^2 + 885.68S + 177.097)^{-1} \quad (20)$$

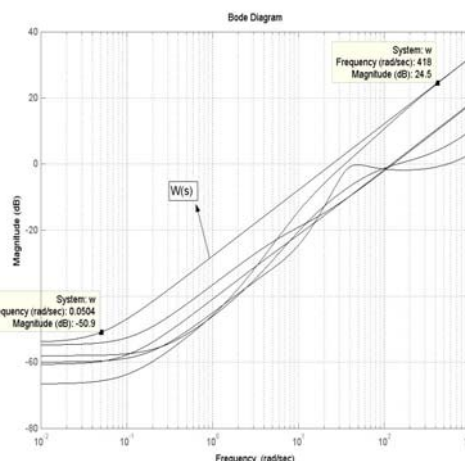
مقادیر استثنایی سیستم حلقه بسته به همراه پاسخ فرکانسی آن در شکل (۵) رسم شده است.



شکل (۵) پاسخ فرکانسی مقادیر استثنایی

۶- تحلیل پایداری مقاوم کنترل کننده H_∞

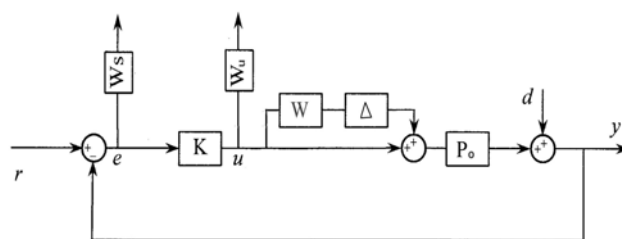
هدف تحلیل پایداری مقاوم سیستم حلقه بسته متشکل از سیستم غیرخطی و کنترل کننده طراحی شده در مرحله قبل با استفاده از آنالیز μ [۷] می باشد. منحنی مقدار استثنایی محاسبه شده به روش μ در شکل (۶) رسم شده است. برای تعیین پایداری مقاوم سیستم طراحی شده بر اساس آنالیز μ ، لازم است که مقادیر استثنایی سیستم حلقه بسته کوچکتر از یک باشد. بر اساس شکل ماکزیمم مقدار استثنایی برابر 0.55 می باشد که بیانگر درصد خوبی از پایداری مقاوم سیستم می باشد.



شکل (۳) پاسخ فرکانسی نامعینی ها

۵- طراحی کنترل کننده H_∞

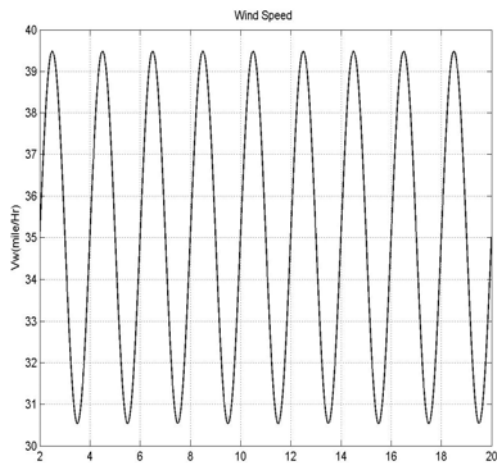
برای طراحی کنترل کننده مقاوم ابتدا باید سیستم را بفرم استاندارد H_∞ [۶] تبدیل نمود. بنابراین اگر فرایند تعمیم یافته سیستم ژنراتور القایی مطابق شکل (۴) باشد.



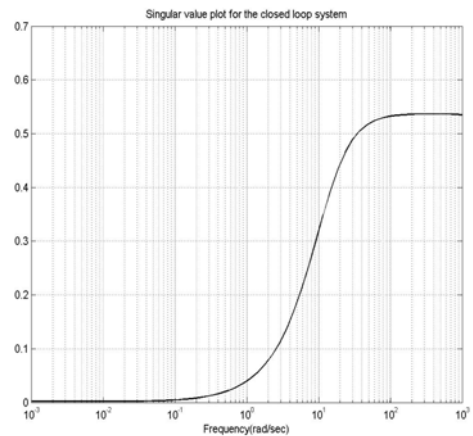
شکل (۴) فرایند تعمیم یافته سیستم ژنراتور القایی

P_0 فرایند نامی، K کنترل کننده مورد نظر، r ورودی مرجع، d ورودی اغتشاش، y خروجی سیستم، u خروجی کنترل کننده و e سیگنال خطا می باشد. وزنهایی که روی این سیگنالها قرار دارند، باید مطابق با اهداف کنترلی باشند که طراح لازم می داند. هرچه این وزن ها از مرتبه پایین تری باشند، درجه کنترل کننده نیز پایین تر خواهد بود. تعیین این وزن ها بستگی به فیزیک مسئله داشته و با استفاده از روش سعی و خطا بدست می آید. در طراحی انجام شده وزن ها بصورت زیر انتخاب گردیده اند.

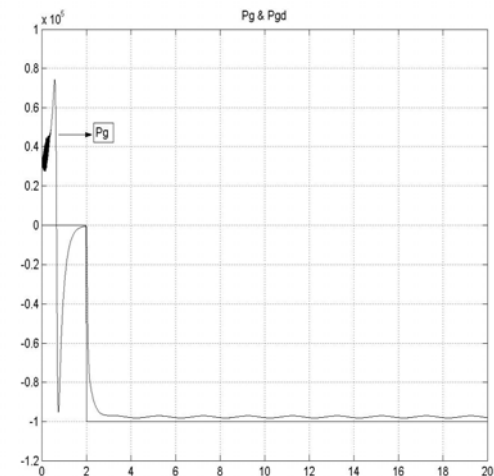
$$W_S(s) = \frac{0.5(s + 20)}{s + 0.2} \quad (18)$$



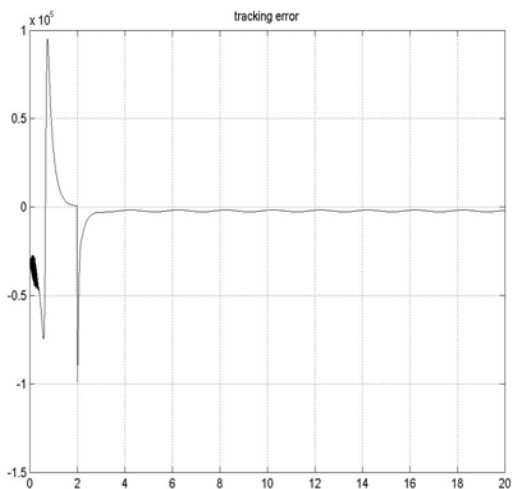
شکل (۷) اغتشاش باد به صورت سینوسی



شکل (۶) منحنی مقدار استثنایی پایداری مقاوم



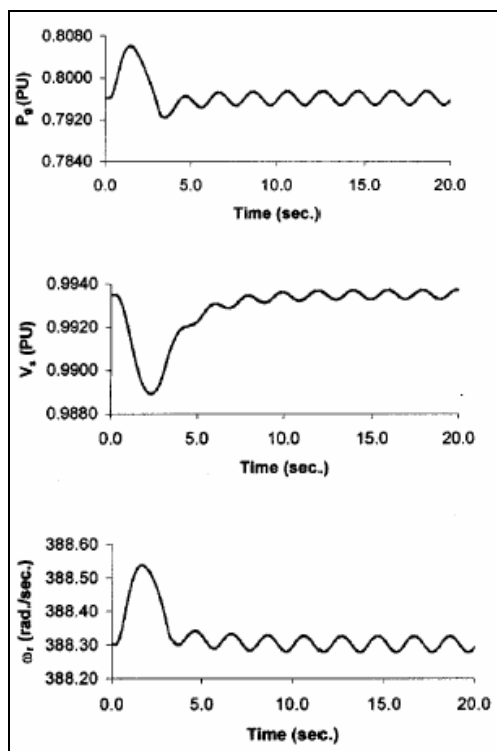
شکل (۸) ورودی مرجع و خروجی سیستم



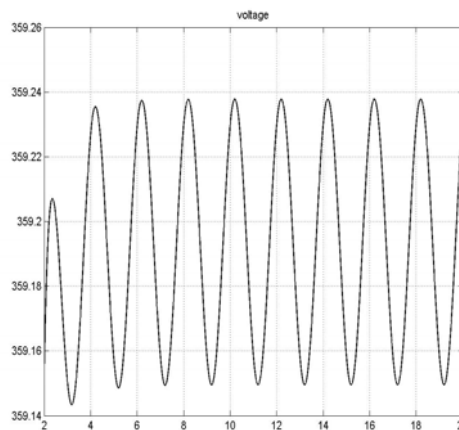
شکل (۹) خطای ردیابی

۷- شبیه سازی و تحلیل سیستم طراحی شده

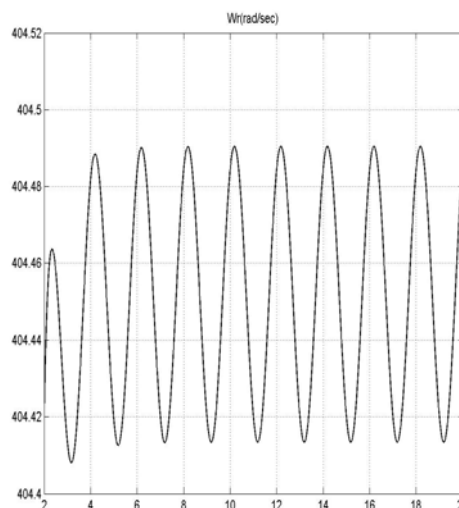
کنترل کننده طراحی شده مطابق با رابطه (۲۰) می باشد که با توجه به شکل (۴)، فرآیند P_O و وزن ها را مطابق روابط (۱۷) و (۱۸) و (۱۹) برای طراحی این کنترل کننده در نظر گرفته شده است. حال کنترل کننده طراحی شده را بر روی مدل اصلی سیستم با مقادیر نامی ذکر شده در پیوست اعمال کرده و به بررسی نتایج حاصل می پردازیم. برای تحلیل در حوزه زمان، ورودی پله با اغتشاش سینوسی مطابق شکل (۷) به سیستم اعمال می کنیم. نمودار تعقیب موج مرجع با استفاده از کنترل کننده H_{∞} مطابق شکل (۸) می باشد که نشان دهنده تعقیب مناسب و سریع سیگنال مرجع در حضور اغتشاش سینوسی باد می باشد. در شکل (۹) نمودار خطای ردیابی موج مرجع در حضور اغتشاش نیز موید تضعیف اغتشاش بر اساس عملکرد نامی تعریف شده می باشد. همچنین نمودار ولتاژ و سرعت روتور ژنراتور به ازای اغتشاش سینوسی باد در شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده که در مقایسه با نتایج حاصل از کنترل کننده جایابی قطب [۲] شکل (۱۲-الف وب) دارای پاسخ سریع با خطای ماندگار کمتر و درصد حذف اغتشاش بهتری است.



شکل (۱۲-ب) - نتایج حاصل از کنترل کننده جایابی قطب



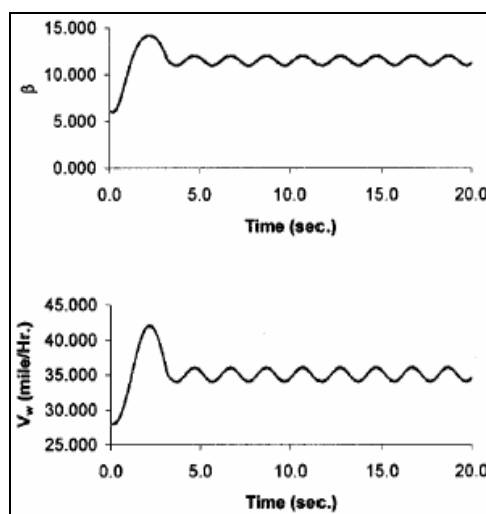
شکل (۱۰) ولتاژ ترمینال ژنراتور



شکل (۱۱) سرعت روتور ژنراتور

۸ - نتیجه گیری

در این مقاله به آنالیز دینامیک کاربردی و طراحی کنترل کننده مقاوم با تکنیک H_∞ برای یک واحد ژنراتور القایی با توربین بادی افقی پرداخته شده که یک محدوده عملی باد برای تنظیم توان خروجی ژنراتور القایی با استفاده از کنترل تیغه بدست آمده است. کنترل کننده مقاوم با تکنیک H_∞ طراحی شده و در مدل غیرخطی بکار گرفته شده است. نتایج حاصل از کنترل کننده مقاوم با کنترل کننده مبتنی بر جایابی قطب مقایسه شده است که کنترل کننده مقاوم بر خلاف کنترل کننده ذکر شده به خوبی توانسته نوسانات باد را حذف کند. پاسخ سریع با حداقل خطای ماندگار، زمان نشست مناسب پایداری و مقاومت سیستم در خلال تندبادهای سخت موید بهبود پاسخ سیستم با روش کنترل مقاوم می باشد.



شکل (۱۲-الف) - نتایج حاصل از کنترل کننده جایابی قطب

ضمیمه

الف) پارامترهای ژنراتور القایی:

۴ قطب، 220V, 60HZ

$$X_m = 4.161PU,$$

$$X_s = 0.135PU,$$

$$X_r = 0.075PU,$$

$$R_s = 0.0059PU,$$

$$R_r = 0.0339PU,$$

$$H_g = 1.975s$$

ب) پارامترهای جبران کننده توان راکتیو

$$X_C = 3.8PU$$

$$X_L = 4.0PU,$$

ج) پارامترهای خط انتقال

$$V_B = 1.04PU$$

$$R_{TL} = 0.015PU,$$

$$X_{TL} = 0.15PU,$$

د) پارامترهای توربین بادی

$$H_T = 16.72s, R=200ft,$$

$$V_w (cut - out) = 45mile / h$$

$$V_w (cut - in) = 12mile / h,$$

۹- مراجع

- [1] E.S.Abdin and W.Xu, "Control design and dynamic performance analysis of a wind Turbine-induction generator unit", IEEE Transactions on energy conversion, vol. 15, No. 1, PP. 1432-1439, 2000.
- [2] S.H.Javid, A.Murdoch and J.R.Winkelman, "Control design for a wind turbine-generator using output feedback", IEEE Trans, vol. 5, PP. 425-433, 1992.
- [3] Muljadi, E.; Hess, H.L.; Thomas, K.; "Zero sequence method for energy recovery from a variable-speed wind turbine generator", IEEE Trans. Vol. 16, PP. 99-103, 2001.
- [4] Hao, S.; Hunter, G.; Ramsden, V.; Patterson, "Control system design for a 20 kW wind turbine generator with a boost converter and battery bank load", IEEE Trans. Vol. 4, PP. 2203-2206, 2001.
- [5] C.M.Ong, "Dynamic simulation of electric machinery using Matlab / Simulink" IEEE Trans, No. 6, PP. 167-259, 1998.
- [6] J.Doyle, K.Glover and B.A..Francis, "State Space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems" IEEE Trans, AC-34, No.8, PP 831-842, 1989.
- [7] G.Balas, J.Doyle, R.Smith, the μ analysis and synthesis toolbox for use with matlab", the mathworks Inc, South Natick, 1993.