



**University of Kurdistan**

Dept. of Electrical and Computer Engineering

*Smart/Micro Grid Research Center*

[smgrc.uok.ac.ir](http://smgrc.uok.ac.ir)

## **Robust frequency control design in islanded microgrid using $H^\infty$ and mixed $H_2/H^\infty$ (in Persian)**

Habibi F, Bevrani, H.

Published (to be published) in: Smart grid conference, Tehran, Iran

(Expected) publication date: 2014

### **Citation format for published version:**

Habibi F, Bevrani, H. (2014) Robust frequency control design in islanded microgrid using  $H^\infty$  and mixed  $H_2/H^\infty$  (in Persian), Smart grid conference, Tehran, Iran

### **Copyright policies:**

- Download and print one copy of this material for the purpose of private study or research is permitted.
- Permission to further distributing the material for advertising or promotional purposes or use it for any profit-making activity or commercial gain, must be obtained from the main publisher.
- If you believe that this document breaches copyright please contact us at [smgrc@uok.ac.ir](mailto:smgrc@uok.ac.ir) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



کنفرانس شبکه های هوشمند ۹۳  
۱۸ و ۱۹ آذرماه ۱۳۹۳  
تهران - پژوهشگاه نیرو



## طراحی کنترل کننده مقاوم فرکانس برای یک ریزشبهکه جزیره‌ای بر اساس

روش‌های  $H_{\infty}$  و روش ترکیبی  $H_2 / H_{\infty}$

فرشید حبیبی<sup>۱</sup>، حسن بیورانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، habibi.farshid@gmail.com

<sup>۲</sup> گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، bevrani@ieee.org

چکیده - افزایش نیاز به انرژی، کمبود سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌ها در رابطه با مسائل زیست‌محیطی سبب ورود هر چه بیشتر ریزشبهکه‌ها در سیستم‌های قدرت شده‌است. با افزایش ریزشبهکه‌ها، بر میزان پیچیدگی سیستم‌های قدرت افزوده شده و باعث ناکارایی کنترل‌کننده‌های مرسوم در بازه وسیعی از نقاط کار می‌شود. پس احتیاج به روش‌های کنترلی مناسب‌تر، بیش‌ازپیش احساس می‌شود. از این‌رو، در این مقاله طراحی کنترل مقاوم فرکانس برای یک ریزشبهکه منفک مطرح گردیده‌است. عملکرد سیستم در حضور کنترل‌کننده مرسوم  $PI$  که بر اساس روش کلاسیک زیگلر-نیکولز تنظیم شده با ساختارهای کنترلی ارائه شده بر اساس روش‌های  $H_{\infty}$  و روش ترکیبی  $H_2 / H_{\infty}$  مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها، عملکرد و پایداری مناسب کنترل‌کننده‌های پیشنهادی را به روشنی تأیید می‌کنند.

کلید واژه- ریزشبهکه، مد جزیره‌ای، تولید پراکنده، کنترل مقاوم،  $H_{\infty}$  و  $H_2 / H_{\infty}$

معرفی گردید. ریزشبهکه‌ها شامل چندین منبع تولید پراکنده، بارها و کنترل‌کننده‌های محلی است که به صورت مجتمع در سطح ولتاژ توزیع یا فوق توزیع به سیستم قدرت مرسوم متصل می‌شوند. اساس طراحی در این شبکه‌ها بایستی چنان باشد که قابلیت ادامه کار و تغذیه بارها در هر دو حالت وصل و قطع از شبکه اصلی برای ریزشبهکه فراهم شود [۱، ۲].

کنترل‌کننده‌های تناسبی-انترگالی بیشترین کاربرد را در سیستم‌های قدرت دارا می‌باشند، چون که دارای ساختاری ساده و مقرون‌به‌صرفه هستند و در سیستم‌های قدرت به این کنترل‌کننده‌ها، بیش از هر کنترل‌کننده دیگری اعتماد وجود دارد؛ اما مشکل این کنترل‌کننده‌ها این است که ضرایب کنترلی بر اساس شرایط خطی و نقطه کار سیستم، توسط تکنسین‌ها بر اساس میزان شناخت و تجربه آن‌ها، برای یک‌بار تنظیم شده و در سیستم قرار می‌گیرند. اگر شرایط کار نامی عوض شود یا به دلیل وقوع اغتشاش شرایط خطی سیستم عوض شود، مقادیر در نظر گرفته شده برای این کنترل‌کننده‌ها، از این به بعد مقادیری بهینه نخواهند بود و همان پاسخ مناسب قبل را نخواهند داشت [۳].

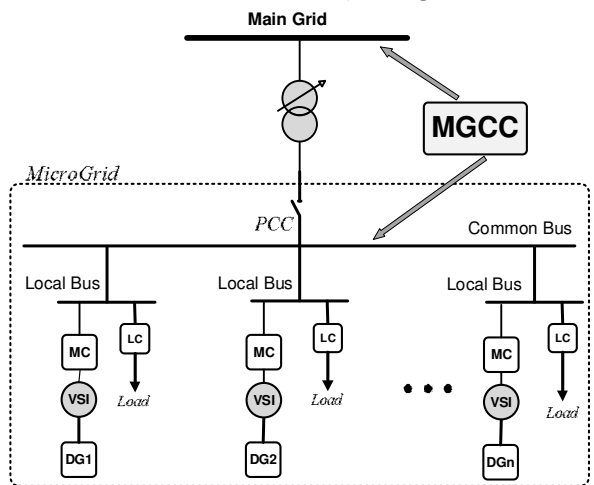
### ۱- مقدمه

با افزایش رشد چشمگیر مصرف انرژی الکتریکی، واحدهای تولید مرسوم انرژی با مشکلات مختلفی مانند کمبود سوخت‌های فسیلی، هزینه بالای احداث نیروگاه‌های جدید، گرمایش جهانی و... روبرو شده‌اند. برای حل این مشکلات و هم‌چنین به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت، استفاده از منابع تولید پراکنده (DG)<sup>۱</sup> در چندین دهه گذشته مطرح گردید. در منابع تولید پراکنده غالباً انرژی اولیه برای تولید برق، منابع انرژی تجدیدپذیر همچون انرژی بادی، انرژی خورشیدی، انرژی گرمایشی زمین، سلول‌های سوختی و مانند این‌هاست. با پدیدار شدن منابع تولید پراکنده، چندین مشکل از جمله نگهداری و محافظت منابع، نحوه مشارکت این منابع در تنظیم پارامترهای اساسی شبکه، همچون فرکانس و ولتاژ و نحوه مبادله توان میان شبکه سراسری و منابع تولید پراکنده و ... ظاهر گردید. برای حل این مشکلات و در نظر گرفتن این منابع و بارهای محلی به صورت مجتمع و یکپارچه، در سال ۱۹۹۸ توسط موسسه CERTS<sup>۲</sup> مفهوم ریزشبهکه‌ها<sup>۳</sup> برای اولین بار در سیستم‌های قدرت مدرن

استراتژی‌های کنترلی در ریزشبکه‌ها بایستی به‌صورتی باشند که هدف اساسی این شبکه‌ها در ادامه کار در هر دو حالت وصل و قطع از شبکه سراسری را تأمین کنند. به همین منظور دو ساختار کلی کنترلی بسته به شرایط کاری ریزشبکه‌ها در نظر گرفته شده است.

در حالتی که ریزشبکه به شبکه سراسری قدرت وصل باشد، پایداری پارامترهای اساسی شبکه همچون ولتاژ و فرکانس توسط شبکه اصلی تأمین شده و ریزشبکه به‌عنوان یک عنصر کمکی در تأمین بارهای مشترک محسوب می‌شود. به این مد کاری، PQ گفته می‌شود که بیانگر این است که ریزشبکه برای تحویل توان‌های حقیقی و موهومی ثابت کنترل می‌شود. در حالت قطع، تنظیم پارامترهای اساسی سیستم به عهده خود ریزشبکه بوده و بایستی غیرازاین مورد، بارهای خود یا حداقل بارهای حساس و مهم را تغذیه نماید. به این مد کاری، VSI گفته می‌شود [۵].

پس برای اعمال این روش‌های کنترلی به یک سری کنترل‌کننده، روی هرکدام از ریزمنابع (MC)<sup>۵</sup> و روی بارهای الکتریکی (LC)<sup>۶</sup> نیاز است. همچنین برای ارتباط میان ریزشبکه و شبکه اصلی قدرت، وجود یک کنترل‌کننده مرکزی (MGCC)<sup>۷</sup> که به‌صورت هم‌زمان به پردازش اطلاعات دریافتی از ریزشبکه و شبکه اصلی بپردازد و بر مبنای این اطلاعات برای حالات کاری ریزشبکه و ریزمنابع تصمیم‌گیری کند، ضروری است.



شکل ۱: ساختار کلی ریزشبکه‌ها و استراتژی‌های کنترلی در آن

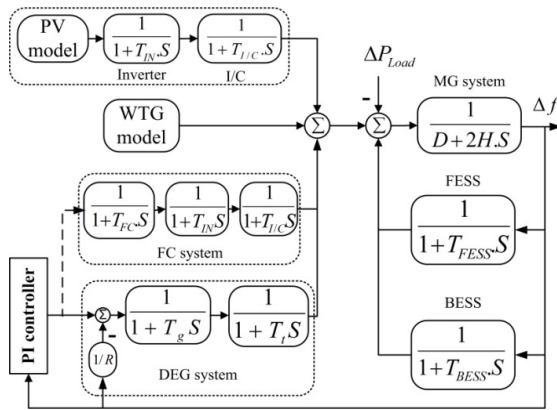
با در نظر گرفتن ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی منابع تولید پراکنده و احتمال همیشگی رخداد اغتشاش، همیشه این امکان که ریزشبکه و شبکه اصلی از یکدیگر جدا شوند، وجود دارد. پس در حضور این عدم قطعیت‌ها، استفاده از روش‌های مقاوم برای حفظ پایداری و عملکرد مناسب سیستم، گزینه‌ای بسیار مناسب خواهد بود که در این مقاله برای اعمال این مزیت‌ها به سیستم، از روش‌های  $H_{\infty}$  و  $H_2 / H_{\infty}$  mixed استفاده شده است.

ابتدا کنترل‌کننده PI بر اساس روش کلاسیک زیگلر-نیکولز تنظیم می‌شود و عملکرد آن با کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده مبتنی بر الگوریتم‌های مقاوم مقایسه می‌گردد. کارآیی روش مطرح‌شده با شبیه‌سازی در محیط MATLAB/SIMULINK بررسی شده است.

## ۲- ریزشبکه‌ها و ساختارهای کنترلی

ریزشبکه‌ها از دسته‌ای از منابع تولید پراکنده و بارهای محلی تشکیل شده‌اند که می‌توانند در هر دو حالت وصل و قطع از شبکه سراسری به تغذیه بارهای محلی ادامه دهند [۴]. ساختار کلی یک ریزشبکه در شکل ۱ دیده می‌شود. ریزشبکه و شبکه سراسری در نقطه اتصال مشترک (PCC)<sup>۴</sup> به یکدیگر وصل می‌باشند. ریزمنابع مورد استفاده در این شبکه‌ها به‌واسطه عناصر الکترونیک قدرت به باس اصلی متصل می‌شوند. به همین دلیل در ریزشبکه وجود منابع AC و همچنین DC میسر خواهد بود. منابع DC، همچون سلول‌های خورشیدی و سوختی با واسطه المان‌های DC/AC به‌منظور متناوب سازی ولتاژ DC و منابع AC، همراه با واسطه‌های AC/DC/AC که به‌منظور هم‌زمان‌سازی فرکانسی در این سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به نوسانی بودن توان منابع پراکنده به دلیل استفاده از منابعی مانند باد و خورشید و همچنین اینرسی پایین این شبکه‌ها، پارامترهای اساسی شبکه می‌تواند با کوچک‌ترین اغتشاشی دست‌خوش تغییراتی اساسی شده و پایداری ریزشبکه به خطر بیفتد. برای غلبه بر این مسائل، حضور منابع ذخیره‌کننده انرژی همچون باتری‌ها و Flywheel ضروری خواهد بود. به هرکدام از منابع، یک سوئیچ وصل شده است تا در موقع لازم از ریزشبکه جدا گردند. موارد ذکرشده، در شکل ۱ به‌طور کامل نشان داده شده است [۳].

### ۳- معرفی مدل سیستم



(ب)

شکل ۲: سیستم آزمون؛ الف) مدل واقعی ریزشبهه، ب) مدل پاسخ فرکانسی ریزشبهه

همان طور که در شکل ۲-ب دیده می شود، یک کنترل کننده کلاسیک PI به منظور حفظ پایداری فرکانسی ریزشبهه در نظر گرفته شده که در ابتدا به وسیله روش زیگلر-نیکولز که یکی از روش های قوی کلاسیک در تنظیم ضرایب کنترلی بوده، تنظیم می شود. در مرجع [۷، ۸] راجع به روش های تنظیم کلاسیک مطالب کاملی ذکر شده است. در ادامه کنترل کننده PI با کنترل کننده های مقاوم  $H_2$  و  $H_\infty$  جایگزین شده و عملکرد آن ها با یکدیگر مقایسه می شوند.

### ۳-۱- مدل فضای حالت سیستم

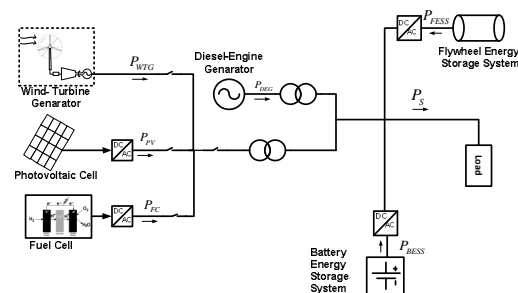
با توجه به هدف مقاله که طراحی کنترل کننده مقاوم است، لازم است که مدل فضای حالت یا تابع تبدیل خطی سیستم ارائه شود. مدل فضای حالت سیستم در معادلات (۱-۴) آورده شده است.

در روابط، بردار  $X$  نشان دهنده متغیرهای حالت سیستم، بردار ورودی های اغتشاش در متغیر  $W$  و  $U$  سیگنال کنترلی سیستم است. تغییرات توان پانل خورشیدی، تغییرات توربین بادی و همچنین تغییرات بار به عنوان ورودی های اغتشاش در نظر گرفته شده اند. ماتریس های  $A$ ،  $B_1$ ،  $B_2$  و  $C$  در روابط (۳-۴) تعریف شده اند. لازم به ذکر است، کار کنترل توسط دیزل

با توجه به وجود عدم قطعیت های فراوانی که در ریزشبهه ها وجود دارد و امکان ایزوله شدن آن از شبکه اصلی قدرت بنا به رخداد خطاهای متفاوت در سیستم وجود دارد، بررسی پایداری حالت جزیره ای سیستم از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو برای آزمون روش کنترلی پیشنهادی یک ریزشبهه منفک از سیستم اصلی قدرت به عنوان سیستم آزمون در نظر گرفته شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است. ریزشبهه آزمون شامل یک ژنراتور مرسوم دیزلی (DEG)<sup>۱</sup>، یک پانل خورشیدی (PV)<sup>۲</sup>، یک توربین بادی (WTG)<sup>۳</sup>، یک سیستم سلول سوختی (FC)<sup>۴</sup> و دو منبع ذخیره کننده انرژی (BESS<sup>۵</sup> و FESS<sup>۶</sup>) است. همان طور که در شکل ۲-الف مشاهده گردید، ریزمنابع از طریق واسطه های الکترونیک قدرت همانند کانورترها و اینورترها به شبکه اصلی و بارها متصل می شوند. مدل ساده شده از پاسخ فرکانسی سیستم برای تحلیل ساده تر از نحوه رفتار آن در مقابل اغتشاشات مختلف در نظر گرفته شده است که در شکل ۲-ب نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای استفاده شده، در جدول ۱ آمده است [۳، ۶].

جدول ۱: مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل فرکانسی ریزشبهه

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
D(pu/Hz)	0.015	$T_g$ (s)	0.08
2H (pu s)	0.1667	$T_f$ (s)	0.4
$T_{FESS}$ (s)	0.1	$T_{ILC}$ (s)	0.004
$T_{BESS}$ (s)	0.1	$T_m$ (s)	0.04
$T_{FC}$ (s)	0.26	R(Hz/pu)	3



(الف)



کنفرانس شبکه های هوشمند ۹۳  
 ۱۸ و ۱۹ آذرماه ۱۳۹۳  
 تهران - پژوهشگاه نیرو



ژنراتور انجام می‌شود و همچنین تغییرات فرکانسی ( $\Delta f$ )  
 به‌عنوان خروجی سیستم در نظر گرفته شده است.

$$X = [\Delta P_{inv_{pv}} \quad \Delta P_{IIC_{pv}} \quad \Delta P_{FC} \quad \Delta P_{inv_{FC}} \quad \Delta P_{IIC_{FC}} \quad \dots \quad \Delta P_g \quad \Delta P_T \quad \Delta P_{BESS} \quad \Delta P_{FESS} \quad \Delta f]' \quad (2)$$

$$W = [\Delta P_\phi, \Delta P_{WTG}, \Delta P_L]' \quad (3) \quad \begin{cases} \dot{X} = AX + B_1W + B_2U \\ Y = CX \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} -1/T_{in} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/T_{ic} & -1/T_{ic} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{fc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/T_{fc} \\ 0 & 0 & 1/T_{in} & -1/T_{in} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/T_{ic} & -1/T_{ic} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_g & 0 & 0 & 0 & -1/(RT_g) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/T_t & -1/T_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_{BESS} & 1/T_{BESS} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_{FESS} & 1/T_{FESS} \\ 0 & 1/2H & 0 & 0 & 1/2H & 0 & 1/2H & 1/2H & 1/2H & -D/2H \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1/T_{in} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(2H) & -1/(2H) \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/T_g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (4)$$



کنفرانس شبکه های هوشمند ۹۳  
۱۸ و ۱۹ آذرماه ۱۳۹۳  
تهران - پژوهشگاه نیرو



به عبارت دیگر، کنترل کننده  $H_{\infty}$  یک مسئله کنترلی بهینه سازی است که به دنبال جوابی ممکن برای به حداقل رساندن تبدیل کسری خطی مطابق رابطه زیر است:

$$\|F_l(P, K)\|_{\infty} < 1 \quad (7)$$

۴-۱- انتخاب توابع وزنی

مهم ترین مرحله در طراحی کنترل کننده  $H_{\infty}$  تعیین توابع وزنی است که تاکنون روش جامعی برای به دست آوردن آن‌ها ارائه نشده است. در حال حاضر، تنها بر اساس تجربه و مهارت طراح و با توجه به اهداف خاص کنترلی مورد نظر از قبیل پهنای باند سیستم حلقه بسته، میزان تضعیف اغتشاشات فرکانس پایین، کمینه نمودن تأثیر نامطلوب خطاهای مدل سازی و ... توابع وزنی مقدماتی به دست آورده شده و با تکرار چندین مرحله سعی و خطا و بررسی نمودن این موضوع که آیا خواسته های مورد نظر چه از نظر پایداری و چه از نظر کارایی حاصل شده اند، این توابع مقدماتی اصلاح شده و توابع وزنی نهایی به دست آورده شده اند. در مراجع [۳، ۹، ۱۱، ۱۲] چندین روش برای مدل سازی نامعینی و انتخاب توابع وزنی ذکر شده است.

در کار مطالعاتی صورت گرفته، چارچوب کلی نشان داده شده در شکل ۴ برای مدل سازی سیستم، اعمال توابع وزنی و در نهایت طراحی کنترل کننده مقاوم مبتنی بر روش  $H_{\infty}$  در نظر گرفته شده است.  $W_1$ ،  $W_2$  و  $W_3$  به ترتیب توابع وزنی مربوط به تعقیب خطا، عملکرد مقاوم و وزن روی تابع تبدیل کنترل کننده سیستم است.

در این مقاله با اعمال  $\pm 20\%$  تغییرات به اینرسی سیستم ( $H$ )،  $\pm 10\%$  تغییرات به ضریب میرایی سیستم ( $D$ ) و همچنین  $\pm 5\%$  تغییرات به ثابت افتی سیستم ( $R$ ) توابع وزنی استخراج گردیده اند. همچنین نامعینی ها به صورت جمع شونده در نظر گرفته شده است [۹].

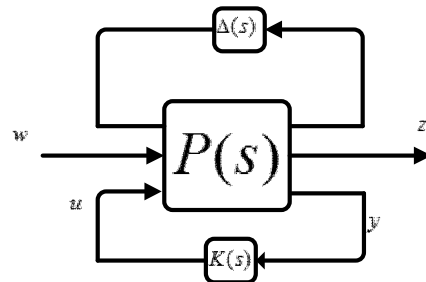
جهت یافتن  $W_3$ ، دیاگرام بدهای  $\Delta(s)$  در رابطه (۸)، به ازای تغییرات ذکر شده رسم می شوند. سپس رابطه پوش منحنی  $\Delta(s)$ ، همان  $W_3$  خواهد بود. این مسئله در شکل ۵ نشان داده شده که در آن پوش منحنی ها به صورت خط چین بروی شکل مشخص شده است [۱۱].

$$\Delta(s) = P(s) - G(s) \quad (8)$$

۴- طراحی کنترل کننده مقاوم مبتنی بر روش  $H_{\infty}$

در طراحی به روش  $H_{\infty}$  از فرم استاندارد استفاده می شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ نشان دهنده یک سیستم غیردقیق تحت کنترل فیدبک است [۹].

اجزای نشان داده شده در شکل به صورت زیر هستند:  $W$ : بردار سیگنال های خارجی که به سیستم وارد می شوند. این سیگنال ها می توانند شامل ورودی های شناخته شده، اغتشاش، نویز و ... باشند.



شکل ۳: بلوک دیاگرام سیستم کنترلی  $H_{\infty}$

$z$ : بردار سیگنال هایی که نشان دهنده رفتار سیستم می باشند از قبیل سیگنال خطا.

$u$ : بردار سیگنال های کنترلی

$y$ : بردار خروجی های قابل اندازه گیری

$P(s)$ : مدل نامی سیستم که می تواند شامل توابع وزنی بکار رفته نیز باشد.

$\Delta(s)$ : کلیه عدم قطعیت های موجود در سیستم را در برمی گیرد. این عدم قطعیت ها می توانند شامل خطاهای مدل سازی سیستم، تغییرات پارامترهای سیستم، خطاهای ناشی از خطی سازی سیستم و ... باشند [۱۰].

به تابع تبدیل از  $w$  به  $z$  تبدیل کسری خطی ( $LFT$ ) گفته می شود و با نماد  $F_l(P, K)$  نمایش می دهند.

$$z = F_l(P, K) \quad (5)$$

با تعریف مناسبی از  $w$  و  $z$  یا به طور معادل  $P(s)$ ، مسائل طراحی عملی در قالب یک مسئله بهینه سازی به صورت زیر بیان می شوند:

$$\min_K \|F_l(P, K)\|_{\infty} \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_3 = 136.1958 \frac{(S+138.9897)(S+17.1684)(S+.6944)}{(S+240.4356)(S+39.9936)(S+.43)} \\ W_2 = 0.05 \\ W_1 = 0.01 \end{array} \right. \quad (9)$$

۴-۲- پایداری و عملکرد مقاوم سیستم حلقه بسته برای طراحی بهتر کنترل کننده مقاوم، بایستی از وضعیت سیستم حلقه باز شبکه اطلاعات جامعی در دست باشد، به همین منظور دیاگرام بد<sup>۴</sup> آن در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر حاشیه فاز و بهره بروی شکل مشخص است.

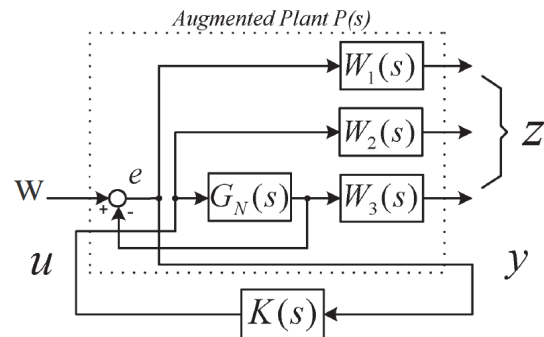
در طراحی مقاوم به روش  $H_\infty$ ، بایستی نرم بی نهایت توابع حساسیت و مکمل حساسیت از یک مقدار کوچک کمتر شوند. به عبارت دیگر، پایداری و عملکرد مقاوم برای سیستم تحت بررسی به صورت رابطه (۱۰) تعریف می گردد.

$$T_{ZW} \triangleq \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 R \\ W_3 T \end{bmatrix} \quad (10)$$

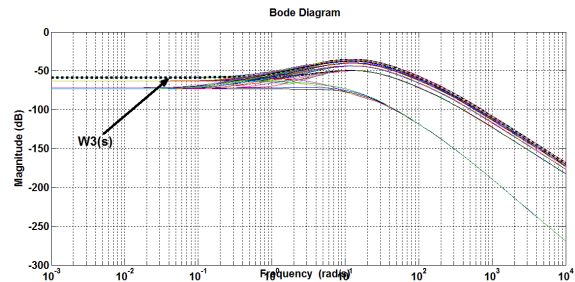
که در آن S، R و T به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\left\{ \begin{array}{l} S = (I + GK)^{-1} \\ R = K(I + GK)^{-1} \\ T = GK(I + GK)^{-1} \end{array} \right. \quad (11)$$

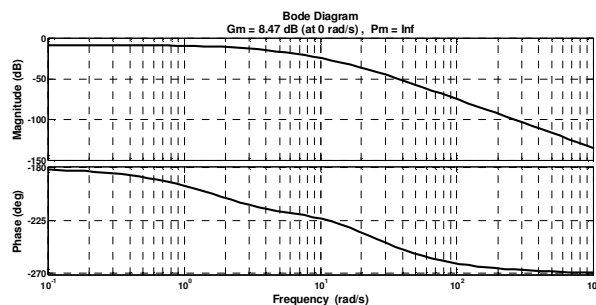
توابع S و T به ترتیب توابع حساسیت و مکمل حساسیت می باشند. سعی می شود که K (کنترل کننده) چنان یافت شود که نرم بی نهایت (۱۱) کمتر از یک گردد. در شکل های ۷ و ۸ به ترتیب مقادیر تکین توابع S و T نشان داده شده است. با توجه به شکل ها مشخص است که دامنه هر کدام از آنها از مقدار ۱ کمتر است. پس هدف، که کمینه سازی توابع (۱۰) به روش  $H_\infty$  است (این کمینه باید کمتر از ۱ باشد)، برآورده شده است.



شکل ۴: بلوک دیاگرام در نظر گرفته شده جهت طراحی  $H_\infty$



شکل ۵: تغییرات دیاگرام بد  $\Delta(s)$



شکل ۶: دیاگرام بد سیستم حلقه باز

تغییرات دیاگرام بد  $\Delta(s)$  به ازای تغییرات ذکر شده، در شکل ۵ آمده است. لازم به ذکر است که تابع تبدیل حلقه باز سیستم (G)، نسبت خروجی (y) به ورودی کنترلی (u) است. با توجه به مطالب ذکر شده، توابع وزنی مورد نظر جهت طراحی کنترل کننده مقاوم، مطابق رابطه زیر در نظر گرفته شده اند.



کنفرانس شبکه های هوشمند ۹۳  
۱۸ و ۱۹ آذرماه ۱۳۹۳  
تهران - پژوهشگاه نیرو



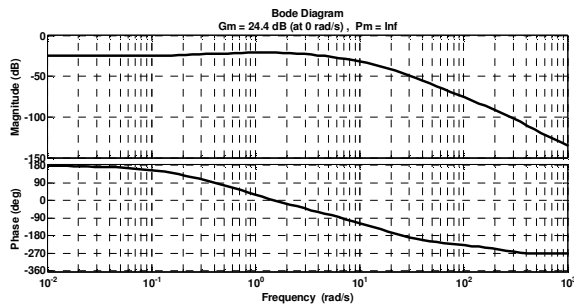
دیاگرام بد سیستم حلقه بسته در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که حد بهره سیستم به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.

در شکل ۱۰ دیاگرام بد کنترل کننده اولیه طراحی شده که مرتبه بالایی دارد، نشان داده شده است. با کاهش مرتبه کنترل کننده و رسم دیاگرام بد کنترل کننده کاهش یافته، بر روی همان شکل ۱۰، مشخص است که به شکل مطلوبی با کنترل کننده اصلی منطبق شده است.

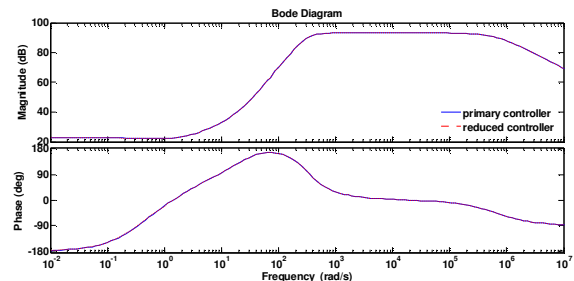
تابع تبدیل کنترل کننده مقاوم مبتنی بر روش  $H_{\infty}$  در بخش پیوست آمده است.

جهت آزمودن مقاوم بودن سیستم حلقه بسته نسبت به تغییرات ممکن، پارامترهای اینرسی ( $H$ )، ضریب میرایی ( $D$ ) و هم چنین ثابت اکتی ( $R$ ) به ترتیب به اندازه  $\pm 15\%$ ،  $\pm 10\%$  و  $\pm 10\%$  از مقدار نامی انحراف داده می شوند. در شکل های ۱۱ و ۱۲ تأثیر این تغییرات بر مقادیر تکین توابع حساسیت و مکمل حساسیت نشان داده شده است.

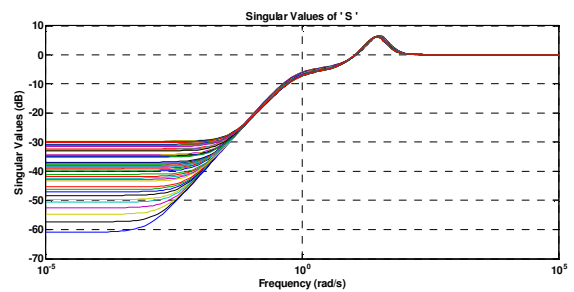
با توجه به شکل مشخص است که با وجود این تغییرات، دامنه مقادیر تکین کمتر از یک بوده و به همین جهت نسبت به تغییرات اعمالی مقاوم بوده است.



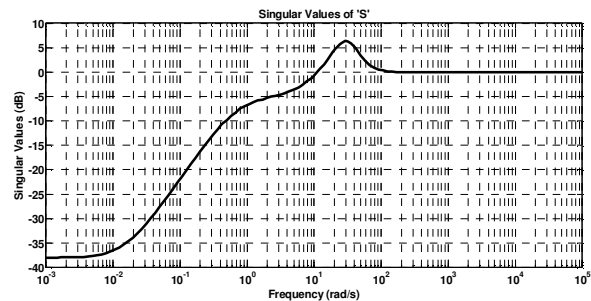
شکل ۹: دیاگرام بد سیستم حلقه بسته



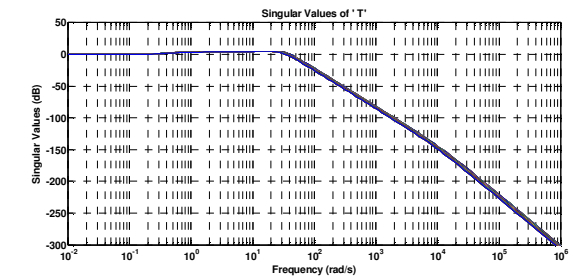
شکل ۱۰: دیاگرام بد کنترل کننده اصلی و کاهش مرتبه یافته



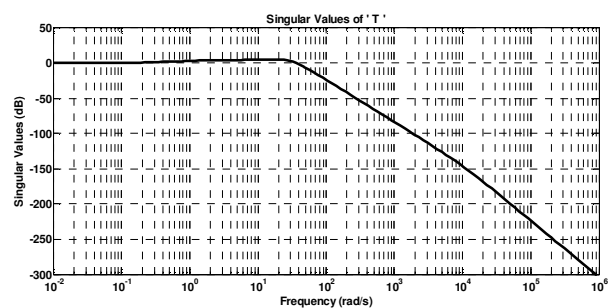
شکل ۱۱: تغییرات مقادیر تکین تابع حساسیت به ازای تغییر پارامترهای سیستم



شکل ۷: مقادیر تکین تابع حساسیت



شکل ۱۲: تغییرات مقادیر تکین تابع مکمل حساسیت به ازای تغییر پارامترهای سیستم



شکل ۸: مقادیر تکین تابع مکمل حساسیت





کنفرانس شبکه های هوشمند ۹۳  
۱۸ و ۱۹ آذرماه ۱۳۹۳  
تهران - پژوهشگاه نیرو

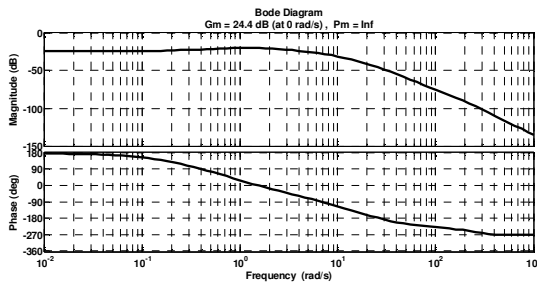


توابع وزنی مطابق روشی که در بخش قبلی ذکر شد، برای روش ترکیبی  $H_2/H_\infty$  نیز در نظر گرفته می‌شود. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به ترتیب دیاگرام بد سیستم حلقه بسته با وجود کنترل‌کننده طراحی‌شده مبتنی بر روش ترکیبی  $H_2/H_\infty$  و همچنین مقادیر تکین تابع حساسیت و مکمل حساسیت نشان داده شده است.

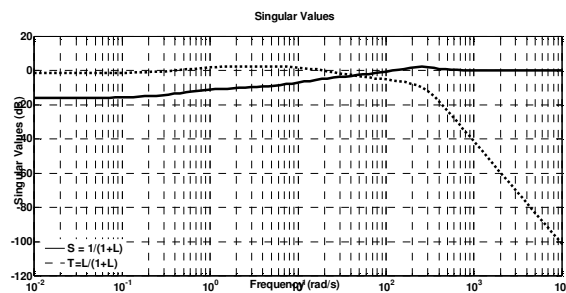
کنترل‌کننده طراحی‌شده، مطابق بخش قبل از مرتبه بالایی برخوردار بوده که از روش‌های کاهش مرتبه استفاده شده است. در شکل ۱۶ دیاگرام بد کنترل‌کننده اصلی و کاهش مرتبه یافته نشان داده شده است که کاملاً بر یکدیگر منطبق‌اند.

همانند بخش قبل، در این قسمت نیز پارامترهای سیستم از مقادیر نامی به اندازه‌هایی که قبلاً اشاره گردید، انحراف داده می‌شود. نحوه تغییرات مقادیر تکین توابع حساسیت و مکمل حساسیت با حضور کنترل‌کننده مقاوم مبتنی بر روش ترکیبی  $H_2/H_\infty$  در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌ها، مشخص است که اندازه مقادیر تکین توابع، در حضور تغییرات پارامترهای سیستم، کمتر از یک بوده و هدف مقاوم‌سازی به انجام رسیده است.

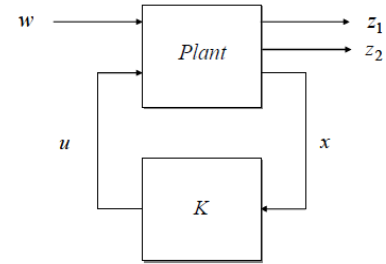
در بخش پیوست، ضرایب کنترل‌کننده مبتنی بر روش ترکیبی  $H_2/H_\infty$  ذکر شده است.



شکل ۱۴: دیاگرام بد سیستم حلقه بسته با وجود کنترل‌کننده  $H_2/H_\infty$



شکل ۱۵: مقادیر تکین تابع حساسیت و مکمل حساسیت ( $H_2/H_\infty$ )



شکل ۱۳: بلوک دیاگرام سیستم کنترلی  $H_2/H_\infty$

### ۵- طراحی کنترل‌کننده مقاوم مبتنی بر روش ترکیبی $H_2/H_\infty$

روش متداول حل مسائل کنترل چندمنظوره، یافتن یک کنترل‌کننده برای همه اهداف طراحی و یکسان در نظر گرفتن ماتریس‌های لیاپانوف به کاررفته برای مشخصه‌های مختلف طراحی است. اگرچه تأمین همه اهداف یک مسئله طراحی مطلوب است، اما طراحی یک کنترل‌کننده چندمنظوره مستلزم برقراری مصالحه میان اهداف رقابتی همچون حذف نویز، تعقیب، تنظیم و محدودیت روی سیگنال‌ها است. از این رو استفاده از یک کنترل‌کننده، محدودکننده و محافظه کارانه است.

کنترل  $H_2/H_\infty$  یک روش کارآمد در کنترل مقاوم است و به طراحی کنترل‌کننده‌ایی می‌پردازد که عملکرد  $H_2$  سیستم را کمینه می‌کند، درحالی‌که عملکرد  $H_\infty$  معینی را تضمین می‌نماید. دیاگرام کلی این روش در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

با توجه به معادله (۱۲) تابع‌های  $T_{z_1 w}$  و همچنین  $T_{z_2 w}$ ، به ترتیب توابع تبدیل از  $w$  به  $z_1$  و  $z_2$  است.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ z_1 = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ z_2 = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \end{cases} \quad (12)$$

استراتژی کنترلی  $H_2/H_\infty$ ، با یافتن مقادیری برای کنترل‌کننده ( $K$ ) آن‌چنان‌که  $\|T_{z_2 w}\|_2$  و همچنین  $\|T_{z_1 w}\|_\infty$  حداقل گردد، به انجام می‌رسد [۹، ۱۱].

که عملکرد و پایداری سیستم در حضور کنترل کننده های مقاوم به شکل مطلوب تری برآورده شده است.

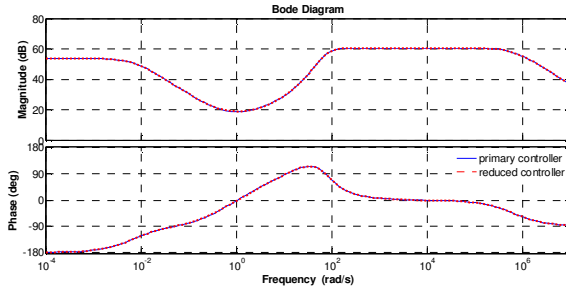
### ۳-۶- عملکرد مقاوم کنترل کننده

در این قسمت، اثر تغییر پارامترهای سیستم بر عملکرد کنترل کننده های مختلف بررسی می شود. پارامترهای سیستم شکل ۲-ب، مطابق جدول ۲ از مقادیر نامی انحراف داده می شود. در این شرایط یک اغتشاش به سیستم اعمال شده و انحرافات فرکانس در شکل ۲۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل، کنترل کننده  $PI$  از پایدار کردن سیستم ناتوان بوده و ناپایداری فرکانسی رخ داده است. کنترل کننده های  $H_{\infty}$  و  $H_2/H_{\infty}$  علاوه بر حفظ پایداری سیستم، عملکرد بسیار مناسبی نیز ارائه داده اند. جهت مقایسه بهتر میان آن ها، یک نمای نزدیک از منحنی انحرافات فرکانسی در شکل ۲۱ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲۱، مشخص است که عملکرد کنترل کننده  $H_2/H_{\infty}$  تا حدی بهتر بوده است.

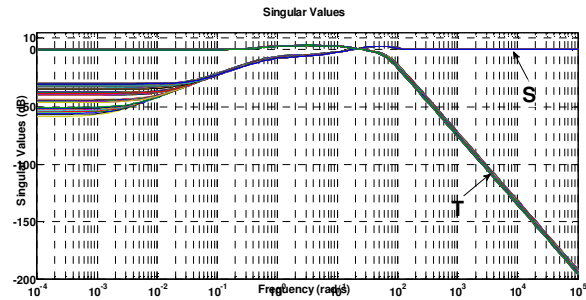
### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا توصیف مختصری از ریزشکبه و دلایل به وجود آمدن آن در سیستم های قدرت مدرن مطرح گردید. سپس با توجه دینامیک سیستم، به ویژگی های آن اشاره و لزوم استفاده از یک کنترل کننده مقاوم مشخص شد.

در ادامه، اقدام به طراحی کنترل کننده های مقاوم مبتنی بر روش های  $H_{\infty}$  و ترکیبی  $H_2/H_{\infty}$  گردید. با انتخاب توابع وزنی مناسب، کنترل کننده های مقاوم طراحی شد و با استفاده از منحنی های مقادیر تکین تابع های حساسیت و مکمل حساسیت، پایداری و عملکرد مقاوم سیستم حلقه بسته، به اثبات رسید. هم چنین با شبیه سازی سیستم در حوزه زمان و اعمال چندین اغتشاش متفاوت، عملکرد کنترل کننده های مقاوم با کنترل کننده کلاسیک انتگرالی-تناسبی مقایسه گردید. کارآیی مطلوب کنترل کننده های مقاوم نسبت به کنترل کننده کلاسیک، از نتایج شبیه سازی به وضوح قابل برداشت است.



شکل ۱۶: دیاگرام بد کنترل کننده  $H_2/H_{\infty}$  و کاهش یافته آن



شکل ۱۷: تغییرات توابع  $S$  و  $T$  بر اثر تغییر پارامترهای سیستم با وجود کنترل کننده  $H_2/H_{\infty}$

### ۶- ارزیابی عملکرد کنترل کننده های مقاوم طراحی شده

جهت ارزیابی عملکرد کنترل کننده های ذکر شده در این مقاله، چندین سناریوی شبیه سازی در نظر گرفته شده است که در ادامه به آن ها اشاره خواهد شد.

#### ۱-۶- تأثیر اغتشاش پله ای در بار

در شکل ۱۸، یک اغتشاش پله ای بار به سیستم اعمال می شود. فرکانس سیستم در حضور کنترل کننده های متفاوت نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۸ مشخص است که، کنترل کننده های مقاوم نسبت به حذف اثر اغتشاش و بازگرداندن سیستم به حالت کار نامی عملکرد بهتری را به نمایش گذاشته اند.

#### ۲-۶- تأثیر چندین اغتشاش پله ای بار

در شکل ۱۹، چندین اغتشاش پله ای به سیستم اعمال شده و فرکانس سیستم در حضور کنترل کننده های متفاوت نشان داده شده است. در حضور این اغتشاشات نیز قابل مشاهده است

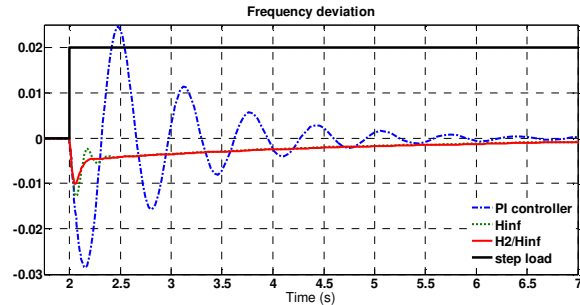


کنفرانس شبکه های هوشمند ۹۳  
۱۸ و ۱۹ آذرماه ۱۳۹۳  
تهران - پژوهشگاه نیرو



جدول ۲: تغییرات پارامترهای سیستم

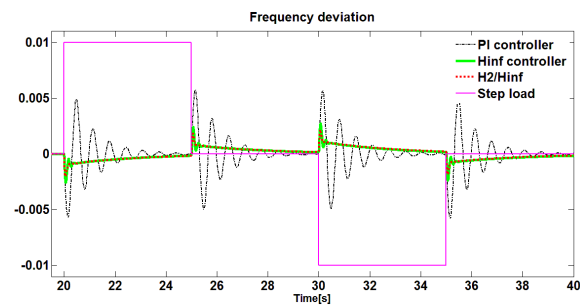
پارامتر	میزان تغییرات	پارامتر	میزان تغییرات
R	+30%	$T_g$	+50%
D	-40%	$T_{FESS}$	-45%
H	+50%	$T_{BESS}$	+55%
$T_t$	-50%		



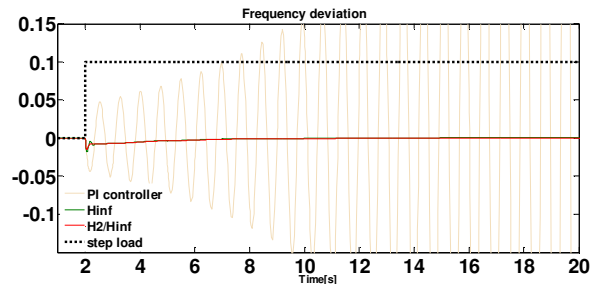
شکل ۱۸: انحراف فرکانس سیستم در حضور کنترل کننده های مختلف

۸- مراجع

- [۱] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Soder, "Distributed Generation: a definition," *International Journal of Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [۲] P. Barker and R. De Mello, "Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems," presented at the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, WA, USA, 2001.
- [۳] H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, and Y. Mitani, "Intelligent Frequency Control in an AC Microgrid: Online PSO-Based Fuzzy Tuning Approach," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 1935-1944, 2012.
- [۴] R. H. Lasseter, J. H. Eto, B. Schenkman, J. Stevens, H. Vollkommer, D. Klapp, E. Linton, H. Hurtado, and J. Roy, "CERTS Microgrid Laboratory Test Bed," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, pp. 325-332, Jan.2011.
- [۵] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining control strategies for MicroGrids islanded operation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 916-9, ۲۴May.2006.
- [۶] L. W. Dong-Jing Lee, "Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I: Time-Domain Simulations," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 23(1), pp. 312-315, MARCH 2008.
- [۷] V. U. B. U. A. Bakshi, *Linear Control Systems*: Technical Publications, 2007.
- [۸] D. Xue, Y. Q. Chen, and D. P. Atherton, *Linear Feedback Control: Analysis and Design with*

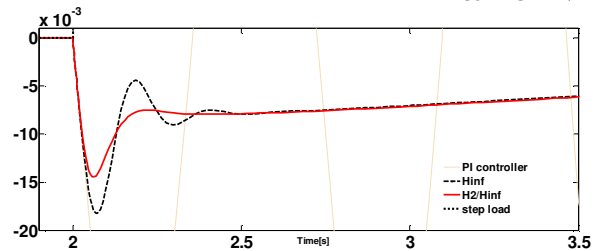


شکل ۱۹: انحراف فرکانس سیستم در حضور کنترل کننده های مختلف



شکل ۲۰: عملکرد کنترل کننده های مختلف در حضور تغییر پارامترهای

سیستم مطابق جدول ۲



شکل ۲۱: نمای نزدیک از شکل ۲۰ به جهت مقایسه بهتر



کنفرانس شبکه های هوشمند ۹۳  
۱۸ و ۱۹ آذرماه ۱۳۹۳  
تهران - پژوهشگاه نیرو



۹- پانوش

- 1- Distributed Generation (DG)
- 2- Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS)
- 3- Microgrid (MG)
- 4- Point of common coupling (PCC)
- 5- Microsource Controller (MC)
- 6- Load Controller (LC)
- 7- Microgrid Central Controller (MGCC)
- 8- Diesel Energy Generator (DEG)
- 9- Photovoltaic (PV)
- 10- Wind Turbine Generator (WTG)
- 11- Fuel Cell (FC)
- 12- Battery Energy Storage System (BESS)
- 13- Flywheel Energy Storage System (FESS)
- 14- Bode diagram

*MATLAB*: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.

[۹] K. Zhou and J. C. Doyle, *Essentials of Robust Control*: Prentice Hall, 1998.

[۱۰] J. M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*: Addison-Wesley, 1989.

[۱۱] D. W. Gu, P. H. Petkov, and M. M. Konstantinov, *Robust Control Design with MATLAB®*: Springer, 2006.

[۱۲] F. Habibi, A. H. Naghshbandy, and H. Bevrani, "Robust voltage controller design for an isolated Microgrid using Kharitonov's theorem and D-stability concept," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, pp. 656-665, 2013.

۱۰- پیوست

تابع تبدیل کنترل کننده های مقاوم مبتنی بر روش  $H_\infty$  و روش ترکیبی  $H_2 / H_\infty$  در روابط زیر لیست شده است.

$$K_{H_\infty} = \frac{3.488e06s^5 + 1.077e08s^4 + 8.679e08s^3 + 1.855e09s^2 + 7.857e08s + 6.159e07}{s^6 + 1.009e04s^5 + 8.707e05s^4 + 3.538e07s^3 + 1.888e08s^2 + 1.586e07s - 2.947e05} \quad (۱۳)$$

$$K_{H_2/H_\infty} = \frac{6.941e08s^6 + 5.361e10s^5 + 1.319e12s^4 + 1.346e13s^3 + 5.91e13s^2 + 9.816e13s + 3.147e13}{s^7 + 6.395e05s^6 + 1.166e08s^5 + 9.94e09s^4 + 3.503e11s^3 + 3.253e12s^2 + 9.616e12s - 6.412e10} \quad (۱۴)$$

## کواهی ارائه مقاله

بدین وسیله کواهی می نماید مقاله باکد ۳۱۰۴ تحت عنوان:

طراحی کنترل کننده مقاوم فرکانس برای یک ریزشبکه جزیره ایی بر اساس  
روش های Hinf و روش ترکیبی H2/Hinf

توسط

فرشید حبیبی

در کنفرانس شبکه هوشمند ۹۳ (۱۸ و ۱۹ آذرماه ۱۳۹۳، پژوهشگاه نیرو)

بصورت شفاهی ارائه گردیده است.

محمد حسین عبادانی  
دبیر اجرایی کنفرانس شبکه هوشمند ۹۳