

طراحی کنترل کننده مقاوم ترکیبی H_2/H_∞ و استفاده همزمان اینرسی مجازی به منظور بهبود پایداری ریزشبکه‌ها

محمد نیازی^۱، کارشناس ارشد؛ شهرام کریمی^۲، استادیار؛ صبحی بنی‌اردلانی^۳، استادیار

۱- گروه برق - دانشکده فنی و مهندسی - واحد کرمانشاه - دانشگاه آزاد اسلامی - کرمانشاه - ایران - m.niyazi_en@yahoo.com

۲- گروه برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه رازی - کرمانشاه - ایران - shahramkarimi@razi.ac.ir

۳- گروه برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - s.baniardalani@kut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، به منظور بهبود پایداری یک ریزشبکه در حالت جزیره‌ای که شامل دو واحد تولید پراکنده بادی و گازی است، استفاده همزمان از اینرسی مجازی و کنترل کننده مقاوم پیشنهاد شده است. به دلیل وجود توربین بادی سرعت متغیر و استفاده از ژنراتور القایی دوسوتغذیه، اینرسی سیستم و در نتیجه پایداری دینامیکی تضعیف می‌گردد. پیاده‌سازی و بهره‌گیری از اینرسی مجازی در ژنراتور القایی دوسوتغذیه، موجب بهبود پایداری سیستم قدرت می‌گردد. با این وجود، عدم قطعیت و نامعینی برخی پارامترهای کنترلی، چالشی است که باید هنگام استفاده از اینرسی مجازی مدنظر قرار گیرد. در این مقاله، ضمن تشریح نحوه پیاده‌سازی اینرسی مجازی در سیستم کنترل ژنراتور القایی دوسو تغذیه، تأثیر عدم قطعیت و نامعینی پارامترهای کنترلی بر عملکرد سیستم کنترل فرکانس بررسی شده است. به منظور بهبود عملکرد دینامیکی و ماندگار سیستم کنترل فرکانس، با بهره‌گیری از تأثیر اینرسی مجازی، کنترل کننده مقاوم ترکیبی H_2/H_∞ برای واحد تولید پراکنده گازی پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نشان می‌دهد که کنترل کننده ترکیبی پیشنهادی، پایداری سیستم را در شرایط عدم قطعیت و نامعینی پارامترهای کنترلی تضمین می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اینرسی مجازی، DFIG، نامعینی، ریزشبکه‌ها، کنترل کننده مقاوم، H_2/H_∞ ، پایداری.

Mixed H_2/H_∞ Robust Controller Design and Simultaneous use of Virtual Inertia for Stability Improvement of Micro-grids

M. Niyazi¹, MSc; S. Karimi², Assistant Professor; S. Baniardalani³, Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Collage of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, Email: m.niyazi_en@yahoo.com

2- Department of Electrical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, Email: shahramkarimi@razi.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: s.baniardalani@kut.ac.ir

Abstract: In this paper, to improve the stability of a micro-grid in islanding mode, that contains two wind and gas DG units, simultaneous use of virtual inertia and robust controller is proposed. The use of the variable speed wind turbine and the Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) reduces the system inertia and thereby decreases the dynamic stability. Implementation of virtual inertia in DFIG improves the power system stability. However, the change or uncertainty of the system parameters is a major challenge that must be considered when using the virtual inertia. In this paper, the implementation of virtual inertia in DFIG control system is described in detail and the impact of uncertainty and change of the control system parameters over performance of the frequency control system is investigated. In order to improve the dynamic and the steady state performance of the frequency control system, benefiting from the impact of virtual inertia, the mixed H_2/H_∞ robust controller is proposed. The simulation results using MATLAB show that the proposed hybrid controller guarantees the system stability in conditions of uncertainty and change of the control system parameters.

Keywords: Virtual inertia, DFIG, uncertainties, micro-grids, robust controllers, H_2/H_∞ , stability.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۱

نام نویسنده مسئول: شهرام کریمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمانشاه - باغ ابریشم - دانشگاه رازی - دانشکده فنی و مهندسی.

۱- مقدمه

کوتاه مدت فرکانس را به عهده دارند. هر چند که تجهیزات ذخیره ساز انرژی، مانند باتری ها، باعث بهبود عملکرد دینامیکی سیستم کنترل بار - فرکانس می شوند، این تجهیزات، به همراه اینورتر مربوط به آن ها، باعث افزایش هزینه های سیستم می گردند.

در [۸-۱۱] با پیاده سازی اینرسی مجازی^۱ در ژنراتور القایی دوسوتغذیه، رفتار دینامیکی ریزشکها بهبود یافته است. در [۸] و [۹] از ابرخانن، به عنوان منبع اینرسی مجازی، استفاده شده است. این روش نیز، به دلیل به کارگیری تجهیزات اضافی، هزینه بر می باشد. در [۱۰] و [۱۱] از اینرسی جرم دوار توربوژنراتور بادی جهت پیاده سازی اینرسی مجازی استفاده شده است. با وجود این که پیاده سازی اینرسی مجازی با استفاده از جرم دوار نیاز به تجهیزات و هزینه اضافی ندارد، به کارگیری آن با محدودیت هایی همراه است. در این روش، مقدار اینرسی مجازی وابسته به سرعت روتور ژنراتور القایی دوسوتغذیه در لحظه تغییر فرکانس می باشد. از آنجایی که سرعت روتور تابعی از سرعت باد است، به دلیل متغیر و غیرقابل پیش بینی بودن سرعت باد، میزان تأثیر این روش در کاهش تغییرات کوتاه مدت فرکانس، متغیر خواهد بود. در سرعت های بسیار کم و بسیار زیاد باد، به دلیل عدم چرخش توربین بادی، استفاده از این روش امکان پذیر نیست. دیگر محدودیت به کارگیری اینرسی مجازی با استفاده از جرم دوار، محدودیت حرارتی است. در سرعت های زیاد باد، در صورت بروز اغتشاش در فرکانس سیستم، تولید توان اضافی توسط ژنراتور، به واسطه عملکرد حلقه کنترلی مربوط به اینرسی مجازی، باعث افزایش درجه حرارت ژنراتور می گردد که ممکن است بیش از حد مجاز باشد [۱۱].

نکته بسیار مهمی که باید در بررسی و ارزیابی عملکرد سیستم کنترل بار-فرکانس، با مشارکت اینرسی مجازی، در نظر گرفته شود، نامعینی و عدم قطعیت^۲ پارامترهای سیستم است. در این ارتباط می توان به عدم قطعیت ضریب افتی سیستم تنظیم سرعت، متغیر و غیرقابل پیش بینی بودن سرعت باد و عدم قطعیت و متغیر بودن اینرسی سیستم اشاره نمود. چشم پوشی از عدم قطعیت پارامترهای مختلف موجود در مدل سیستم، ممکن است نتایج گمراه کننده ای به دنبال داشته باشد به طوری که اهداف مورد نظر در کنترل سیستم در عمل تحقق نیابد و رفتار دینامیکی و حتی استاتیکی سیستم مطابق انتظار نباشد [۱۲].

هر چند تأثیر عدم قطعیت و نامعینی پارامترها در عملکرد سیستم کنترل بار-فرکانس متداول، در مقاله های علمی متعدد مورد ارزیابی قرار گرفته و راهکارهای کنترلی متفاوتی مانند کنترل بهینه [۱۳]، کنترل مد لغزشی [۱۴]، کنترل هوشمند [۱۵] و کنترل مقاوم [۱۶] به منظور بهبود عملکرد سیستم با وجود عدم قطعیت ها ارائه شده است، ولی تاکنون تحقیقی، با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها، وقتی که اینرسی مجازی در کنترل بار-فرکانس مشارکت داده می شود، گزارش نشده است.

امروزه منابع انرژی تجدیدپذیر نقش بسیار مهمی در تأمین انرژی الکتریکی دارند. از مهم ترین منابع انرژی تجدیدپذیر می توان به انرژی باد اشاره کرد. با توجه به متغیر بودن سرعت باد و تأثیر آن بر توان خروجی توربین های بادی، از روش های مختلفی برای دریافت حداکثر توان استفاده می شود که می توان به استفاده از ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG^۱) اشاره کرد [۱]. به دلیل متغیر بودن سرعت باد و طبیعت اتفاقی آن، از توربوژنراتورهای بادی نمی توان به منظور کنترل فرکانس در ریزشکها استفاده نمود. به اصطلاح این نوع منابع تولید پراکنده، از دیدگاه کنترل توان و فرکانس، غیرقابل کنترل^۲ می باشند؛ بنابراین برای کنترل فرکانس در ریزشکها، به ویژه در شرایط جزیره ای، از منابع تولید پراکنده قابل کنترل مانند توربوژنراتورهای گازی یا دیزلی استفاده می شود [۲]. در این نوع توربوژنراتورها، کنترل فرکانس به عهده سیستم تنظیم سرعت^۳ است. تنها پارامتر قابل تنظیم در سیستم کنترل بار - فرکانس^۴ متداول، پارامتر موسوم به ضریب افتی^۵، مربوط به سیستم تنظیم سرعت می باشد. مقادیر کوچک این ضریب، موجب کاهش انحراف فرکانس نسبت به مقدار نامی در حالت ماندگار و در نتیجه بهبود پاسخ ماندگار سیستم کنترل بار - فرکانس می شود. با این وجود، مقادیر کوچک ضریب افتی، باعث افزایش تغییرات فرکانس در زمان گذرا شده و حتی ممکن است در صورت بروز حالت جزیره ای یا تغییرات عمده در بار، باعث ناپایداری سیستم گردد [۳].

ژنراتورهای سنکرون متصل به شبکه، به دلیل اینرسی قابل ملاحظه ای که دارند، موجب کاهش تغییرات کوتاه مدت فرکانس و در نتیجه افزایش پایداری دینامیکی شبکه می شوند. ژنراتورهای سنکرون به طور طبیعی به تغییر فرکانس سیستم پاسخ می دهند به طوری که در اثر کاهش فرکانس شبکه، برای مدت کوتاهی توان خروجی ژنراتور در اثر آزاد شدن انرژی جنبشی افزایش می یابد. این افزایش کوتاه مدت توان تا حدی نیاز شبکه را جبران کرده و مانع از افت شدید و ناگهانی فرکانس می شود؛ اما در ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه، به واسطه حضور ادوات الکترونیک قدرت، سرعت چرخش توربین بادی تابعی از فرکانس شبکه نبوده، در نتیجه تغییرات فرکانس شبکه توسط روتور ژنراتور دیده نمی شود. بدین ترتیب با افزایش استفاده از ژنراتورهای سرعت متغیر متصل به توربین های بادی و دیگر منابع تولید پراکنده غیرقابل کنترل، اینرسی ظاهری سیستم قدرت، به دلیل کاهش استفاده از ژنراتورهای سنکرون، کاهش می یابد.

تحقیقات گسترده ای به منظور بهبود پایداری دینامیکی ریزشکها^۶ در شرایط جزیره ای و همچنین شرایط متصل به شبکه سراسری انجام شده است [۴]. در [۷-۵] برای کاهش تغییرات کوتاه مدت فرکانس و بهبود پایداری دینامیکی ریزشکها، استفاده از ذخیره سازهای انرژی پیشنهاد شده است. در این صورت منابع تولید پراکنده قابل کنترل، فرکانس ریزشکها را در حالت ماندگار تنظیم و کنترل می کنند و ذخیره سازهای انرژی وظیفه کاهش تغییرات

اینرسی خود را آزاد کرده و انرژی حاصل از آن را در شبکه به اشتراک بگذارند.

توان مکانیکی حداکثر (بهینه) توربین بادی، $P_{m,opt}$ را می‌توان به صورت زیر به عنوان تابعی درجه سه از سرعت مکانیکی شفت توربین بادی، w_m ، بیان کرد:

$$P_{m,opt} = K_{opt} \omega_m^3 \quad (1)$$

در این رابطه K_{opt} ضریبی است که مقدار آن تابع زاویه پره‌های توربین بادی می‌باشد. بنابراین در صورت ثابت بودن زاویه پره‌های توربین، ضریب K_{opt} را می‌توان ثابت فرض نمود. مبدل سمت روتور به گونه‌ای کنترل می‌شود تا توان الکتریکی خروجی، مقدار $P_{m,opt}$ را ردیابی و دنبال نماید. چنانچه کنترل کننده مبدل سمت روتور به اندازه کافی سریع باشد، توان الکتریکی خروجی را می‌توان برابر توان مکانیکی بهینه در نظر گرفت.

از طرفی دیگر، در یک توربوژنراتور، توان مکانیکی ورودی، P_m ، و توان الکتریکی خروجی، P_e ، مطابق رابطه (۲) به یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$P_m - P_e = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega_m^2 \right) = J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2)$$

در رابطه فوق J مقدار اینرسی جرم دوار^۳ متصل به شفت توربوژنراتور است. در ژنراتورهای سنکرون، به منظور کنترل فرکانس، توان مکانیکی ورودی توسط تنظیم کننده سرعت کنترل می‌گردد و در نتیجه تغییر سرعت مکانیکی شفت توربوژنراتور، w_m ، که تعیین کننده فرکانس سیستم است، مستقیماً در مقدار توان الکتریکی خروجی مشارکت دارد. در ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه، برخلاف ژنراتورهای سنکرون، توان الکتریکی خروجی به طور مستقیم کنترل می‌گردد، بنابراین تغییر فرکانس سیستم و اینرسی جرم دوار تأثیری بر مقدار توان الکتریکی خروجی ندارد.

رابطه (۲) را می‌توان بر حسب پیرونیته به شکل زیر بیان نمود:

$$P_m - P_e = 2H \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3)$$

در این رابطه H ثابت اینرسی توربوژنراتور بادی و واحد آن ثانیه و P_e برابر $P_{m,opt}$ می‌باشد. از طرفی دیگر مقدار P_m غیرقابل کنترل بوده و تابعی از سرعت باد است. بنابراین در رابطه (۳)، w_m متغیری است که تابع سرعت باد و مستقل از فرکانس سیستم خواهد بود.

مدل دقیق و کامل توربوژنراتور بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسوتغذیه، شامل پانزده مقدار ویژه می‌باشد به طوری که یکی از این مقادیر ویژه بسیار کوچک‌تر از بقیه آن‌هاست [۳]. بنابراین می‌توان توربوژنراتور بادی را با یک سیستم مرتبه اول تقریب زد. تحلیل حساسیت و ضریب مشارکت نشان می‌دهد که مقادیر H و w_m بر قطب غالب تأثیر قابل توجهی دارند [۳].

در مرجع [۱۷] برای بهبود حلقه کنترل فرکانس ثانویه، با در نظر گرفتن برخی اختلالات و عدم قطعیت پارامترهای سیستم، از کنترل کننده‌های مقاوم از جمله H_∞ و سنتز μ استفاده شده است. در مرجع [۱۸] کنترل کننده مقاوم H_∞ برای کنترل حلقه بار-فرکانس در یک سیستم دو ناحیه‌ای، با در نظر گرفتن اغتشاشات سیستم به عنوان نامعینی، پیشنهاد شده است.

از دیگر روش‌هایی که برای بهبود پایداری فرکانس سیستم پیشنهاد شده است می‌توان به استفاده از حلقه امیدانس مجازی [۱۹] و کنترل فرکانس با در نظر گرفتن نامعادلات خطی سیستم و نیز ذخیره انرژی به صورت همزمان [۲۰] اشاره نمود.

در مقاله حاضر، استفاده همزمان از اینرسی مجازی و کنترل مقاوم در ریزشبه‌ها پیشنهاد می‌گردد. اینرسی مجازی و کنترل مقاوم، در این مقاله، به ترتیب به سیستم کنترل یک ژنراتور القایی دوسوتغذیه و سیستم کنترل فرکانس یک توربوژنراتور گازی اضافه می‌گردند.

در بخش ۲ نحوه پیاده‌سازی اینرسی مجازی در ژنراتور القایی دوسوتغذیه تشریح شده است. در بخش ۳، ضمن معرفی ریزشبه مورد مطالعه، نشان داده شده است که عدم قطعیت ضریب افتی سیستم تنظیم سرعت توربوژنراتور گازی و مقدار اینرسی مجازی، حاصل از جرم دوار مولد بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسوتغذیه، بر عملکرد سیستم کنترل بار-فرکانس ریزشبه تأثیر بسزایی دارد و حتی ممکن است باعث ناپایداری سیستم گردد.

به منظور بهبود عملکرد سیستم کنترل بار-فرکانس، به ویژه بهبود پایداری دینامیکی ریزشبه، در این مقاله، ضمن استفاده از اینرسی مجازی، یک کنترل کننده مقاوم^۴ ترکیبی H_2/H_∞ ، در سیستم کنترل فرکانس به کار گرفته شده است. جزئیات طراحی کنترل کننده مقاوم ترکیبی در بخش ۴ ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی (بخش ۵) نشان می‌دهد که استفاده همزمان اینرسی مجازی و کنترل کننده مقاوم ترکیبی H_2/H_∞ ، پایداری دینامیکی ریزشبه را بهبود بخشیده و در شرایط عدم قطعیت پارامترهای کنترلی، پایداری سیستم را تأمین می‌نماید.

۲- پیاده‌سازی اینرسی مجازی در ژنراتور القایی دوسوتغذیه

در ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه، استاتور به طور مستقیم و روتور از طریق دو مبدل پشت‌به‌پشت به شبکه متصل می‌شوند. مبدل سمت روتور ($RSC^{(1)}$) به گونه‌ای کنترل می‌شود تا ضمن تنظیم ولتاژ استاتور، در سرعت‌های مختلف باد، حداکثر توان دریافت گردد. مبدل سمت شبکه ($GSC^{(1)}$) نیز وظیفه تنظیم ولتاژ DC خازن بین دو مبدل را بر عهده دارد. مشابه ژنراتورهای سنکرون، توربین‌های بادی نیز دارای مقدار قابل توجهی انرژی جنبشی ذخیره شده در جرم چرخان خود می‌باشند. اما توربین‌های بادی سرعت متغیر به علت جداسازی فرکانس شبکه از سرعت توربین، به واسطه کنترل سرعت توربین برای ردیابی نقطه حداکثر توان ($MPPT^{(2)}$) در سرعت‌های مختلف باد، نمی‌توانند

مقدار $H_V(s)$ صفر شده و در نتیجه توربوژنراتور بادی بدون اینرسی مجازی کار خواهد کرد. با پیاده‌سازی اینرسی مجازی در سیستم کنترل ژنراتور القایی دوستغذیه، توان الکتریکی خروجی ژنراتور، در فرکانس‌های پایین، به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P_e = P_{m,opt} - M_V \omega_{m0} \frac{d\omega}{dt} \quad (11)$$

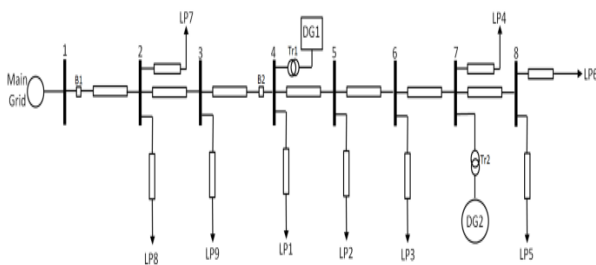
۳- ریزشبه مورد مطالعه

ریزشبه مورد مطالعه در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است. این ریزشبه شامل دو واحد تولید پراکنده می‌باشد. واحد ۱ یک توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوستغذیه با ظرفیت ۲/۵ MVA و واحد ۲ یک توربوژنراتور گازی با ظرفیت ۲/۵ MVA است که مجهز به سیستم کنترل فرکانس می‌باشد. مشخصات بارها و خطوط در مرجع [۳] ارائه شده است. پس از قطع کلید B2 ریزشبه از شبکه اصلی جدا شده و به صورت جزیره‌ای عمل می‌نماید. بلوک دیاگرام ریزشبه مورد مطالعه، وقتی که به صورت جزیره‌ای کار می‌کند، در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، توابع تبدیل $G_1(s)$ و $G_2(s)$ به ترتیب برابر قسمت اول و قسمت دوم رابطه (۱۰) می‌باشند. مقادیر پارامترهای به کاررفته در بلوک دیاگرام در جدول ۱ پیوست ارائه گردیده است.

در سیستم مورد مطالعه، وظیفه کنترل فرکانس بر عهده توربوژنراتور گازی می‌باشد. از آنجایی که توان تولیدی توسط توربین بادی به علت متغیر بودن سرعت باد، متغیر می‌باشد، در حالت جزیره‌ای تغییر فرکانس سیستم اجتناب‌ناپذیر است. لذا عملکرد مناسب سیستم کنترل فرکانس که معمولاً از نوع کنترل افتی^{۱۴} می‌باشد، با وجود توربین باد با سرعت متغیر اهمیت ویژه‌ای دارد.

رابطه (۱۲) که به عنوان معادله افتی^{۱۵} شناخته می‌شود رابطه تغییر فرکانس در اثر تغییر توان در حالت ماندگار را نشان می‌دهد.

$$\omega - \omega_0 = -K_p (P - P_0) \quad (12)$$



شکل ۱: ریزشبه مورد مطالعه [۳]

همان‌طور که ملاحظه می‌شود انتخاب مقدار کوچک‌تر K_p موجب تنظیم بهتر فرکانس در حالت ماندگار خواهد شد. با این وجود کوچک‌تر شدن K_p ، پایداری دینامیکی سیستم را تضعیف می‌نماید. شکل ۳ مکان هندسی ریشه‌های سیستم در اثر تغییر مقدار پارامتر K_p بدون حضور اینرسی مجازی را نشان می‌دهد. در ریزشبه مورد مطالعه، مرز

با خطی سازی رابطه (۳) حول نقطه کار w_{m0} رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = 2H \omega_{m0} \frac{d\Delta\omega_m}{dt} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، ΔP_e ، به صورت معادله زیر بیان می‌گردد:

$$\Delta P_e = 3K_{opt} \omega_{m0}^2 \Delta\omega_m \quad (5)$$

برای پیاده‌سازی اینرسی مجازی، کنترل توان الکتریکی خروجی طوری تغییر داده می‌شود تا علاوه بر ردیابی نقطه حداکثر توان، به تغییرات فرکانس سیستم نیز پاسخ دهد. بدین منظور رابطه (۵) به شکل زیر اصلاح می‌گردد [۳]:

$$\Delta P_e = 3K_{opt} \omega_{m0}^2 \Delta\omega_m - H_V(s) \omega_{m0} \Delta\omega \quad (6)$$

در رابطه (۶)، ω فرکانس زاویه‌ای سیستم و $H_V(s)$ تابع تبدیل اینرسی مجازی است. از آنجایی که تابع اینرسی به صورت یک مشتق گیر بر روی فرکانس سیستم عمل می‌نماید، تابع $H_V(s)$ به شکل زیر پیاده‌سازی می‌شود [۳]:

$$H_V(s) = \frac{M_V s}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (7)$$

در تابع تبدیل فوق، M_V ثابت اینرسی مجازی و τ_1 و τ_2 ثابت زمانی‌های اینرسی مجازی هستند. علت استفاده از این تابع تبدیل، برای پیاده‌سازی اینرسی مجازی، عملکرد آن در فرکانس‌های پایین به عنوان یک مشتق گیر می‌باشد.

با جایگزینی رابطه (۶) در رابطه (۴) می‌توان نوشت:

$$\Delta P_m = 3K_{opt} \omega_{m0}^2 \Delta\omega_m - H_V(s) \omega_{m0} \Delta\omega + 2H \omega_{m0} s \Delta\omega_m \quad (8)$$

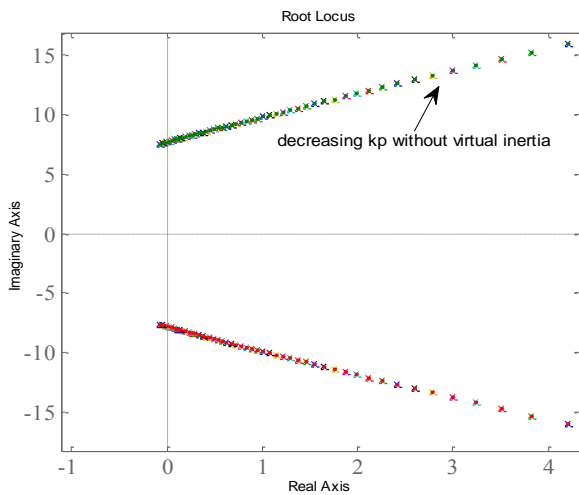
با استفاده از رابطه فوق، $\Delta\omega_m$ طبق معادله زیر به دست می‌آید:

$$\Delta\omega_m = \frac{1}{2H \omega_{m0} s + 3K_{opt} \omega_{m0}^2} \Delta P_m + \frac{H_V(s) \omega_{m0}}{2H \omega_{m0} s + 3K_{opt} \omega_{m0}^2} \Delta\omega \quad (9)$$

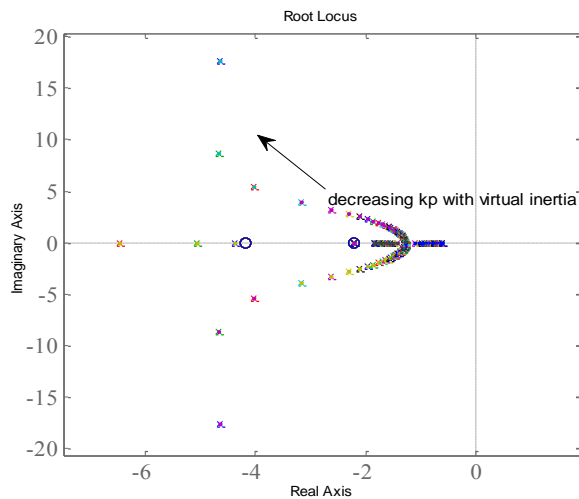
با جایگزینی رابطه (۹) در رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$\Delta P_e = \frac{3K_{opt} \omega_{m0}}{2Hs + 3K_{opt} \omega_{m0}} \Delta P_m - \frac{2HH_V(s) \omega_{m0} s}{2Hs + 3K_{opt} \omega_{m0}} \Delta\omega \quad (10)$$

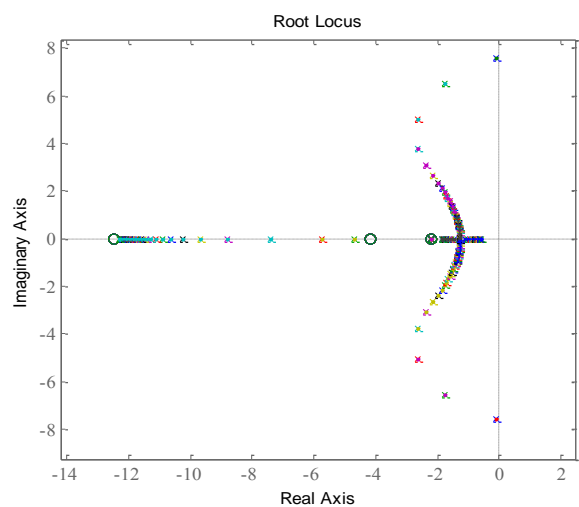
همان‌طور که از روابط (۹) و (۱۰) ملاحظه می‌شود، اینرسی مجازی زمانی باعث تغییر سرعت مکانیکی و توان الکتریکی خروجی می‌شود که تغییری در فرکانس سیستم ایجاد شده و در آن زمان سرعت مکانیکی، w_{m0} ، صفر نباشد. با انتخاب مقدار M_V برابر صفر،



شکل ۳: مکان هندسی ریشه‌های سیستم مورد مطالعه بدون وجود اینرسی مجازی تحت تأثیر K_p

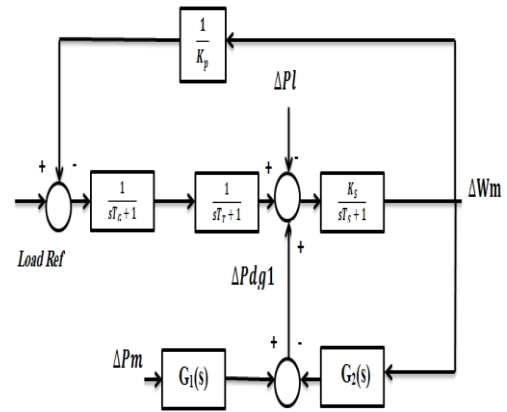


شکل ۴: مکان هندسی ریشه‌های سیستم مورد مطالعه با وجود اینرسی مجازی تحت تأثیر K_p



شکل ۵: مکان هندسی ریشه‌های سیستم مورد مطالعه تحت تأثیر M_v

ناپایداری در مقدار K_p برابر ۱۰۷ می‌باشد و مقادیر کوچک‌تر از آن باعث ناپایداری ریز شبکه می‌گردد. شکل ۴ تأثیر اضافه شدن اینرسی مجازی روی مکان هندسی ریشه‌های سیستم را نشان می‌دهد. در این حالت M_v برابر با ۵۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: بلوک دیاگرام ریز شبکه مورد مطالعه [۳]

شکل ۴ نشان می‌دهد که اضافه شدن اینرسی مجازی موجب بهبود پایداری ریز شبکه مورد مطالعه می‌گردد طوری که سیستم حتی با مقدار بسیار کوچک K_p برابر یک پایدار باقی می‌ماند. در شکل ۵ مکان هندسی ریشه‌های سیستم با توجه به تغییر M_v ارائه گردیده است. در این حالت مقدار K_p برابر با ۱۱۴ ثابت فرض شده است. برای مشاهده اثر اینرسی مجازی بر روی مکان هندسی ریشه‌ها، M_v بین ۰ تا ۵۰ ثانیه تغییر داده شده است. همان طوری که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، با افزایش مقدار M_v پایداری سیستم بهبود می‌یابد.

در شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات فرکانس سیستم به‌ازای مقادیر مختلف K_p و M_v و تغییر پله‌ای بار در زمان ۰/۲ ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده می‌شود، افزایش M_v موجب بهبود پایداری دینامیکی سیستم می‌گردد. با این وجود، افزایش M_v تأثیری بر مقدار افت فرکانس در حالت ماندگار ندارد. شکل ۷ حالتی را نشان می‌دهد که مقدار M_v ثابت و برابر ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در این حالت مشاهده می‌شود که کاهش مقدار K_p ، افت فرکانس در حالت ماندگار را کاهش می‌دهد. هرچند که کاهش مقدار K_p و افزایش مقدار M_v موجب بهبود پایداری دینامیکی و تنظیم فرکانس سیستم می‌شود، با این وجود به‌کارگیری اینرسی مجازی می‌تواند محدودیت‌هایی به‌همراه داشته باشد. در سرعت‌های بسیار کم و بسیار زیاد باد، به‌دلیل عدم چرخش توربین بادی، استفاده از اینرسی مجازی مطابق رابطه (۱۰) امکان‌پذیر نیست.

نامعینی‌ها می‌توان به عدم قطعیت در پارامترهای ورودی سیستم و یا پارامتری موجود در خود سیستم اشاره کرد.

در ریزشکبه مورد مطالعه به دلیل نامعین بودن پارامترهای M_v و K_p ، سیستم کنترل بار-فرکانس کلاسیک شامل حلقه کنترلی انتگرال گیر، نمی‌تواند همواره عملکرد مناسبی داشته باشد.

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد کاهش مقدار K_p باعث کاهش تغییر فرکانس در حالت ماندگار می‌گردد ولی موجب کاهش پایداری دینامیکی سیستم خواهد شد. از طرفی به دلیل محدودیت‌های حرارتی، نمی‌توان M_v را تا حد زیادی افزایش داد. به‌منظور بهبود پایداری دینامیکی و کاهش تغییرات فرکانس در حالت ماندگار و همچنین عملکرد مناسب سیستم کنترل فرکانس در صورت تغییر پارامترهای M_v و K_p ، در این مقاله کنترل کننده مقاوم ترکیبی H_2/H_∞ پیشنهاد شده است.

از کنترل کننده مقاوم ترکیبی H_2/H_∞ در مراجع [۲۱-۲۳] برای کنترل حلقه بار-فرکانس استفاده شده است. این کنترل کننده، یک کنترل کننده ترکیبی چندهدفه می‌باشد که برای اطمینان از پایداری و عملکرد سیستم حلقه بسته در مواجهه با دینامیک‌های مدل نشده فرکانس بالا، مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترل کننده مقاوم ترکیبی H_2/H_∞ می‌تواند هم عملکرد مقاوم و انعطاف‌پذیر H_∞ و هم عملکرد بهینه H_2 را در حوزه فرکانس داشته باشد. در واقع، کنترل کننده مقاوم ترکیبی H_2/H_∞ راه‌حل مناسب‌تری نسبت به کنترل کننده مقاوم H_∞ می‌باشد چراکه علاوه بر پایداری مقاوم، عملکرد بهینه را نیز در کنترل حلقه بار-فرکانس به‌همراه خواهد داشت.

برای طراحی این کنترل کننده ابتدا تابع تبدیل سیستم نشان داده شده در شکل ۲ بر اساس نسبت $\Delta\omega$ به load ref به دست آورده می‌شود. تابع تبدیل سیستم $G_m(s)$ به صورت نسبت $kN(s)$ به $D(s)$ نشان داده می‌شود که در آن $N(s)$ و $D(s)$ به ترتیب بیانگر صفرها و قطب‌های سیستم هستند. فرم کلی این تابع تبدیل در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$G_m(s) = \frac{KN(s)}{D(s)} = \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\dots}{(s+p_1)(s+p_2)\dots} \quad (13)$$

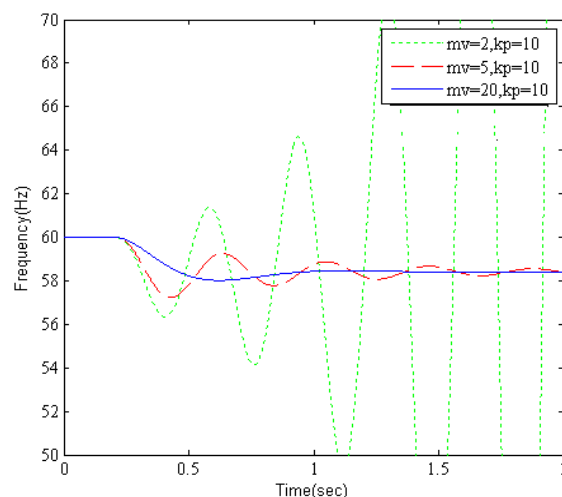
مقادیر P_i و Z_i و K در جدول شماره ۲ در قسمت پیوست آورده شده است.

۴-۱- مدل سازی نامعینی‌های سیستم

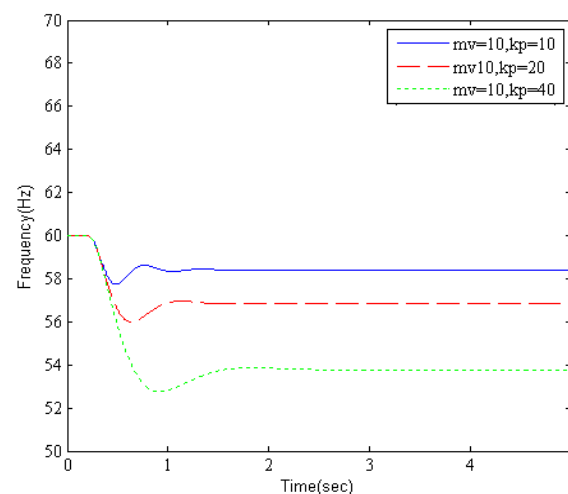
با توجه به بلوک دیاگرام سیستم مورد مطالعه می‌توان اثر تغییرات پارامترهای M_v و K_p را به صورت روابط زیر در سیستم لحاظ کرد:

$$\frac{1}{k_p} = \frac{1}{k_p(1+\rho_{kp}\delta_{kp})} = \frac{1}{k_p} - \frac{\rho_{kp}}{k_p} \delta_{kp} (1+\rho_{kp}\delta_{kp})^{-1} \quad (14)$$

$$= F(M_{kp}, \delta_{kp})$$



شکل ۶: تغییرات فرکانس به ازای $K_p=10$ و مقادیر مختلف M_v



شکل ۷: تغییرات فرکانس به ازای $M_v=10$ و مقادیر مختلف K_p

در این صورت مقدار کوچک K_p ممکن است منجر به ناپایداری سیستم گردد. از طرفی دیگر، در سرعت‌های زیاد باد و مقادیر بزرگ M_v ، در صورت بروز اغتشاش در فرکانس سیستم، تولید توان اضافی توسط ژنراتور، به واسطه عملکرد حلقه کنترلی مربوط به اینرسی مجازی، باعث افزایش درجه حرارت ژنراتور شده که ممکن است بیش از حرارت مجاز باشد. بنابراین به دلیل محدودیت‌های ذکر شده نمی‌توان مقدار M_v را تا حد زیادی افزایش داد در نتیجه سیستم همچنان دارای افت فرکانس و پایداری دینامیکی ضعیفی خواهد بود.

۴- سیستم کنترل فرکانس پیشنهادی

به منظور تنظیم فرکانس و حذف خطای حالت ماندگار، در سیستم‌های کنترل بار-فرکانس کلاسیک، یک حلقه کنترلی شامل انتگرال گیر به سیستم کنترل اضافه می‌گردد.

با این وجود، سیستم‌های کنترل بار-فرکانس کلاسیک در مقابل نامعینی پارامترهای کنترلی عملکرد مناسبی ندارند. از جمله این

۴-۲- تعریف مسئله کنترل

همان طوری که گفته شد، هدف این مقاله طراحی یک کنترل کننده مقاوم برای سیستم است که علی‌رغم وجود نامعینی‌های سیستم، پایداری و عملکرد سیستم را تضمین کند، ضمناً در این مقاله می‌خواهیم میانگین انرژی سیگنال کنترل نیز حداقل باشد. لذا کنترل کننده مقاوم $K(s)$ که در شکل ۹ نشان داده شده است را به صورت یک کنترل کننده H_2/H_∞ در نظر می‌گیریم. در این شکل، نامعینی‌های سیستم به صورت LFT بالایی نشان داده شده و W_u و W_p و W_e توابع وزنی هستند. به این ترتیب مسئله کنترل پیدا کردن کنترل کننده‌ای است که قیود زیر را برآورده سازد:

$$Y_{opt} = \min_y \left\| \begin{bmatrix} W_p T \\ W_e S \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1 \quad (18)$$

$$\text{subject to } \|W_u\|_2 \leq \gamma_2 \quad (19)$$

که در اینجا T تابع انتقال سیستم حلقه بسته است که معادل تابع مکمل حساسیت بوده و S نیز تابع حساسیت سیستم است. این بدان معناست که بهینه‌سازی تنها در فضای نرم بی‌نهایت و به منظور ایجاد مصالحه بهینه بین پایداری مقاوم و کارایی انجام می‌گیرد. به این ترتیب علاوه بر پایداری مقاوم، بهینه‌سازی پایداری کارایی سیستم کنترلی نیز به مسئله اضافه می‌شود.

۴-۳- انتخاب توابع وزنی

توابع وزنی نقش مهمی در شکل‌دهی پاسخ فرکانسی و نزدیک کردن آن به شکل مطلوب دارند. این توابع، معمولاً با استفاده از روش‌های شناسایی و دانش اولیه از سیستم به دست می‌آیند. برای محاسبه W_e به منظور دستیابی به پاسخ مطلوب در حوزه زمان، زمان نشست (T_s) کمتر از ۱ ثانیه و فراجهش (M) کمتر از ۲۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، اگر سیستم حلقه بسته دارای دینامیک غالب از مرتبه دو باشد، آنگاه:

$$M = e^{\frac{\pi \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \leq 0.2 \Rightarrow \zeta \geq 0.45 \Rightarrow \zeta = 0.5 \quad (20)$$

$$T_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} (1 \Rightarrow \omega_n) 8 \Rightarrow \omega_n = 10 \text{ rad/sec} \quad (21)$$

$$T_{id}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{100}{s^2 + 10s + 100} \quad (22)$$

که در آن $0 < \rho_{kp} < 1$ و $F(M_{kp}, \delta_{kp})$ نمایش ماتریسی نامعینی به فرم LFT بالایی برای نامعینی است و در نتیجه:

$$M_{kp} = \begin{bmatrix} -\rho_{kp} & \frac{1}{k_p} \\ \rho_{kp} & \frac{1}{k_p} \end{bmatrix} \quad (15)$$

به طریق مشابهی برای M_v داریم:

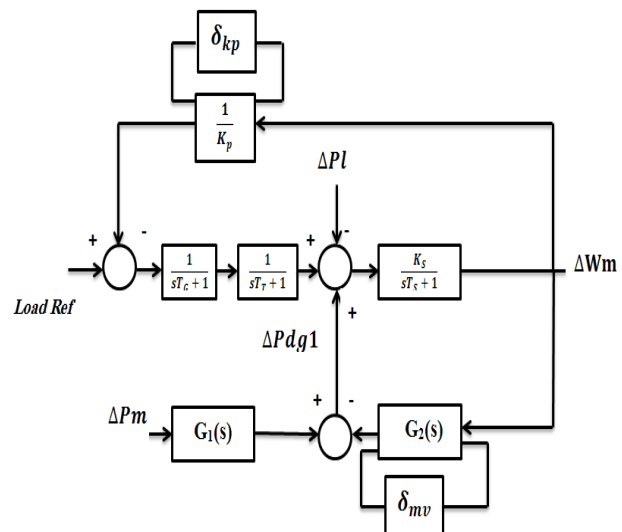
$$m_v = F(M_{mv}, \delta_{mv}) \quad (16)$$

$$M_{mv} = \begin{bmatrix} 0 & \overline{m}_v \\ \rho_{mv} & \overline{m}_v \end{bmatrix} \quad (17)$$

در روابط فوق: $\overline{m}_v, \rho_{mv}, \overline{k}_p, \rho_{kp}$ و δ_{kp} به ترتیب درصد تغییرات اینرسی مجازی، مقدار نرمال اینرسی مجازی، محدودیت تغییرات اینرسی مجازی، درصد تغییرات عامل افقی، مقدار نرمال عامل افقی و محدودیت تغییرات عامل افقی می‌باشند. مقادیر این پارامترها در جدول شماره ۳ در پیوست نشان داده شده‌اند.

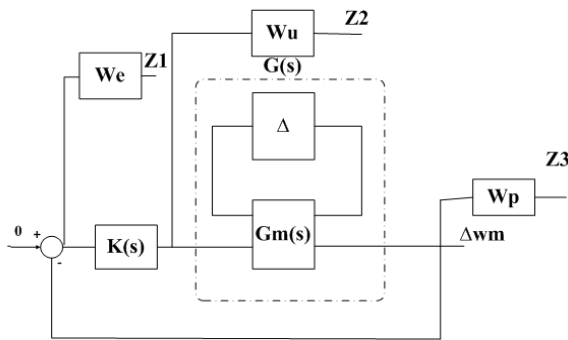
در این صورت می‌توان ماتریس‌های مربوط به پارامترهای M_v و K_p به همراه تغییرات لحاظ شده که در روابط فوق نشان داده شده است را در بلوک دیاگرام سیستم مورد مطالعه جایگزین کرد. بلوک دیاگرام ریزشکه مورد مطالعه با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای K_p و M_v در شکل ۸ نشان داده شده است.

به منظور طراحی کنترل کننده مقاوم، بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۸ را می‌توان به صورت بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل ۹ ساده نمود.

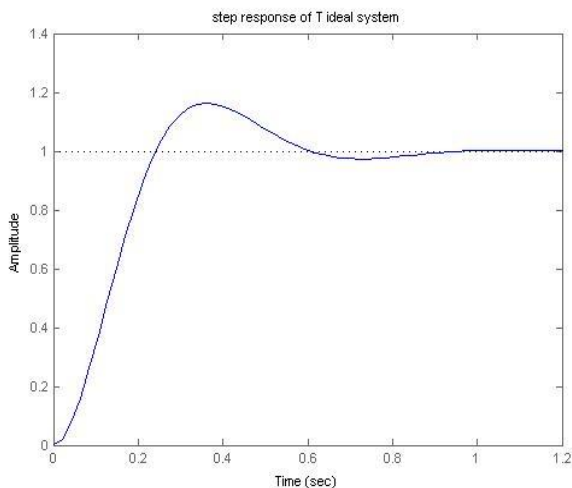


شکل ۸: بلوک دیاگرام سیستم مورد مطالعه به همراه عدم قطعیت

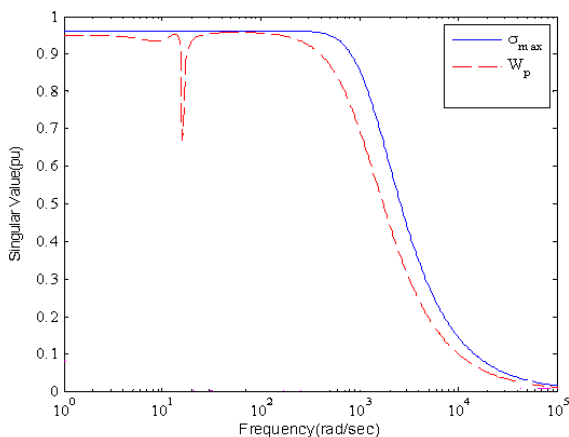
به ازای $K_p = 10$ و مقادیر مختلف M_v نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، به ازای مقادیر مختلف M_v همواره خطای حالت ماندگار فرکانس صفر است. علت حذف خطای ماندگار، با توجه به جدول ۴ پیوست، وجود یک قطب در مبدأ ($\lambda = 0$) است که به عنوان یک انتگرال گیر عمل می کند. همچنین در شکل ۱۳ مشاهده می شود که افزایش مقدار M_v موجب بهبود پاسخ دینامیکی سیستم شده و حداکثر تغییرات فرکانس در حالت گذرا را کاهش می دهد.



شکل ۹: ساختار سیستم حلقه بسته به همراه کنترل کننده و توابع وزنی



شکل ۱۰: پاسخ پله دینامیک سیستم مطلوب



شکل ۱۱: منحنی مقدار استثنایی سیستم حلقه بسته و پاسخ فرکانسی

پاسخ پله سیستم مطلوب T_{id} که در شکل ۱۰ رسم شده است، نشان می دهد که این تابع تبدیل ایده آل تمامی خواسته های مطلوب را دارا می باشد.

حال با توجه به این که هدف طراحی تضمین شرط $\|W_e S\|_{\infty} < 1$ است، می توان با استفاده از روابط زیر تابع تبدیل W_e را محاسبه کرد:

$$S(s) = 1 - T_{id}(s) = 1 - \frac{100}{s^2 + 10s + 100} = \frac{s(s+10)}{s^2 + 10s + 100} \quad (23)$$

$$W_e \leq \frac{1}{S(s)} = \frac{s^2 + 10s + 100}{s(s+10)} \quad (24)$$

برای افزایش پایداری سیستم، قطب روی مبدأ تابع تبدیل W_e کمی جابجا نموده و نیز یک قطب دور به آن اضافه می کنیم تا تابع وزنی W_e اکیداً سره گردد. بدین ترتیب W_e به شکل تابع زیر درمی آید:

$$W_e = \frac{s^2 + 10s + 100}{(s+0.01)(s+10)(0.001s+1)} \quad (25)$$

برای W_p نیز با توجه به شکل ۹ می توان نتیجه گرفت که با تابع وزنی W_e برابر است. همچنین با توجه به رابطه ۱۹ و توجه به این که مقدار بهینه سیگنال کنترل توسط کنترل کننده $K(s)$ ایجاد می شود می توان برای سادگی فرض کرد که $W_u = 1$.

۴-۴ طراحی کنترل کننده ترکیبی H_2/H_{∞}

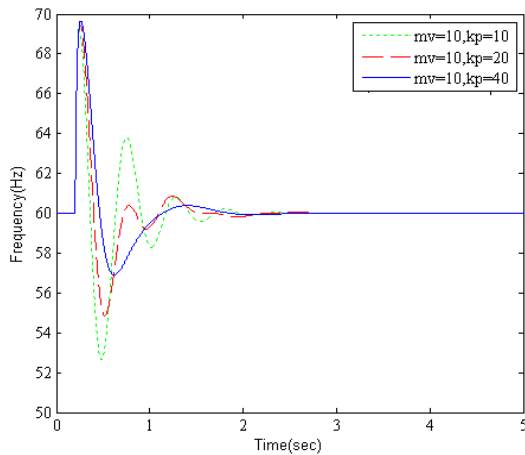
پس از تعیین توابع وزنی، کنترل کننده به کمک جعبه ابزار کنترل مقاوم نرم افزار Matlab طراحی گردیده است. مقادیر ویژه کنترل کننده مقاوم به دست آمده، $K(s)$ ، در جدول ۴ پیوست نشان داده شده است. همان طور که در جدول ۴ مشاهده می شود، حاصل طراحی یک کنترل کننده با مرتبه ۱۰ می باشد که به منظور پیاده سازی راحت تر، با استفاده از امکانات جعبه ابزار کنترل مقاوم نرم افزار Matlab مرتبه کنترل کننده به مرتبه ۵ کاهش داده شده است.

شکل ۱۱ بیشترین اندازه مقدار استثنایی سیستم حلقه بسته، δ_{max} ، و پاسخ فرکانسی تابع وزنی W_p را نشان می دهد. همان طوری که ملاحظه می شود، شروط ذکر شده در رابطه (۱۸) برقرار است. مطابق شکل ۱۱، بیشترین اندازه مقدار استثنایی سیستم حلقه بسته در بازه فرکانسی بزرگی نسبتاً تخت بوده و مقدار بیشینه آن ۰/۹۴۱۶ می باشد.

شکل ۱۲ مدل سازی نهایی سیستم مورد مطالعه به همراه کنترل کننده مقاوم طراحی شده را نشان می دهد.

۵- نتایج شبیه سازی

شکل های ۱۳ و ۱۴ اثر اضافه نمودن کنترل کننده مقاوم H_2/H_{∞} (از درجه ۵) بر روی سیستم کنترل فرکانس شامل اینرسی مجازی را نشان می دهند. در شکل ۱۳ تأثیر کنترل کننده بر تنظیم فرکانس



شکل ۱۴: تأثیر کنترل کننده H_2/H_∞ بر تنظیم فرکانس به ازای $M_v = 10$ و مقادیر مختلف K_p

پیوست‌ها

جدول ۱: مقادیر پارامترهای به کاررفته در سیستم مورد مطالعه

پارامتر	$T_G(s)$	$T_T(s)$	$T_S(s)$	H	K_{opt}	K_S
مقدار	۰/۸	۰/۴۵	۳	۳	۰/۱۶۲۸	۲

جدول ۲: مقادیر پارامترهای Z_i و P_i در تابع تبدیل $G_m(s)$

k	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8
k	-۸/۳۳۲	-۲۶۹۴	-۲۱/۴	-۴/۴۷۳	-۲/۲۶۶	-۲/۲۸۱	-۰/۵۳۳ + j۹/۷۰۴	-۰/۵۳۳ - j۹/۷۰۴
z_1	-۸/۳۳	-۲۷۰۰	-۱۲/۵۱	-۴/۴۱۸	-۲/۶۴۵	-۲/۰۳۳ + j۰/۲۴۶۷	-۲/۰۳۳ - j۰/۲۴۶۷	

جدول ۳: مقادیر پارامترهای مربوط به ماتریس‌های M_{kp} و M_{mv}

δ_{kp}	\bar{k}_p	ρ_{kp}	δ_{mv}	\bar{m}_v	ρ_{mv}
-۱۱۴	۱۰۷	۲۰	۰-۵۰	۱۰	۲۰
۰/۱					

جدول ۴: مقادیر ویژه کنترل کننده H_2/H_∞ درجه ۱۰ و ۵ به ازای

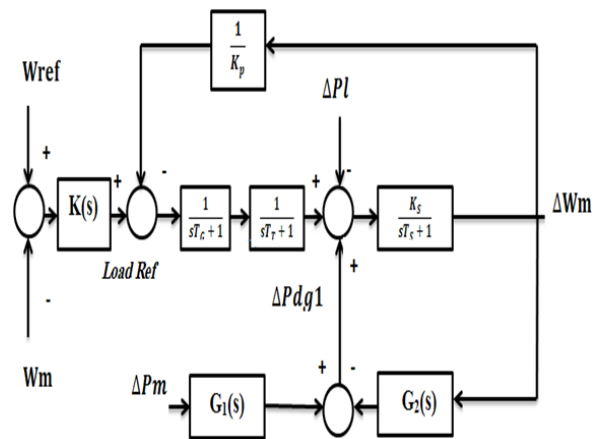
$K_p = 10$ و $M_v = 2$

n	۱۰	۵
λ_1	-۲۶۲۲/۶	-۲۶۲۱/۴
λ_2	-۱۰۰۰	-۱۰۰۰
λ_3	-۱۵۴۲/۶	*
λ_4	-۶۲ + j۵۹/۳	-۶۳/۵ + j۶۰/۲
λ_5	-۶۲ - j۵۹/۳	-۶۳/۵ - j۶۰/۲
λ_6	-۱۰	*
λ_7	*	*
λ_8	-۴/۶	*
λ_9	-۲/۲ + j۰/۸	*
λ_{10}	-۲/۲ - j۰/۸	*

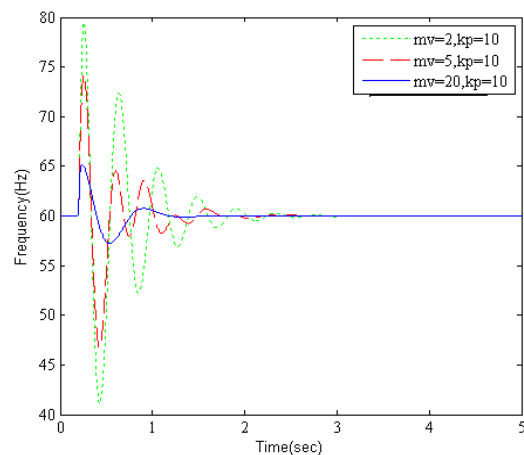
در شکل ۱۴ تأثیر کنترل کننده مقاوم پیشنهادی بر تنظیم فرکانس به ازای $M_v = 10$ و مقادیر مختلف K_p نشان داده شده است. همان طوری که ملاحظه می شود، به ازای مقادیر مختلف K_p همواره خطای حالت ماندگار فرکانس صفر است. از طرفی دیگر، مقادیر مختلف K_p تأثیری بر حداکثر تغییرات فرکانس در حالت گذرا ندارد. همچنین در شکل ۱۴ ملاحظه می شود که افزایش K_p تا حدودی نوسانات حالت گذرا را کاهش می دهد.

۶- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت مسئله پایداری و تنظیم فرکانس در ریزشبهکها، می توان با استفاده از پیاده سازی اینرسی مجازی، پایداری شبکه را بهبود بخشید. اما به علت وجود نامعینی ها در مدل سیستم، عملکرد مناسب اینرسی مجازی با چالش های مهمی روبرو می شود. بنابراین در این مقاله، کنترل کننده مقاوم ترکیبی H_2/H_∞ پیشنهاد و طراحی شده است به طوری که در مقابل نامعینی های مقدار عامل افتی در سیستم تنظیم سرعت و مقدار اینرسی مجازی، مقاوم بوده و پایداری سیستم را بهبود می بخشد.



شکل ۱۲: بلوک دیگرام سیستم به همراه کنترل کننده



شکل ۱۳: تأثیر کنترل کننده H_2/H_∞ بر تنظیم فرکانس به ازای $K_p = 10$ و مقادیر مختلف M_v

مراجع

- [12] M. Nagpal, A. Moshref, G. K. Morison, and P. Kundur, "Experience with Testing and Modeling of Gas Turbines," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 652-656, 2001.
- [13] Y. Hain, R. Kulesky, and G. Nudelman, "Identification-based power unit model for load-frequency control purposes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1313-1321, 2000.
- [14] Y. Mi, Y. Fu, D. Li, C. Wang, P. C. Loh, and P. Wang, "The sliding mode load frequency control for hybrid power system based on disturbance observer," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 74, pp. 446-452, 2016.
- [15] I. Kocaarslan, C. Ertugrul, "Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 27, no. 8, pp. 542-549, 2005.
- [16] V. P. Singh, S. R. Mohanty, N. Kishor, and P. K. Ray, "Robust H-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 46, pp. 294-305, 2013.
- [17] H. Bevrani, M. R. Feizi, and S. Ataee, "Robust frequency control in an islanded micro-grid: H_∞/μ synthesis approaches," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 706-717, 2016.
- [18] C. Ning, "Robust H_∞ load-frequency control in interconnected power systems," *IET Control Theory & Applications*, vol. 10, pp. 67-75, 2016.
- [19] S. A. Saremi Hasari, M. Hamzeh, and A. Salemnia, "Dynamic and static performance improvement of power sharing system in islanded micro grids," *TJEE*, vol. 46, no. 1, 2016.
- [20] M. Rouholamini, M. Rashidi Nejed, and S. Esmaeili, "Simultaneous scheduling of energy and frequency control ancillary services in regard to load self-regulation effect," *TJEE*, vol. 46, no. 1, 2016.
- [21] H. Bevrani, and T. Hiyama, "On load frequency regulation with time delays: design and real-time implementation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 292-300, 2009.
- [22] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, "Design of decentralized robust LFC in a competitive electricity environment," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 56, no. 9, pp. 225-236, 2005.
- [23] H. Shayeghi, "A robust decentralized power system load frequency control," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 59, no. 6, pp. 281-93, 2008.
- [1] M. Fazeli, G. M. Asher, C. Klumpner, and L. Yao, "Novel integration of DFIG-based wind generators within microgrids," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, pp. 840-850, 2011.
- [2] M. Shahabi, M. R. Haghifam, M. Mohamadian, and S. A. Nabavi-Niaki, "Microgrid dynamic performance improvement using a doubly fed induction wind generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, pp. 137-145, 2009.
- [3] M. F. M. Arani, and E. F. El-Saadany, "Implementing virtual inertia in DFIG-based wind power generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1373-1384, 2013.
- [4] S. K. Pandey, S. R. Mohanty, and N. Kishor, "A literature survey on load-frequency control for conventional and distribution generation power systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 318-334, 2013.
- [5] S. K. Aditya, and D. Das, "Battery energy storage for load frequency control of an interconnected power system," *Electric Power Systems Research*, vol. 58, no. 3, pp. 179-185, 2001.
- [6] A. Demireoren, "Automatic generation control using ANN technique for multi-area power system with SME Sunits," *Electric Power Components and Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 193-213, 2004.
- [7] T. Sasaki, T. Kadoya, and K. Enomoto, "Study on load frequency control using Redox flow batteries," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 660-667, 2004.
- [8] Q. C. Zhong, and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, 2011.
- [9] M. Torres, and L. A. C. Lopes, "Virtual synchronous generator control in autonomous wind-diesel power systems," *Proc. IEEE Electrical Power & Energy Conf. (EPEC)*, pp. 1-6, 2009.
- [10] D. Gautam, L. Goel, R. Ayyanar, V. Vittal, and T. Harbour, "Control strategy to mitigate the impact of reduced inertia due to doubly fed induction generators on large power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 214-224, 2011.
- [11] L. R. Chang-Chien, W. T. Lin, and Y. C. Yin, "Enhancing frequency response control by DFIGs in the high wind penetrated power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 710-718, 2011.

زیر نویس ها

¹³ Rotating Mass¹⁴ Droop Control¹⁵ Droop Equation¹⁶ Linear Fractional Transform¹ Doubly Fed Induction Generator² Non-dispatchable³ Speed Governor⁴ Load-Frequency Control⁵ Droop Factor⁶ Micro Grids⁷ Virtual Inertia⁸ Uncertainty⁹ Robust Control¹⁰ Rotor Side Converter¹¹ Grid Side Converter¹² Maximum Power Point Tracing