نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال دوم / شماره پنجم / تابستان ۱۳۹۴

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
2nd Year / No. 5 / September 2015

طراحی کنترل‌کننده PID برای کنترل بار-فرکانس در سیستم قدرت با توربین آبی دارای جبران‌کننده افتی گذرا

غضنفر شاهقلیان*[۱]

چکیده

وظیفه اصلی کنترل فرکانس-بار (LFC) برگشت خطای فرکانس حالت دائمی به صفر است. انحراف فرکانس از مقدار نامی و تأمین توان اکتیو موردنیاز مصرف‌کننده‌ها، باعث تغییر آب ورودی به توربین می‌شود. در این تحقیق با بیان معادله حالت و تابع انتقال سیستم کنترل بار- فرکانس با توربین آبی، پایداری سیگنال کوچک همراه با اثر تغییر پارامترها مانند ثابت اینرسی، زمان شروع آب و ثابت تنظیم سرعت بر رفتار دینامیکی سیستم بررسی شده و کاربرد جبران‌کننده افتی گذرا در پاسخ توربین آبی با آنالیز مقادیر ویژه و شبیه‌سازی رفتاری دینامیکی سیستم قدرت نشان داده شده است. همچنین با استفاده از توابع انتقال، کنترل‌کننده PID برای کنترل بار-فرکانس سیستم قدرت طراحی شده و تغییر بهره‌های کنترل‌کننده بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برتری پاسخ کنترل‌کننده پیشنهادی را نسبت به پاسخ کنترل‌کننده متداول انتگرالی نشان می-دهد.

واژه‌های کلیدی

توربین آبی، کنترل فرکانس، آنالیز مقادیر ویژه، پایداری سیگنال کوچک، جبران‌کننده افتی گذرا

۱*. استادیار- دانشکده برق- واحد نجف آباد- دانشگاه آزاد اسلامی shahgholian@iaun.ac.ir

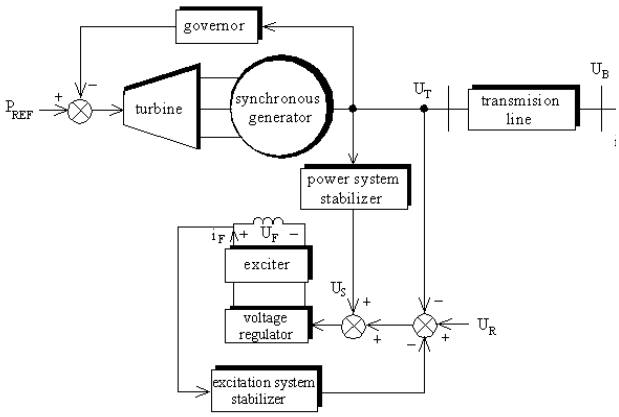
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۱۵

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]

مقدمه

از شروع پیدایش صنعت برق تبدیل نیروی آب به نیروی الکتریکی مورد توجه بوده و نیروگاه برق‌آبی[1] در شرایط خاص از نظر اقتصادی برتر از نیروگاه حرارتی است. نیروگاه برق‌آبی سریع راه‌اندازی می‌شود و برای پاسخ به تغییرات فرکانس سیستم در اثر تغییرات بار استفاده می‌شود. همچنین نیروگاه-های برق‌آبی می‌توانند به سرعت زیر بار روند و یا از زیر بار خارج شوند (زانگ[2] و همکاران، ۲۰۱۵، سینگه[3] و همکاران، ۲۰۱۴، بروکواسکی و ویگل[4]، ۲۰۱۳، ریودا و کولومی[5]، ۲۰۰۹). از مزایای توربین‌های آبی نسبت به توربین‌های بخاری، می‌توان به سادگی و ارزان‌تر بودن کنترل آن‌ها اشاره کرد؛ بنابراین کنترل فرکانس در مرحله اول در صورت امکان توسط نیروگاه توان برق‌آبی انجام می‌شود. با توجه به تغییر توان‌های اکتیو و راکتیو و تقریباً مستقل بودن آن‌ها از یکدیگر همواره دو سیستم کنترل بار – فرکانس[6] (LFC) و تنظیم‌کننده ولتاژ[7] (AVR) برای کنترل پاسخ‌های گذرا و ماندگار سیستم در نیروگاه‌ها نیاز است (اونسیویلا و ماریونگسری[8]، ۲۰۰۸، فیض[9] و همکاران، ۲۰۰۷). شکل (۱) ماشین سنکرون متصل شده به شین بی‌نهایت با این دو نوع کنترل‌کننده را نشان می‌دهد. قدرت تحویل داده شده توسط ژنراتور با توان مکانیکی ورودی آن به‌وسیله محرک‌ها از قبیل توربین بخار، توربین آبی و توربین گازی یا موتور دیزلی کنترل می‌شود. توازن توان اکتیو باعث ثابت ماندن فرکانس سیستم می‌شود و عدم تعادل توان به‌طور مستقیم روی فرکانس شبکه و سرعت ژنراتور تأثیر می‌گذارد، بنابراین به کار بردن LFC در سیستم قدرت لازم و ضروری است. با کنترل توان حقیقی تولیدی در واحدهای مختلف، فرکانس شبکه و توان حقیقی انتقالی از خطوط انتقال کنترل می‌شود (ونایاگاماتوری و هرلی[10]، ۲۰۰۲، یوسف[11] و همکاران، ۲۰۱۴، شابیب[12]، ۲۰۱۲).



شکل (۱): ماشین سنکرون متصل به شین بی‌نهایت با کنترل‌کننده‌ها

کنترل بار-فرکانس عمل بسیار مهمی در کنترل و عملکرد سیستم قدرت برای فراهم نمودن توان الکتریکی با کیفیت خوب، کافی و مطمئن است. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه کاربرد و طراحی LFC در سیستم قدرت برای بهبود پایداری دینامیکی ارائه شده است (یزدی‌زاده[13] و همکاران، ۲۰۱۲، می[14] و همکاران، ۲۰۱۱، پدهان و ماجحی[15]، ۲۰۱۳، پوتحیا[16] و همکاران، ۲۰۰۶، تان[17]، ۲۰۱۰، شاهقلیان[18] و همکاران، ۲۰۱۰). ۲۰۱۰).

یک روش کنترل‌کننده مد لغزشی برای LFC در یک سیستم قدرت دارای چهار ناحیه با توربین‌های مختلف مانند توربین بدون پیش گرم‌کن و توربین آبی در تحقیق وردلجاک[19] و همکاران (۲۰۱۰)، ارائه شده است. در تحقیق ها و ترینه[20] (۲۰۰۱) یک روش مبتنی بر ساختار متغیر برای کنترل فرکانس بار در سامانه‌های تولید انرژی الکتریکی با توربین‌های مجهز به

[1] Hydropower
[2] Zhang
[3] Singh
[4] Borkowski & Wegiel
[5] Rueda and Colome
[6] Load frequency control
[7] Automatic voltage regulator
[8] Onsivilal & Marungsri
[9] Faiz
[10] Venayagamoorthy & Harley
[11] Yousef
[12] Shabib
[13] Yazdizadeh
[14] Mi
[15] Padhan & Majhi
[16] Pothiya
[17] Tan
[18] Shahgholian
[19] Vrdoljak
[20] Ha & Trinh

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]

پیش گرم‌کن ارائه شده و با منطق فازی به‌طور پیوسته پارامترهای کنترل‌کننده را بر اساس نظریه کنترل خطی تنظیم می‌کند. یک کنترل‌کننده PID مرتبه کسری برای LFC تک ناحیه‌ای برای سه نوع توربین بدون پیش گرم‌کن، با پیش گرم‌کن و آبی در تحقیق سندحی و هوتی[1] (۲۰۱۴) ارائه شده که بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده و مقاوم بودن آن بر اساس معیار خطای انتگرالی انجام شده است. در تحقیق تیوشیر و سریواستاوا[2] (۲۰۱۲) سیستم کنترل بار-فرکانس در یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای حرارتی-آبی با استفاده از کنترل-کننده PID فازی ترکیبی نشان داده شده که کنترل‌کننده فازی، ترکیبی از یک کنترل‌کننده متداول PID و کنترل‌کننده مقاوم است. یک الگوریتم برای طراحی پایداری مقاوم با در نظر گرفتن انتقال قطب بر اساس مدل فضای حالت در تحقیق مالیک و زینگ[3] (۱۹۹۵) پیشنهاد شده که در یک سیستم گاورنر توربین آبی اجرا شده است. در تحقیق ناتاراجان[4] (۲۰۰۵) طراحی و تحلیل یک کنترل‌کننده PID مقاوم برای گاورنر توربین آبی با استفاده از فن پاسخ فرکانسی ارائه شده است. در تحقیق خدابخشیان و هوشمند[5] (۲۰۱۰) کنترل‌کننده PID مقاوم برای کنترل خودکار تولید در یک سامانه قدرت با توربین آبی بر اساس حداکثر اوج مشخصات تشدید با استفاده از نمودار نیکولز ارائه شده است. در تحقیق کیشور[6] (۲۰۰۵)، مدل یک سیستم قدرت آبی متصل به یک شین بی‌نهایت در فضای حالت با در نظر گرفتن دو ورودی و دو خروجی ارائه و طراحی سیستم کنترل بر اساس تئوری انتقال قطب بهینه انجام شده است.

در تولید نیروی الکتریکی، اغتشاشات سیستم ناشی از نوسانات بار باعث تغییر در مقدار مطلوب فرکانس و عبور توان در خط انتقال می‌شود. فرکانس سیستم و عبور توان در خط انتقال باید در محدوده تعیین‌شده قرار بگیرد (شاهقلیان[7] و همکاران، ۲۰۰۹، دولا و پتتی[8]، ۲۰۰۶). به‌طور عمومی هدف از کنترل بار-فرکانس اولاً کمینه کردن خطای فرکانس و توان انتقالی بین ناحیه‌ها و ثانیاً صفر کردن خطای حالت دائمی فرکانس است. ورودی‌های غیرقابل‌پیش‌بینی و متغیر، غیرخطی، پارامترهای نامعلوم و تغییرات دستگاه تابع انتقال از مسائل کنترل بار-فرکانس است.

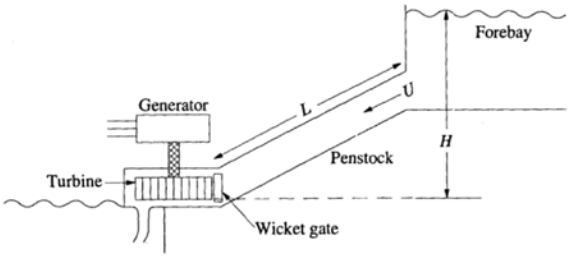
در این تحقیق، هدف تحلیل و بررسی پایداری سیگنال کوچک و طراحی کنترل‌کننده PID در سیستم قدرت با توربین آبی مجهز به کنترل‌کننده LFC است. ابتدا تابع انتقال توربین آبی و تابع انتقال جبران‌کننده گذرای افتی[9] بیان شده است. سپس معادله حالت و معادله خروجی سیستم قدرت با توربین آبی تعیین گردیده است. با آنالیز مقادیر ویژه و شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سیستم، اثرات تغییر ثابت تنظیم سرعت گاورنر و زمان شروع آب و همچنین اثر جبران‌کننده بر پایداری سیستم نشان داده شده است. سپس با استفاده از توابع انتقال و معادله مشخصه پارامترهای کنترل‌کننده PID تنظیم و تغییرات آن‌ها بررسی شده است.

مدل دینامیکی سیستم

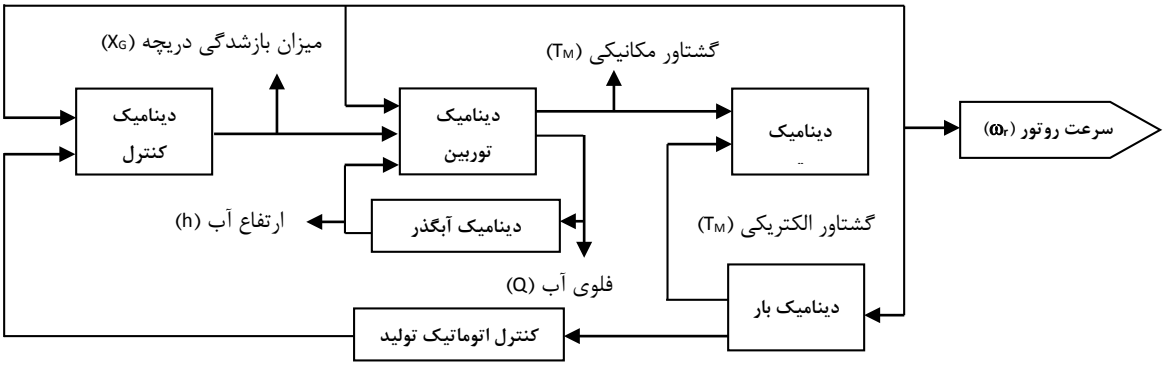
اجزای اصلی یک نیروگاه برق‌آبی شامل کانال، مخزن ضربه‌گیر[10]، پنستاک[11] (مجری عبور آب) و توربین است (چن[12] و همکاران، ۲۰۱۳). دیاگرام شماتیکی از یک نیروگاه برق‌آبی در شکل (۲) و نمودار بلوکی تابعی بین دینامیک قسمت‌های مختلف یک نیروگاه برق‌آبی در شکل (۳) نشان داده شده است که در آن T_M گشتاور مکانیکی، T_E گشتاور الکتریکی، X_G میزان بازشدگی دریچه، h فشار، Q فلوی آب و ω_r سرعت هستند (گروه کاری[13]، ۱۹۹۲).

[1] Sondhi & Hote
[2] Tushir & Srivastava
[3] Malik & Zeng
[4] Natarajan
[5] Khodabakhshian & Hooshmand
[6] Kishor
[7] Shahgholian
[8] Doolla & Bhatti
[9] Transient droop compensation
[10] Surge tank
[11] Penstock
[12] Chen
[13] Working Group

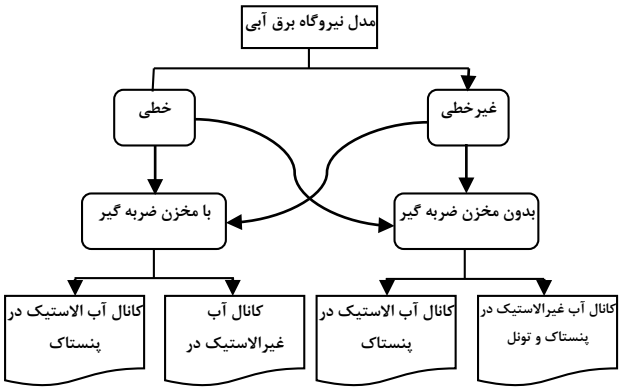
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]



شکل (۲): دیاگرام شماتیکی از یک نیروگاه برق‌آبی (سینگه و چایوهان[1]، ۲۰۱۱)



شکل (۳): نمایش بلوک دیاگرام قسمت‌های مختلف نیروگاه برق‌آبی



شکل (۴): تقسیم‌بندی انواع مدل‌های نیروگاه برق‌آبی

مدل توربین آبی به دو گروه خطی (غیر الاستیک) و غیرخطی (الاستیک) مطابق شکل (۴) بر اساس در نظر گرفتن مخزن ضربه‌گیر تقسیم‌بندی می‌شود (کیشور[2]، ۲۰۰۷). پارامترهای نیروگاه آبی با نقطه کار تغییر می‌کنند. فلو و گشتاور توربین رابطهٔ غیرخطی با ارتفاع آب، سرعت و وضعیت دریچه آب دارند (جیانگ[3]، ۲۰۰۶).

[1] Singh & Chauhan
[2] Kishor
[3] Jiang

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]

تابع انتقال توربین آبی

اگر میزان آب متغیر و دریچه آب یکنواخت در نظر گرفته شود، نسبت ارتفاع ستون آب (H) به شارش آب (Q) برابر است با (منصور[1] و همکاران، ۱۹۹۸):

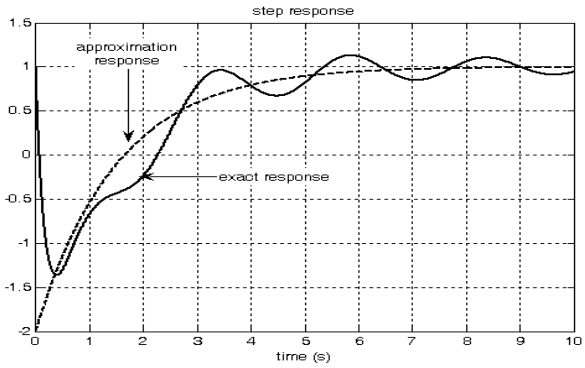
$$\frac{H(s)}{Q(s)} = -\frac{T_W}{T_e} tanh(T_e s + F) \qquad (۱)$$

که در آن T_e زمان گذرای فشار موج آب، F ضریب اصطکاک لوله و T_W زمان شروع آب[2] هستند. با خطی فرض کردن مشخصات توربین و با استفاده از تقریب سری ماکلورن برای تابع هیپربولیک و صرف‌نظر از ضریب اصطکاک لوله و با صرف‌نظر از ضرایب درجه دوم به بالا s، تابع تبدیل کلاسیک یک توربین آبی ایده آل بدون تلفات (نسبت تغییرات توان مکانیکی به تغییرات موقعیت دریچه با اثر ستون آب غیرقابل ارتجاع) به‌صورت زیر بیان می‌شود (دولا و پتتی[3]، ۲۰۰۶، کندر[4]، ۱۹۹۴، کیشور[5] و همکاران، ۲۰۰۶):

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_M(s)}{\Delta X_G(s)} = \frac{1 - T_W s}{1 + 0.5 T_W s} \qquad (۲)$$

که در آن T_W با بار تغییر می‌کند و در بار کامل بین ۰/۵ تا ۵ ثانیه است و با سرعت آب در حالت ماندگار (U_0) و طول آبگذر[6] (کانال) (L) رابطهٔ مستقیم و با ارتفاع آب در محل دریچه در حالت ماندگار (H_0) و شتاب ناشی از نیروی کشش زمین (g_0) رابطهٔ معکوس دارد. تابع تبدیل توربین یک صفر در سمت راست و یک قطب در سمت چپ محور موهومی دارد و توربین یک سیستم ناکمینه فاز[7] است (پتتی[8] و همکاران، ۲۰۱۰). به علت وجود صفر در سمت راست محور موهومی، پاسخ فرکانسی سیستم تأخیر فاز بیشتری دارد و کنترل این نوع سامانه‌ها مشکل است. پاسخ توربین کند است و زمان پاسخ‌دهی آن در حدود چند ثانیه است.

شکل (۵) پاسخ پله توان مکانیکی توربین آبی با تقریب درجه یک (مدل ایده آل یا بدون تلفات) و درجه چهار چندجمله‌ای (سری مکلورن) به ازای T_W و T_e برابر با یک را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در پاسخ پله، پاسخ تابع انتقال ایده آل تقریباً نزدیک به پاسخ تابع انتقال واقعی است. زمان شروع آب بر مقدار پاسخ در حالت دائمی تأثیری ندارد و تنها بر بیشینه و فرکانس نوسان پاسخ تأثیر می‌گذارد.



شکل (۵): مقایسه پاسخ پله تابع انتقال کلاسیک توربین (خط‌چین) با مدل واقعی (خط)

جبران‌کننده

زمانی که دریچه آب برای جبران افزایش بار باز می‌شود، در ابتدا با کاهش فشار توربین، تغییر اولیه کوتاه‌مدتی در توربین به وجود می‌آید که خلاف جهت تغییر موقعیت دریچه است. ولی با شتاب گرفتن آب و افزایش سرعت آن در لوله هدایت آب، فشار آب افزایش می‌یابد و باعث افزایش توان تولیدی ژنراتور و نهایتاً توازن توان اکتیو می‌گردد. بنابراین گاورنرهای توربین آبی باید دارای افت گذرای زیادی باشند و برای عملکرد مطلوب و پایدار کنترل سرعت، گاورنر واحد برق‌آبی نیاز به جبران ساز گذرای افتی دارد (یو[9]، ۱۹۸۳).

در گاورنر نیروگاه برق‌آبی برای مقابله با اثرات اینرسی آب در مسیر شیب‌دار پنستاک در حالت گذرا علاوه بر حلقهٔ مشخصهٔ افتی دائم یک حلقه دروپ موقت وجود دارد که با اثر غیر کمینه

[1] Mansoor
[2] Water starting time
[3] Doolla & Bhatti
[4] Kundor
[5] Kishor
[6] Conduit
[7] Non-minimum phase system
[8] Doolla & Bhatti
[9] Yu

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]

فازی مقابله می‌کند. دروپ موقت شامل یک بهره همراه با مشتق‌گیر ثابت زمانی است. تابع انتقال جبران‌کننده افتی گذرا (TDC) عبارت است از (اولیورا[1] و همکاران، ۲۰۱۵، پتتی[2] و همکاران، ۲۰۱۲):

$$G_C(s)=\frac{\Delta X_G}{\Delta P_G}=\frac{1+T_R\,s}{1+\alpha T_R\,s} \qquad (۳)$$

که در آن ΔP_G تغییرات خروجی گاورنر آبی بدون جبران‌کننده و ΔX_G تغییرات میزان باز شدگی دریچه آب است. T_R زمان طولانی بازنشانی[3] میرا کننده مکانیکی است و مقدار آن بین ۲/۵ الی ۲۵ تغییر می‌کند. پارامتر α نسبت شیب موقتی افتی[4] (R_T) به شیب دائمی افتی[5] (R_P) است و هر دو به زمان عبور آب بستگی دارند. محدودهٔ تغییرات آن‌ها به ترتیب ۱-۰/۲ و ۰/۰۶-۰/۰۳ است. مقدار بهینه T_R و R_T با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شوند (کارسیز[6]، ۱۹۹۶):

$$T_R=T_W\,[5-0.5(T_W-1)] \qquad (۴)$$

$$R_T=\frac{T_W}{T_M}[2.3-0.15(T_W-1)] \qquad (۵)$$

که در آن T_M زمان شروع مکانیکی بوده و محدودهٔ تغییر آن بین ۶ تا ۱۲ است.

معادلات سیستم حلقه باز

شکل (٦) بلوک دیاگرام خطی یک سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت شامل تنظیم‌کننده ولتاژ، توربین، گاورنر و ماشین سنکرون را برای مطالعه پایداری سیگنال کوچک نشان می‌دهد. ثابت‌های K_1 الی K_6 به پارامترهای سیستم و نقطه کار ماشین سنکرون وابسته هستند. پارامترهای K_1 و K_2 از گشتاور الکتریکی تولیدشده ژنراتور، پارامترهای K_3 و K_4 از معادله ولتاژ تحریک و پارامترهای K_5 و K_6 از معادله ولتاژ ترمینال ژنراتور تعیین می‌شوند (لی و پارک[7]، ۱۹۹۸). توابع انتقال جرم چرخان و بار، گاورنر، جبران‌کننده و توربین به ترتیب $G_M(s)$، $G_G(s)$، $G_C(s)$ و $G_T(s)$ هستند. T'_{do} ثابت زمانی گذرای مدار باز، E_F ولتاژ تحریک دیده‌شده از آرمیچر، δ زاویه گشتاور، P_M گشتاور مکانیکی، ω_r سرعت روتور و ω_b سرعت زاویه‌ای مبنا هستند. تابع انتقال حلقه الکتریکی نسبت تغییرات گشتاور الکتریکی در اثر ولتاژ گذرای محور عرضی (E'_q) به تغییرات سیگنال ولتاژ مرجع یا سیگنال خروجی کنترل‌کننده تکمیلی را نشان می‌دهد (دی‌مارکو[8] و همکاران، ۲۰۱۳). با در نظر گرفتن مدل مرتبه سوم برای ماشین سنکرون و سیستم تحریک مرتبه اول نوع IEEE-DC1 با بهره K_A و ثابت زمانی T_A، معادلات خطی شده عبارت‌اند از (شاهقلیان[9]، ۲۰۰۹):

$$\frac{d}{dt}\Delta\delta=\omega_b\Delta\omega_r \qquad (۶)$$

$$\frac{d}{dt}\Delta\omega_r=-\frac{K_1}{J_M}\Delta\delta-\frac{K_D}{J_M}\Delta\omega_r-\frac{K_2}{J_M}\Delta E'_q+\frac{1}{J_M}\Delta P_M \qquad (۷)$$

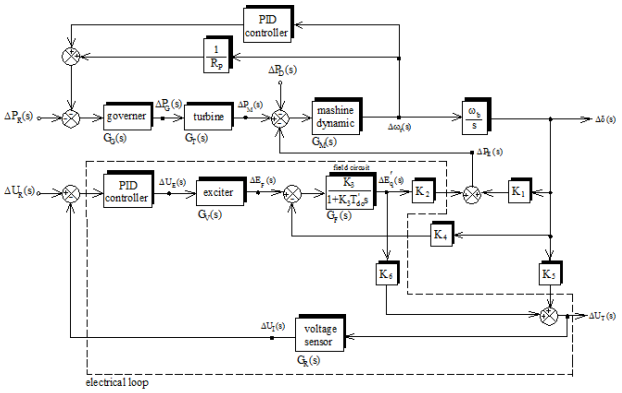
$$\frac{d}{dt}\Delta E'_q=-\frac{K_4}{T'_{do}}\Delta\delta-\frac{1}{K_3T'_{do}}\Delta E'_q+\frac{1}{T'_{do}}\Delta E_F \qquad (۸)$$

$$\frac{d}{dt}\Delta E_F=\frac{K_A}{T_A}\Delta U_R-\frac{K_AK_5}{T_A}\Delta\delta-\frac{K_AK_6}{T_A}\Delta E'_q-\frac{1}{T_A}\Delta E_F \qquad (۹)$$

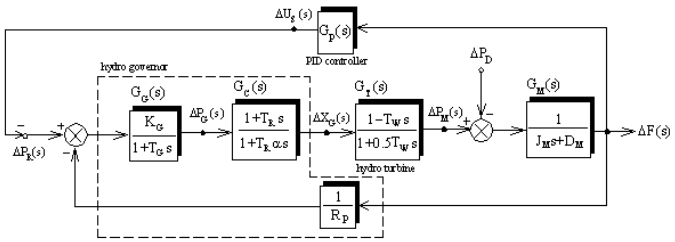
که در آن J_M ممان اینرسی ماشین سنکرون و K_D ضریب اصطکاک یا ضریب گشتاور میرا کننده هستند. شکل (۷) نمودار بلوکی یک واحد تولید با توربین آبی با کنترل‌کننده PID را نشان می‌دهد که در آن گاورنر دارای جبران ساز گذرای افتی است و ΔP_D تغییرات بار و ΔP_R تغییرات مرجع بار است.

[1] Oliveira
[2] Bhatti
[3] Resetting
[4] Temporary droop
[5] Permanent droop
[6] Garcez
[7] Lee & Park
[8] DeMarco
[9] Shahgholian

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]



شکل (۶): بلوک دیاگرام سیگنال کوچک سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت



شکل (۷): بلوک دیاگرام جداگانه واحد تولید با توربین آبی

سیستم قدرت بدون جبران‌کننده مرتبه سوم و سیستم قدرت با جبران‌کننده مرتبه چهارم هستند. با انتخاب متغیرهای حالت به‌صورت $x_1=\Delta f$، $x_2=\Delta P_M$، $x_3=\Delta X_G$ و $x_4=\Delta P_G$ و دو ورودی $u_1=\Delta P_D$ و $u_2=\Delta P_R$ معادله دیفرانسیل متغیرهای حالت عبارت‌اند از:

$$\frac{d}{dt}x_1=-\frac{1}{T_P}x_1+\frac{K_P}{T_P}x_2-\frac{K_P}{T_P}u_1 \qquad (۱۰)$$

$$\frac{d}{dt}x_2=\frac{2K_G}{\alpha R_P T_G}x_1-\frac{2}{T_W}x_2+\left(\frac{2}{T_W}+\frac{2}{\alpha T_R}\right)x_3+\frac{2}{\alpha}\left(\frac{1}{T_G}-\frac{1}{T_R}\right)x_4-\frac{2K_G}{\alpha T_G}u_2 \qquad (۱۱)$$

$$\frac{d}{dt}x_3=\frac{-K_G}{\alpha R_P T_G}x_1-\frac{1}{\alpha T_R}x_3+\frac{1}{\alpha}\left(\frac{1}{T_R}-\frac{1}{T_G}\right)x_4+\frac{K_G}{\alpha T_G}u_2 \qquad (۱۲)$$

$$\frac{d}{dt}x_4=-\frac{K_G}{T_G R_P}x_1-\frac{1}{T_G}x_4+\frac{K_G}{T_G}u_2 \qquad (۱۳)$$

که در آن K_G و T_G به ترتیب بهره و ثابت زمانی گاورنر هستند. سیستم حلقه باز مجهز به جبران‌کننده دارای چهار مقدار ویژه است و معادله مشخصه سیستم را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$\Delta_O(s)=s^4+p_3s^3+p_2s^2+p_1s+p_0 \qquad (۱۴)$$

که در آن ضرایب چندجمله‌ای p_0-p_3 به پارامترهای سیستم وابسته هستند:

$$p_0=\frac{K_C}{K_G}\left(1+\frac{K_G K_P}{R_P}\right) \qquad (۱۵)$$

$$p_1=\frac{1}{\alpha T_R}\left(\frac{2}{T_W T_P}+\frac{2}{T_W T_G}+\frac{1}{T_G T_P}\right)+\frac{2}{T_W T_G T_P}-\frac{2K_G K_P}{\alpha R_P T_G T_P}\left(\frac{1}{T_R}-\frac{1}{T_W}\right) \qquad (۱۶)$$

$$p_2=\left(\frac{1}{\alpha T_R}+\frac{1}{T_G}\right)\left(\frac{2}{T_W}+\frac{1}{T_P}\right)+\frac{2}{T_W T_P}+\frac{1}{\alpha T_G}\left(\frac{1}{T_R}-\frac{2K_G K_P}{T_R T_P}\right) \qquad (۱۷)$$

$$p_3=\frac{1}{\alpha T_R}+\frac{1}{T_G}+\frac{2}{T_W}+\frac{1}{T_P} \qquad (۱۸)$$

ضرایب p_0 و p_3 همیشه مثبت و ضرایب p_1 و p_2 می‌توانند منفی باشند. شرط لازم برای پایداری، مثبت بودن ضریب p_1 و p_2 است. با توجه به محدودهٔ تغییرات T_W، ضریب p_1 همیشه مثبت خواهد بود.

توابع انتقال حلقه باز سیستم واحد تولیدی

با توجه به بلوک دیاگرام مستقل واحد تولید با توربین آبی بدون کنترل‌کننده، تغییرات فرکانس بر اساس دو ورودی عبارت است از:

$$\Delta F(s)=H_{PR}(s)\Delta P_R(s)-H_{FD}(s)\Delta P_D(s) \qquad (۱۹)$$

که در آن $H_{PR}(s)$ و $H_{FD}(s)$ به ترتیب نسبت تغییرات فرکانس به تغییرات توان مبنا و تغییرات بار مصرفی است. تابع انتقال تغییرات فرکانس نسبت به تغییرات مرجع بار برای طراحی سیستم کنترل اهمیت دارد و برابر است با:

$$H_{PR}(s)=\frac{\Delta F(s)}{\Delta P_R(s)}=\frac{K_C}{\Delta_O(s)}(1+T_R s)(1-T_W s) \qquad (۲۰)$$

که در آن ثابت K_C تابعی از بهره‌ها و ثابت زمانی‌های سیستم است و برابر است با:

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]

$$K_C = \frac{2K_G K_P}{\alpha T_G T_R T_W T_P} \quad (۲۱)$$

تابع انتقال مدار باز سیستم دارای دو صفر در $1/T_W$ و $-1/T_R$ است. تابع انتقال تغییرات فرکانس نسبت به تغییرات توان مرجع عبارت است از:

$$H_{FD}(s) = \frac{\Delta F(s)}{\Delta P_D(s)} = \frac{K_C}{K_G \Delta_O(s)}(1+T_G s)(1+0.5T_W s)(1+\alpha T_R s) \quad (۲۲)$$

اگر تغییرات بار به‌صورت پله‌ای در نظر گرفته شود، مقدار حالت دائمی تغییرات فرکانس مستقل از ثابت‌های زمانی T_W و T_G است و برابر است با:

$$\Delta f(\infty) = \lim_{s\to 0} \Delta F(s) = -\frac{R_P}{R_P + K_G K_P} \quad (۲۳)$$

کنترل‌کننده PID

تابع انتقال تغییرات فرکانس نسبت به تغییرات بار در سیستم حلقه بسته برابر است با:

$$H_C(s) = \frac{\Delta F(s)}{\Delta P_D(s)} = \frac{-H_{FD}(s)}{1+H_{FD}(s)G_P(s)} \quad (۲۴)$$

که در آن $G_P(s)$ تابع انتقال کنترل‌کننده سه ترمی متناسب-انتگرال گیر- مشتق گیر (PID) است. کنترل‌کننده PID یک صفر در مبدأ به تابع انتقال اضافه می‌کند. بنابراین بدون توجه به مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده PID، خطای دائمی فرکانس با اضافه شدن کنترل‌کننده به صفر میل می‌کند. با اضافه شدن کنترل‌کننده PID، مقادیر ویژه حلقه بسته از رابطهٔ زیر تعیین می‌شوند:

$$1 + H_{FD}(s)G_P(s) = 0 \quad (۲۵)$$

بنابراین معادله مشخصه حلقه بسته سیستم عبارت است از:

$$\begin{aligned}\Delta_C(s) &= s^5 + (p_3 - K_C K_D T_R T_W)s^4 \\ &+ [p_2 + K_C K_D (T_R - T_W) - K_C K_P T_R T_W]s^3 \\ &+ [p_1 + K_C K_D - K_C K_I T_R T_W + K_C K_P (T_R - T_W)]s^2 \\ &+ [p_0 + K_C K_P + K_C K_I (T_R - T_W)]s \\ &+ K_C K_I\end{aligned} \quad (۲۶)$$

که در آن بهره متناسب، انتگرال گیر و مشتق گیر کنترل‌کننده PID به ترتیب K_P، K_I و K_D است. بنابراین شرط لازم پایداری سیستم حلقه بسته با صرف‌نظر از بهره متناسب کنترل‌کننده عبارت است از:

$$K_D < min\left(\frac{p_3}{K_C T_R T_W}, \frac{p_2}{K_C(T_W - T_R)}\right) \quad (۲۷)$$

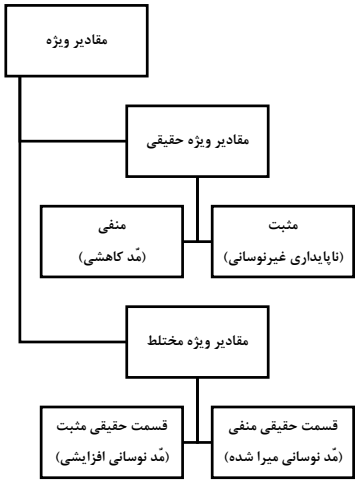
$$K_I < \frac{p_0}{K_C(T_W - T_R)} \quad (۲۸)$$

اگر بهره مشتق گیر کنترل‌کننده برابر صفر باشد، شرط لازم پایداری سیستم قدرت عبارت است از:

$$K_I < min\left(\frac{p_1}{K_C T_R T_W}, \frac{p_0}{K_C(T_W - T_R)}\right) \quad (۲۹)$$

آنالیز مقادیر ویژه سیستم

نمودار شکل (۸) اثر مقدار ویژه بر پاسخ اغتشاش کوچک (پایداری سیگنال کوچک) را نشان می‌دهد. مقدار ویژه حقیقی، متناظر با مد غیر نوسانی است. مقدار ویژه حقیقی منفی نشان‌دهندهٔ مد کاهشی بوده که نوسان میرا شده است. مقدار ویژه حقیقی مثبت نشان‌دهندهٔ ناپایداری غیر نوسانی است که نوسان با دامنهٔ افزایشی است. مقدار ویژه مختلط ($\lambda=\sigma\pm j\omega$) به‌صورت جفت مزدوج است و هر جفت متناظر با یک مد نوسانی است. قسمت حقیقی منفی نشان‌دهندهٔ نوسان میرا شده و قسمت حقیقی مثبت نشان‌دهندهٔ نوسان با دامنهٔ افزایشی است.



شکل (۸): آنالیز مقادیر ویژه برای بررسی پایداری سیگنال کوچک

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]

پارامترهای سیستم قدرت با توربین آبی برای شبیه‌سازی و طراحی کنترل‌کننده PID مطابق جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود. مقادیر ویژه سیستم حلقه باز ۰/۲۱۴۶-، ۶/۲۰۰۴- و ۰/۳۸۸۸±j۰/۷۳۱۴- هستند. ضریب میرایی مد نوسانی ۰/۴۶۹۴ و فرکانس آن ۰/۱۳۱۸ هرتز است؛ بنابراین سیستم حلقه باز پایدار است ولی افت فرکانس در حالت دائمی وجود دارد.

جدول (۱): پارامترهای نامی سیستم

Typical values	Parameters
5.00	reset time (T_R)
0.20	governor time constant (T_G)
1.00	governor gain (K_G)
1.00	water starting time (T_W)
0.05	permanent droop (R_P)
0.38	transient droop (R_T)
6	inertia constant (J_M)
1	damping constant (D_M)

افزایش T_W تأثیر چندانی بر ضریب میرایی مد نوسانی ندارد ولی قطب حقیقی با افزایش T_W به محور موهومی نزدیک‌تر می‌شود و سرعت میرایی پاسخ پله را کمتر و زمان استقرار پاسخ را زیاد می‌کند. با افزایش T_W پاسخ حالت دائمی فرکانس تغییری نمی‌کند ولی افت فرکانس در زمان‌های اولیه را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش T_W باعث کاهش درصد بالا زدگی و زمان خیز تغییرات توان مکانیکی توربین می‌گردد.

با افزایش مقدار R_P میرایی مد نوسانی خیلی کم افزایش پیدا می‌کند و قطب حقیقی غالب به محور موهومی نزدیک می‌شود. تغییر R_P بر افت اولیه فرکانس و بالا زدگی پاسخ پله تأثیری ندارد ولی با افزایش R_P افت فرکانس در حالت دائمی بیشتر می‌شود. هرچه مقدار ثابت تنظیم سرعت کمتر باشد، سیستم سریع‌تر پایدار شده و باعث کاهش خطای فرکانس می‌گردد. با افزایش R_P در سیستم قدرت با جبران‌کننده نسبت به سیستم قدرت بدون جبران‌کننده زمان خیز و اوج پاسخ افزایش یافته و پاسخ نوسان کمتری دارد.

همان‌طور که دیده شد در سیستم قدرت با جبران‌کننده دو مقدار ویژه حقیقی منفی یکی نزدیک محور موهومی و مؤثر در پاسخ سیستم و دیگری دور از محور موهومی با تأثیر کم در پاسخ و یک جفت مقدار ویژه مزدوج (مد نوسانی) نزدیک محور موهومی با تأثیر زیاد در پاسخ وجود دارد.

در جدول (۲) پارامترهای کنترل‌کننده PID، نشان داده شده است. مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته ۰/۱۸۶۲-، ۱/۶۳۵۷±j۲/۰۲۰۵- و ۰/۲۳۷۱± j۰/۳۴۱۴- هستند. ضریب میرایی مدهای نوسانی به ترتیب ۰/۶۲۹۲ و ۰/۵۷۰۴ و فرکانس آن‌ها به ترتیب ۰/۴۱۳۷ و ۰/۰۶۶۲ هرتز هستند.

جدول (۲): پارامترهای کنترل‌کننده

Typical values	Parameters
2	proportional gain (K_P)
5	integral gain (K_I)
15	derivative gain (K_D)

اگر R_P برابر ۰/۰۴۵ در نظر گرفته شود، مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته ۱/۷۷۶۰±j۱/۷۳۸۷-، ۰/۲۶۰۱±j۰/۳۲۴۶- و ۰/۱۸۳۱- هستند. همچنین ضریب میرایی مدهای نوسانی به ترتیب ۰/۷۱۴۶ و ۰/۶۲۵۳ و فرکانس آن‌ها به ترتیب ۰/۳۹۵۶ و ۰/۰۶۶۲ هرتز خواهند بود. همان‌طور که دیده می‌شود کاهش R_P باعث افزایش ضریب میرایی و کاهش نوسان مد نوسانی شده است.

جدول‌های (۳) و (۴) مدهای سیستم قدرت مجهز به جبران‌کننده گذرای افتی همراه با کنترل‌کننده PID را به ازای بهره‌های مختلف مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر کنترل‌کننده به ترتیب نشان می‌دهند.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]

جدول (۳): مدهای سیستم قدرت مجهز به جبران‌کننده گذرای K_D=15 و K_P=2 با بهره‌های PIDافتی و کنترل‌کننده

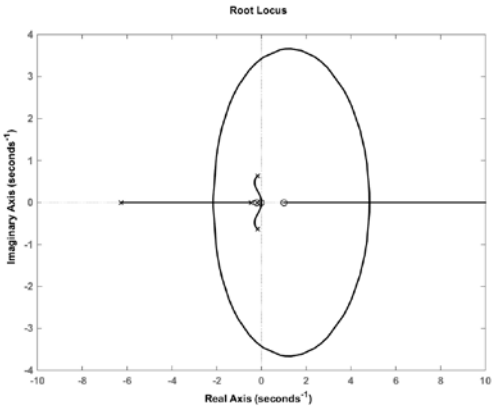
F	η	System mode	K_I
0.3982	0.6052	-1.5143±j1.9917 -0.6273 -0.2272 -0.0487	1
0.4333 0.0873	0.6478 0.1911	-1.7636±j2.0738 -0.1048±j0.5384 -0.1950	10

جدول (۴): مدهای سیستم قدرت مجهز به جبران‌کننده گذرای K_I=5 و K_P=2 با بهره‌های PIDافتی و کنترل‌کننده

F	η	System mode	K_D
0.3463 0.0792	0.9796 0.5732	-2.1314±j0.4370 -0.2853±j0.4079 -0.1853	10
0.4639 0.0589	0.3858 0.5526	-1.1246±j2.6891 -0.2044±j0.3083 -0.1870	20

افزایش بهره انتگرال‌گیر باعث نوسانی شدن پاسخ تغییرات فرکانس می‌شود و مقدار تغییرات بین کمینه و بیشینه فرکانس را افزایش می‌دهد. همچنین تأثیر چندانی بر افت اولیه فرکانس و توان مکانیکی ندارد ولی باعث افزایش درصد بالا زدگی توان مکانیکی می‌گردد.

با افزایش بهره مشتق‌گیر، افت اولیه فرکانس پس از اعمال بار بیشتر است ولی تغییرات توان مکانیکی افت کمتری دارد. شکل (۹) مکان هندسی ریشه‌های معادله مشخصه را به ازای تغییرات بهره مشتق گیر کنترل‌کننده نشان می‌دهد.



شکل (۹): مکان هندسی ریشه‌های معادله مشخصه به ازای تغییرات بهره مشتق‌گیر کنترل‌کننده

آنالیز پاسخ دینامیکی

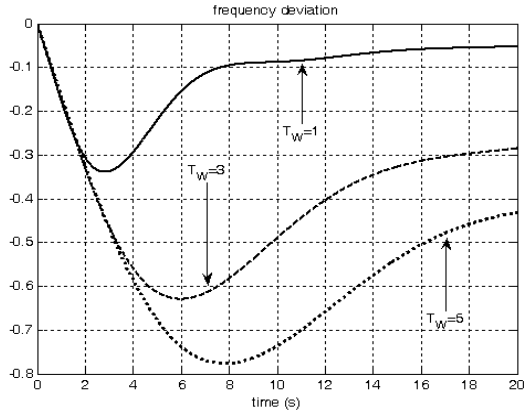
در این قسمت پاسخ دینامیکی تغییرات فرکانس به ازای تغییرات پله‌ای بار و تغییرات پله‌ای توان مبنا برای سیستم مجهز به جبران‌کننده و بدون کنترل‌کننده، تغییرات پله‌ای بار سیستم مجهز به جبران‌کننده با کنترل‌کننده PID و کنترل‌کننده متداول انتگرالی نشان داده می‌شود و تأثیر تغییر پارامترهای کنترل‌کننده بررسی می‌شود.

سیستم بدون کنترل‌کننده

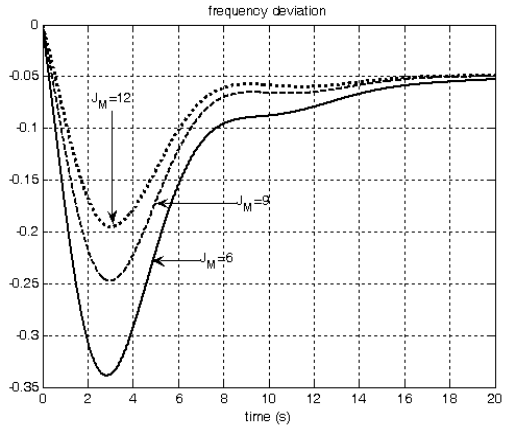
شکل (۱۰) تأثیر زمان شروع آب و شکل (۱۱) تأثیر ممان اینرسی را بر تغییرات فرکانس در سیستم قدرت بدون کنترل‌کننده را به ازای تغییرات پله‌ای بار نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود افزایش T_W باعث کاهش بیشتر فرکانس در لحظه اول شده و زمان رسیدن پاسخ به حالت دائمی را افزایش می‌دهد. ولی افزایش J_M باعث کاهش افت اولیه فرکانس شده و تأثیر چندانی بر رسیدن پاسخ به حالت دائمی نمی‌گردد.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]



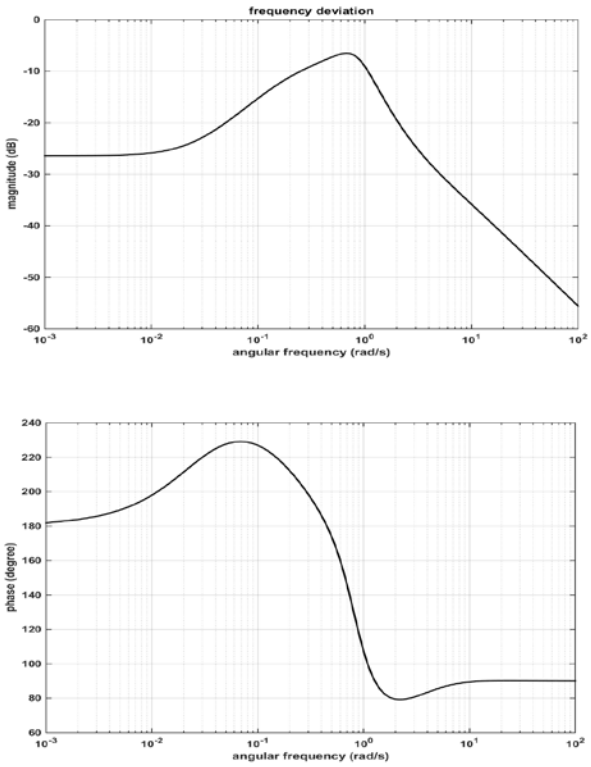
شکل (۱۰): تأثیر زمان شروع آب بر تغییرات فرکانس به ازای ورودی پله‌ای توان مصرفی بار



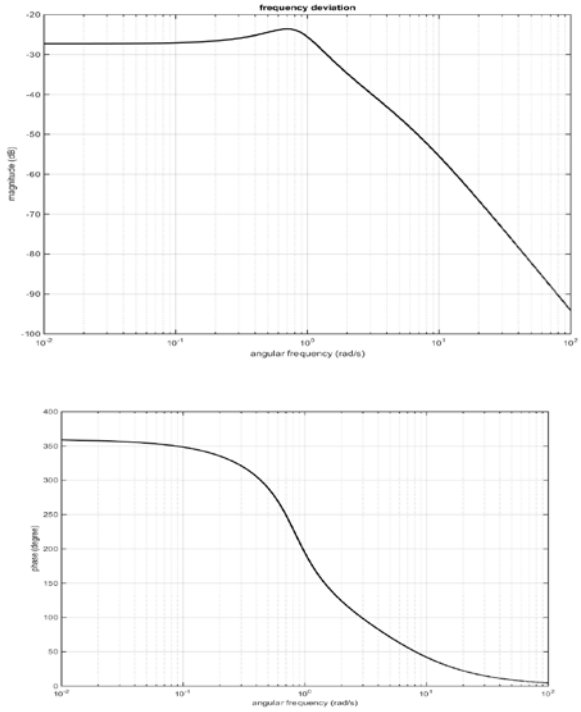
شکل (۱۱): تأثیر ممان اینرسی بر تغییرات فرکانس به ازای ورودی پله‌ای توان مصرفی بار

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب پاسخ فرکانسی تابع انتقال نسبت تغییرات فرکانس به تغییرات بار مصرفی و تغییرات توان مبنا در سیستم قدرت بدون کنترل‌کننده برای پارامترهای نامی سیستم را نشان می‌دهد.

شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب تغییرات فرکانس و تغییرات توان مکانیکی توربین را به ازای تغییرات پله‌ای بار و شکل‌های (۱۶) و (۱۷) به ترتیب تغییرات فرکانس و تغییرات توان توربین را به ازای تغییرات پله‌ای توان مبنا برای پارامترهای نامی سیستم نشان می‌دهند.



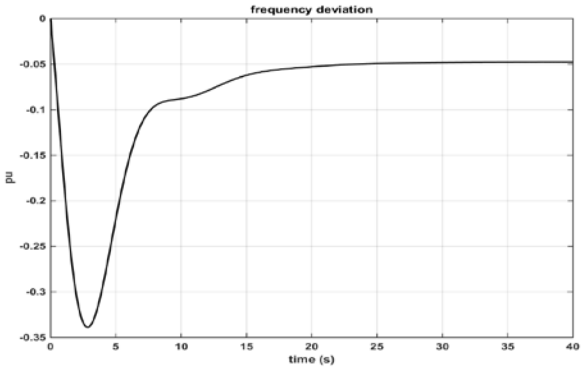
شکل (۱۲): پاسخ فرکانسی تابع انتقال تغییرات فرکانس به تغییرات توان مصرفی بار



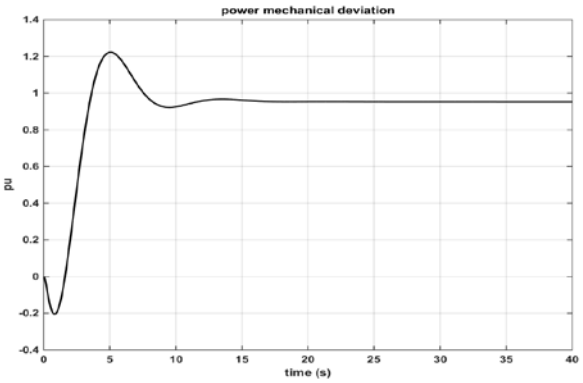
شکل (۱۳): پاسخ فرکانسی تابع انتقال تغییرات فرکانس به تغییرات توان مکانیکی خروجی توربین

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

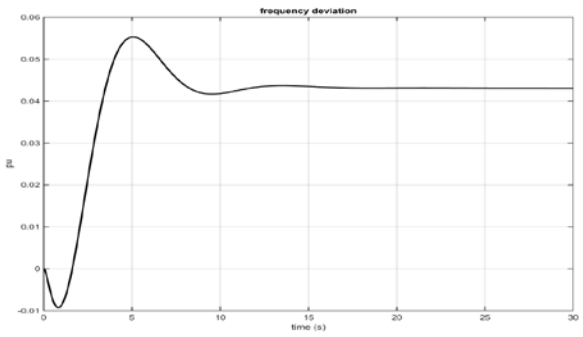
[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]



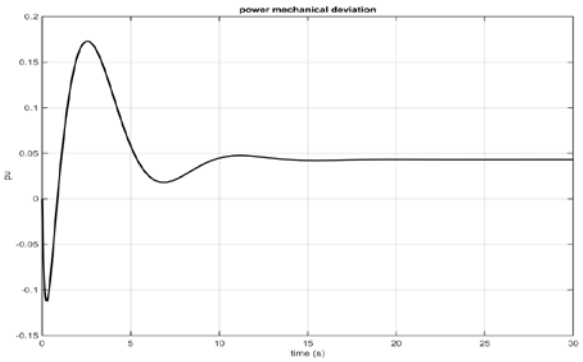
شکل (۱۴): پاسخ پله تغییرات فرکانس به ازای تغییرات پله‌ای بار



شکل (۱۵): پاسخ پله تغییرات توان مکانیکی خروجی توربین به ازای تغییرات پله‌ای بار



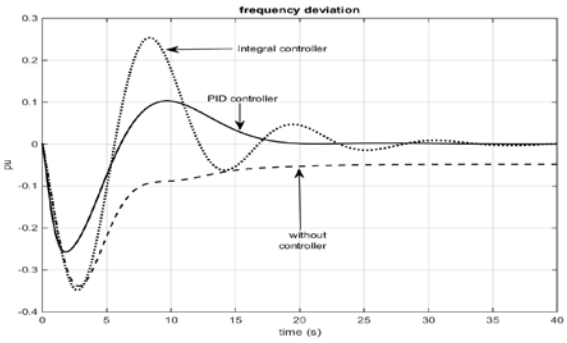
شکل (۱۶): پاسخ پله تغییرات فرکانس به ازای تغییرات پله‌ای توان مبنا



شکل (۱۷): پاسخ پله تغییرات توان مکانیکی خروجی توربین به ازای تغییرات پله‌ای توان مبنا

ب- مقایسه پاسخ سیستم با کنترل‌کننده‌های مختلف

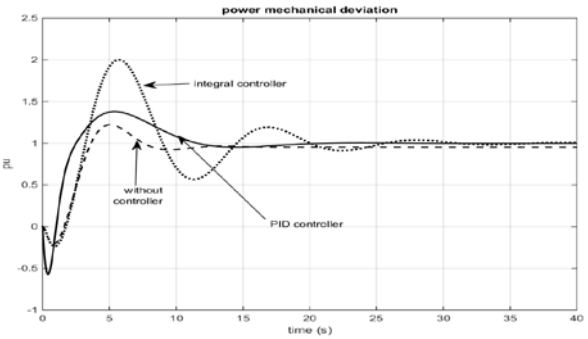
تأثیر کنترل‌کننده PID بر پاسخ دینامیکی تغییرات فرکانس و پاسخ دینامیکی تغییرات توان مکانیکی خروجی توربین در شکل (۱۸) و شکل (۱۹) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش ناگهانی بار، فرکانس شروع به کاهش می‌کند. در این حالت سرعت عملکرد کنترل‌کننده PID نسبت به کنترل‌کننده انتگرالی بیشتر بوده و سریع‌تر وارد عمل می‌شود و خطای فرکانس را سریع‌تر به صفر می‌رساند. شکل (۲۰) پاسخ سیگنال خروجی کنترل‌کننده را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود پاسخ دینامیکی با کنترل‌کننده پیشنهادی بهتر از پاسخ دینامیکی سیستم با کنترل‌کننده متداول انتگرال‌گیر است.



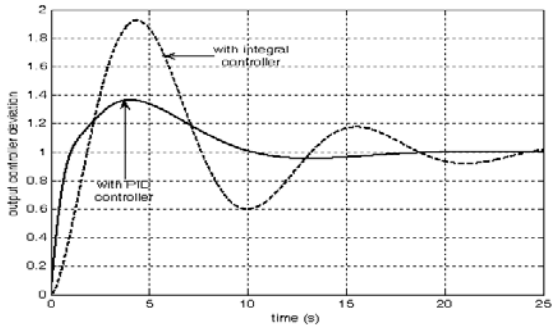
شکل (۱۸): تأثیر کنترل‌کننده بر پاسخ تغییرات فرکانس به ازای تغییرات پله‌ای بار

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]



شکل (۱۹): تأثیر کنترل‌کننده بر پاسخ تغییرات توان مکانیکی خروجی توربین به ازای تغییرات پله‌ای بار



شکل (۲۰): تأثیر کنترل‌کننده بر پاسخ تغییرات سیگنال خروجی کنترل‌کننده به ازای تغییرات پله‌ای بار

نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر جبران‌کننده در پاسخ سیستم کنترل فرکانس با توربین آبی در اثر تغییرات آرام بار حول نقطه کار با آنالیز مقادیر ویژه و ارائه نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد. سیستم توربین آبی بدون جبران‌کننده، با سیستم مرتبه دوم و با جبران-کننده، با سیستم مرتبه سوم معادل‌سازی شد. همچنین پاسخ تغییرات فرکانس نسبت به زمان در توربین آبی با جبران‌کننده دارای زمان اوج و زمان خیز بیشتری نسبت به زمانی است که جبران‌کننده در سیستم قرار ندارد و افت فرکانس در حالت دائمی بیشتر است. کنترل‌کننده PID نسبت به کنترل‌کننده متداول انتگرالی با تغییرات کم در خروجی کنترل‌کننده، دارای سرعت بیشتری برای به صفر رساندن خطای دائمی فرکانس است.

مراجع

1- Bhatt, P., Ghoshal, S. P. and Roy, R. (2012). “Coordinated control of TCPS and SMES for frequency regulation of interconnected restructured power systems with dynamic participation from DFIG based wind farm.” *Renewable Energy*. 40(1), 40-50.

2- Bhatt, P., Ghoshal, S. P. and Roy, R. (2012). “Load frequency stabilization by coordinated control of thyristor controlled phase shifters and superconducting magnetic energy storage for three types of interconnected two-area power systems.” *Electrical Power and Energy Systems*. 32(10), 1111–1124.

3- Borkowski, D. and Wegiel, T. (2013). "Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed." *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 28(2), 452-459.

4- Chen, D., Ding, C., Ma, X., Yuan, P. and Ba, D. (2013). “Nonlinear dynamic analysis of hydro-turbine governing system with a surge tank.” *Appllied Mathematical Modelling*. 37(14-15), 7611-7623.

5- DeMarco,F., Martins, N. and Ferraz, J. C. R. (2013). “An automatic method for power system stabilizers phase compensation design.” *IEEE Transactions on Power Systems*. 28(2), 997-1007.

6- Doolla, S. and Bhatti, T. S. (2006). “Automatic generation control of an isolated small-hydro power plant.” *Electric Power Systems Research*. 76(9-10), 889-896.

7- Doolla, S. and Bhatti, T. S. (2006). “Load frequency control of an isolated small-hydro power plant with reduced dumped load.” *IEEE Trans. on Power Systems*. 21(4), 1912–1919.

8- Faiz, J., Shahgholian, Gh. and Arezoomand, M. (2007). “Analysis and simulation of the AVR system and parameters variation effects.” *Proceeding of the IEEE/POWRENG*, 450-453, Setubal, Portugal, April 2007.

9- Garcez, J. N. and Garcez, A. (1996). “A connectionist approach to hydro turbine speed

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]

19- Mansoor, S. P., Jones, D. I., Bradley, D. A., Aris, F. C. and Jones, G. R. (1998). “Stability of a pump storage hydro power station connected to a power system.” *Proceeding of the IEEE / Power Engineering Society Winter Meeting*. 1, 646-650.

20- Natarajan, K. (2005). “Robust PID controller design for hydro turbines.” IEEE Transactions on Energy Conversion. 20(3), 661-667.

21- Oliveira, E. J., Honorio, L. M., Anzai, A. H., Oliveira, L. W. and Costa, E. B. (2015). “Optimal transient droop compensator and PID tuning for load frequency control in hydro power systems.” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 68, 345-355.

22- Onsivilal, A. and Marungsri, B. (2008). “Stability enhancement for multi-machine power system by optimal PID tuning of power system stabilizer using particle swarm optimization.” *WSEAS Transactions on Power System*. 6(3), 465-474.

23- Padhan, D. G. and Majhi, S. (2013). “A new control scheme fpr PID load frequency controller of single-area and multi-area power systems.” *ISA Transactions*.. 52(2), 242-251.

24- Pothiya, S., Ngamroo, I., Runggeratigul, S. and Tantaswadi, P. (2006). “Design of optimal fuzzy logic based PI controller using multiple tabu search algorithm for load frequency control.” *International Journal of Control, Automation, and Systems*. 4(2), 155-164.

25- Rueda, J. L. and Colome, D. G. (2009). “Probabilistic performance indexes for small signal stability enhancement in weak wind-hydro-thermal power systems.” .” *IET Generation, Transmission and Distribution*. 3(8), 733–747.

26- Shabib, G. (2012). “Implementation of a discrete fuzzy PID excitation controller for power system damping.” *Ain Shams Engineering Journal*. 3, 123-131.

27- Shahgholian, Gh. (2009). “Development of state space model and control of the STATCOM for improvement of damping in a single-machine infinite-bus.” *International Review of Electrical Engineering*. 4(6), 1367-1375.

control parameters tuning using artificial neural network.” *Proceeding of the IEEE/MWSCAS*. 2, 641-644.

10- Ha, Q. P. and Trinh, H. (2000). “A variable structure -based controller with fuzzy tuning for load-frequency control.” *International Journal of Power and Energy Systems*. 20(3), 146-154.

11- Jiang, C., Ma, Y. and Wang, C. (2006). “PID controller parameters optimization of hydro-turbine governing systems using deterministic-chaotic-mutation evolutionary programming (DCMEP).” *Energy Conversion and Management*. 47(9-10), 1222-1230.

12- Khodabakhshian, A. and Hooshmand, R. (2012). “A new PID controller design for automatic generation control of hydro power systems.” *Electrical Power and Energy Systems*. 32(5), 375–382.

13- Kishor, N., Saini, R. P. and Singh, S. P. (2007). “A review on hydropower plant models and control.” *Renewable and Sustainable Energy Review*. 11(5), 776-796.

14- Kishor, N., Saini, R. P. and Singh, S. P. (2005). “Optimal pole shift contol in application to a hydro power plant.” *Journal of Electrical Engineering*. 56(11-12), 290–297.

15- Kishor, N., Singh, S. P., and Raghuvanshi, A. S. (2006). “Dynamic simulation of hydro turbine and its state estimation based LQ control.” *Energy Conversion and Management*. 47(18-19), 3119-3137.

16- Kundur, P. (1994). “Power system stability and control.” *Mc-Graw Hill, New Hopkins University Press*.

17- Lee, S. S. and Park, J. K. (1998). “Design of reduced order observer based variable structure power system stabilizer for unmeasurable state variables.” *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution.* 145(5), 525-530.

18- Malik, O. P. and Zeng, Y. (1995). “Design of a robust adaptive controller for a water turbin governing system.” IEEE Transactions on Engrgy Conversion. 10(2), 354-359.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]

28- Shahgholian, Gh., Shafaghi, P. and Mahdavi-Nasab, H. (2012). “A comparative analysis and simulation of ALFC in single area system for different turbines.” *Proceeding of the IEEE/ICECT*. pp. 50-54, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2010.

29- Shahgholian, Gh., Yazdekhasti, S. and Shafaghi, P. (2009). “Dynamic analysis and stability of the load frequency control in two area power system with steam turbine.” *Proceeding of the IEEE/ICCEE*. pp. 40-46, Dubai, Dec. 2009.

30- Singh, B., Murthy, S. S., Chilipi, R. R., Madishetti, S. and Bhuvaneswari, G. (2014). “Static synchronous compensator-variable frequency drive for voltage and frequency control of small-hydro driven self-excited induction generators system.” *IET Generation, Transmission and Distribution*. 8(9), 1528–1538.

31- Singh, G. and Chauhan, D. S. (2012). “Simulation and modeling of hydro power plant to study time response during different gate states.” *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies*. 1(10), 42-47.

32- Sondhi, S. and Hote, Y. V. (2014). “Fractional order PID controller for load frequency control.” *Energy Conversion and Management*. 85(September 2014), 343–353.

33- Tan, W. (2010). “Unified tuning of PID load frequency controller for power systems via IMC.” *IEEE Transactions on Power Systems*. 25(1), 341-350.

34- Tushir, M. and Srivastava, S. (2012). “Application of a hybrid controller in load frequency control of hydro-thermal power System.” *Proceeding of the IEEE/PIC*. pp. 1-5, Murthal.

35- Venayagamoorthy, G. K. and Harley, R. G. (2002). “Two separate continually online trained neurocontrollers for excitation and turbine control of a turbogenerator.” *IEEE Transactions on Industrial Applications*. 38(3), 887-893.

36- Vrdoljak, K., Peric, N. and Petrovic, I. (2010). “Sliding mode based load-frequency control in power systems.” *Electrical Power Systems Research*. 80(5), 514–527.

37- Working Group on Prime Mover and Supply Models for System Dynamic Performance Studies. (1992). “Hydraulic turbine and tnd turbine control models for system dynamic studies.” *IEEE Transactions on Power Systems*. 7(1), 167-179.

38- Mi, Y., Fu, Y., Wang, C. and Wang, P. (2013). “Decentralized sliding mode load frequency control for multi-area power systems.” *IEEE Transactions on Power Systems*. 28(4), 4301-4309.

39- Yazdizadeh, A., Ramezani, M. H. and Hamedrahmat, E. (2012). “Decentralized load frequency control using a new robust optimal MISO PID controller.” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 35(1), 57–65.

40- Yousef, H. A., AL-Kharusi, K., Albadi, M. H. and Hosseinzadeh, N. (2014). “Load frequency control of a multi-area power system: An adaptive fuzzy logic approach.” IEEE Transactions on Power Systems. 29(4), 1822-1830.

41- Yu,Y. (1983). “Electric power system dynamics.” *Academic Press*.

42- Zhang, H., Chen, D., Xu, B. and Wang, F. (2015). “Nonlinear modeling and dynamic analysis of hydro-turbine governing system in the process of load rejection transient.” *Energy Conversion and Management*. 90, 128-137.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1394.2.5.2.7]