



Technovations in Electrical Engineering & Green Energy System

Research Article

(2022) 1(3):17-26

Studying and Simulating the Production Unit System with Hydro Turbine and Investigating the Effect of Transient Droop Compensation on the System Dynamic Behavior

Homa Movahednejad¹, Assistant Professor, S. Mohammadali Zanjani^{2,3}, Majid Moazzami^{2,3}, Associate Professor, Ghazanfar Shahgholian^{2,3}, Associate Professor

¹Department of Computer Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

²Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

³Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract:

One of the important components and rotating equipment in the hydroelectric power plant is the hydro turbine. The rotation of the turbine converts the potential energy in the water into mechanical energy, and then the mechanical energy is converted into electrical energy by the generator. In this paper, the aim is to study the dynamic behavior of a production unit system with a water turbine and to investigate the effect of the loss compensator on the dynamic behavior of the system. In water units, a drop transient compensator is used for stable operation of speed control. The equations of the system are expressed in the state space and the real and oscillatory modes are determined using the system matrix. The simulation results show the stable state of the system due to step changes in the consumption load using the transient compensator. Also, bode diagrams confirm the transfer function of the system's frequency deviation in relation to the changes in the system's steady state load.

Keywords: Hydro turbine, transient droop compensation, load changes, transient response

Received: 25 March 2022

Revised: 28 June 2022

Accepted: 24 July 2022

Corresponding Author: Dr. S. Mohammadali Zanjani, sma_zanjani@pel.iaun.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1963559.1024>





...مقاله پژوهشی...

فناوری های نوین در مهندسی برق و سیستم انرژی سبز

مطالعه و شبیه سازی سیستم واحد تولید با توربین آبی و بررسی تاثیر جبران ساز گذرای افی بر رفتار دینامیکی سیستم

هما موحدنژاد^۱، استاد یار، سید محمدعلی زنجانی^{۲،۴}، استاد یار، مجید معظمی^۳، دانشیار، غضنفر شاهقلیان^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۳- مرکز تحقیقات ریزشبکه های هوشمند، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

چکیده: یکی از اجزای مهم و تجهیزات دوار در نیروگاه برق آبی، توربین آبی است. چرخش توربین باعث تبدیل انرژی پتانسیل موجود در آب به انرژی مکانیکی شده و سپس انرژی مکانیکی توسط ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. در این مقاله هدف مطالعه رفتار دینامیکی یک سیستم واحد تولید با توربین آبی و بررسی اثر جبران ساز افی بر رفتار دینامیکی سیستم است. در واحدهای آبی از جبران ساز گذرای افی برای عملکرد پایدار کنترل سرعت استفاده می شود. معادلات سیستم در فضای حالت بیان شده و مدهای حقیقی و نوسانی با استفاده از ماتریس سیستم تعیین شده است. نتایج شبیه سازی در اثر تغییرات پله ای در بار مصرفی حالت پایدار سیستم با استفاده از جبران ساز گذرای افی را نشان می دهند. همچنین نمودارهای بود تابع انتقال انحراف فرکانس سیستم نسبت به تغییرات بار مصرفی حالت پایدار سیستم را تایید می کنند.

واژه های کلیدی: توربین آبی، جبران ساز گذرای افی، تغییرات بار، پاسخ گذرا

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۰۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

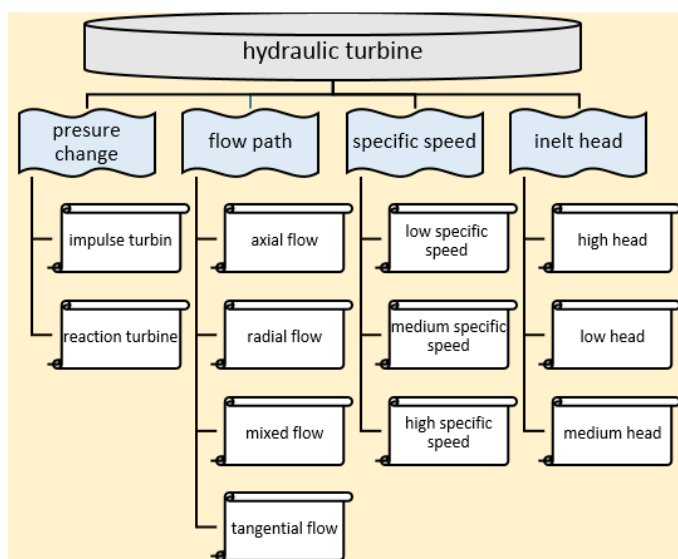
نویسنده مسئول: دکتر سید محمدعلی زنجانی، sma_zanjani@pel.iaun.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1963559.1024>



سیستم قدرت الکتریکی یک سیستم چندمتغیره در مقیاس بزرگ، پیچیده، غیرخطی و درجه بالا بوده که قادر به تولید، انتقال و توزیع برق در یک منطقه وسیع است [۱،۲]. انرژی برق در مقیاس وسیع با راندمان زیاد قابل ذخیره‌سازی نیست و لذا یکی از شرایط اصلی بهره‌برداری ایجاد تعادل بین تقاضا و مصرف شبکه در هر لحظه است. تشخیص و شناسایی یک وضعیت اضطراری سیستم قدرت برای استفاده کامل از قابلیت کنترل برای کاهش موارد اضطراری ضروری است [۳،۴]. در طول سال‌های متمادی منابع انرژی از مهمترین عوامل حیات اقتصادی صنعتی و علمی کشورها محسوب می‌شود. نیاز جهان به انرژی در طی سال‌های اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است و منابع انرژی‌های فسیلی پاسخگوی این نیاز برای تکامل و توسعه در آینده نیستند [۵،۶].

کشور ایران بزرگترین تولیدکننده برق منطقه خاورمیانه و جزء بیست کشور بزرگ تولید برق در جهان است. انرژی برق مورد نیاز کشور توسط نیروگاه‌های وابسته به وزارت نیرو، صنایع بزرگ و بخش خصوصی متشکل از نیروگاه‌های حرارتی (شامل نیروگاه بخاری، نیروگاه گازی، نیروگاه سیکل ترکیبی، نیروگاه دیزلی و نیروگاه هسته‌ای)، نیروگاه آبی، نیروگاه بادی و نیروگاه خورشیدی تامین می‌شود. در نیروگاه آبی از انرژی پتانسیل آب انباشته شده در پشت سدها یا انرژی جریان آب رودخانه‌ها جهت تولید انرژی در توربین آبی استفاده می‌شود [۷،۸]. توربین‌های آبی بر اساس نوع طبقات به توربین با طبقات عکس‌العملی و توربین با طبقات ضربه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. تغییرات قدرت و ساختمان انواع توربین‌های آبی (پلتون ۲، فرانسیس ۳، کاپلان ۴) به ارتفاع ریزش آب بستگی دارند ولی دارای مشخصه پاسخ دهی یکسان هستند. مشخصه‌های ستون آبی شامل تاثیر لختی آب، تراکم آب و قابلیت ارتجاع دیواره‌ی کانال (آبگذر) آب بر عملکرد توربین آبی تاثیر دارند [۹،۱۰]. شکل (۱) تقسیم‌بندی توربین‌های آبی بر حسب سرعت، مسیر فلو، تغییر فشار و ارتفاع را نشان می‌دهد.



شکل (۱): تقسیم‌بندی انواع توربین‌های آبی

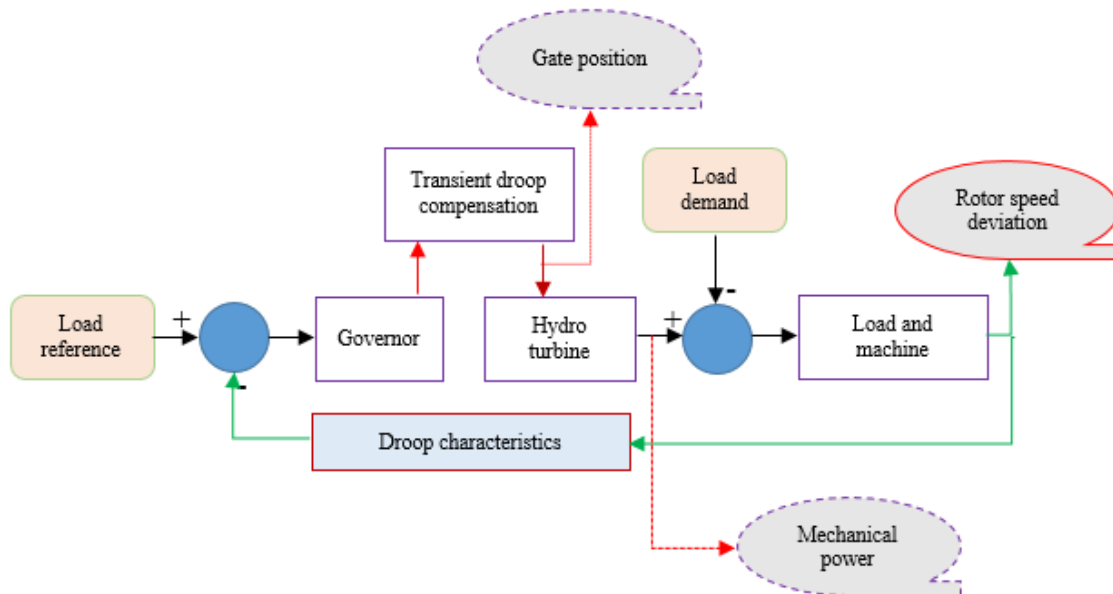
تاکنون مطالعاتی مختلفی در زمینه کاربرد و مدل‌سازی توربین آبی در نیروگاه‌ها انجام شده است [۱۱-۱۷]. کنترل فرکانس بار سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای بهم پیوسته حاوی فتوولتائیک و سیستم ذخیره‌سازی انرژی در [۱۸] بررسی شده و یک کنترل‌کننده حالت لغزشی پایانه سریع طراحی می‌شود که تأثیر اختلالات را به طور موثر جبران می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده حالت لغزشی پایانه سریع تطبیقی می‌تواند بر اثرات اختلالات غلبه کند و همچنین هنگامی که سیستم ذخیره انرژی و کنترل‌کننده در تنظیم فرکانس شرکت می‌کنند، نوسان انحراف فرکانس بار بیشتر کاهش می‌یابد، که عملکرد سیستم را افزایش می‌دهد. شرایط تنظیم مخزن سرج پایین دست نیروگاه برق آبی با تونل سقفی شیدار در [۱۹] مورد مطالعه قرار گرفته که اینرسی جریان پنستاک مربوط به نقطه پایانی فاصله نابرابری مقدار مجاز اینرسی جریان است که نیازی به تنظیم مخزن سرج پایین دست



نیست. مدلسازی و کنترل یک نیروگاه آبی کوچک برای یک ریزش شبکه DC بر اساس تئوری انفعال در [۲۰] ارائه شده که دینامیک الکتریکی، مکانیکی و هیدرولیکی در مدل ریاضی نیروگاه در نظر گرفته شده است. در این مقاله رفتار دینامیکی یک واحد تولید با توربین آبی مطالعه و شبیه سازی شده است. در توربین های آبی برای عملکرد پایدار کنترلی از گاورنر با جبران ساز گذرای افی استفاده می شود که تاثیر آن بر پاسخ دینامیکی سیستم به ازای تغییرات تقاضای بار نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی با استفاده از مدل فضای حالت در نرم افزار متلب به دست آمده و مقایسه آنها با مقادیر ویژه درستی پاسخ را نشان می دهند.

۲- معادلات سیستم

در نمایش توربین آبی در مطالعات پایداری از مقاومت هیدرولیکی صرف نظر می شود و کانال آب غیرقابل ارتجاع و آب غیرقابل تراکم است [۲۱،۲۲]. همچنین سرعت آب برابر حدگشایش در پیچه و جذر ارتفاع خالص آب متناسب در نظر گرفته می شود. توان خروجی توربین با ارتفاع آب و حجم جریان آب متناسب است. شکل (۲) نمودار بلوکی واحد تولید با توربین آبی را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود سیستم دارای دو ورودی تقاضای بار (ΔP_L) و مرجع بار (ΔP_R) است. خروجی مورد مطالعه در این نمودار تغییرات سرعت روتور ($\Delta \omega_r$)، تغییرات توان مکانیکی یا توان خروجی توربین (ΔP_m) و تغییرات موقعیتی گیت (ΔX_g) است.



شکل (۲): بلوک دیاگرام واحد تولید با توربین آبی

۲-۱- جبران ساز گذرای افی

کنترل سرعت (بار) وظیفه اصلی گاورنر است. برای عملکرد پایدار کنترلی در توربین آبی نیاز به شیب افی بزرگ گذرا با یک زمان طولانی بازنشانی نیاز است [۲۳،۲۴]. تابع انتقال جبران ساز گذرای افی عبارت است از [۲۶،۲۵]:

$$G_C(s) = \frac{\Delta X_g}{\Delta X_e} = \frac{T_E s + 1}{T_E (R_T / R_P) s + 1} \quad (1)$$

که در آن T_E زمان بازنشانی و R_T شیب موقتی افی و R_P شیب دائمی افی است. در عملکرد پایدار انتخاب بهینه پارامترهای T_E و R_T به زمان شروع آب (T_w) و زمان شروع مکانیکی بستگی دارند.



۲-۲- تابع تبدیل توربین آبی

زمان شروع آب نشان دهنده زمان مورد نیاز برای شتاب گرفتن آب کانال از حالت سکون به سرعت نامی در ارتفاع نامی است. این زمان با بار تغییر می‌کند و در بار کامل دارای مقداری بین ۰/۵ تا ۴ ثانیه است [۲۷،۲۸]. تابع مکانیکی توربین تابعی از موقعیت دریچه بوده و مستقل از فرکانس است. تابع تبدیل کلاسیک یک توربین آبی بدون تلفات به صورت زیر بیان می‌شود [۲۹،۳۰]:

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m}{\Delta X_g} = \frac{1 - T_W s}{1 + 0.5 T_W s} \quad (2)$$

همانطور که دیده می‌شود تابع تبدیل دارای یک صفر در سمت راست محور موهومی است. زمانی که دریچه آب باز می‌شود، جریان آب به صورت لحظه‌ای تغییر نمی‌کند ولی فشار دو سر توربین کاهش می‌یابد و باعث می‌شود که توان کم شود [۳۱].

۲-۳- تابع انتقال گاورنر

کنترل دبی عبوری از توربین باعث ایجاد یک سرعت ثابت برای به حرکت در آوردن ژنراتور و تنظیم توان خروجی است که به وسیله به کار گرفتن دریچه کوچک یا شیرها انجام می‌شود [۳۲-۳۵]. گاورنر وظیفه کنترل این دریچه‌ها را دارد. گاورنر باید طوری عمل کند که هیچ خطایی بین سرعت واقعی و سرعت طراحی وجود نداشته باشد تا خروجی توربین را تغییر دهد و به عبارت دیگر بین بار سیستم و خروجی ژنراتور در سرعت طراحی شده تعادل برقرار شود [۳۶-۳۸]. تابع انتقال سیستم گاورنر عبارت است از [۳۹]:

$$G_G(s) = \frac{\Delta X_e}{\Delta P_R - \frac{1}{R_p} \Delta \omega_r} = \frac{K_G}{1 + T_G s} \quad (3)$$

که در آن T_G ثابت زمانی گاورنر، K_G بهره ماندگار گاورنر و R_p ضریب تنظیم سرعت (ضریب تنظیم افتی) گاورنر است.

۲-۴- مدل بار و ماشین

بارهای سیستم قدرت ترکیبی از انواع مختلف تجهیزات الکتریکی است. توان الکتریکی در بارهای اهمی مستقل از فرکانس بوده ولی در بارهای موتوری توان الکتریکی با فرکانس تغییر می‌کند. تابع انتقال سیستم الکتریکی با در نظر گرفتن بهره ماندگار سیستم الکتریکی K_P و ثابت زمانی T_P به صورت زیر بیان می‌شود [۴۰،۴۱]:

$$G_P(s) = \frac{\Delta \omega_r}{\Delta P_m - \Delta P_L} = \frac{K_P}{1 + T_P s} \quad (4)$$

ثابت زمانی سیستم الکتریکی معمولاً زیاد و در حدود چند ثانیه است.

۲-۵- معادلات سیستم در فضای حالت

معادلات سیستم واحد تولید با توربین آبی در فضای حالت با انتخاب چهار متغیر حالت به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{d}{dt} x_1 = \frac{1}{J_M} x_2 - \frac{K_D}{J_M} x_1 - \frac{1}{J_M} \Delta P_D \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} x_2 = \frac{-2}{T_W} x_2 + \frac{2}{T_W} x_3 - 2 \frac{d}{dt} x_3 = \frac{2 K_G}{\alpha R_p T_G} x_1 - \frac{2}{T_W} x_2 + \left(\frac{2}{T_W} + \frac{2}{\alpha T_R} \right) x_3 - 2 \left(\frac{1}{\alpha T_R} - \frac{1}{\alpha T_G} \right) x_4 - \frac{2 K_G}{\alpha T_G} \Delta P_C \quad (6)$$

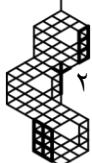
$$\frac{d}{dt} x_3 = -\frac{1}{\alpha T_R} x_3 + \frac{1}{\alpha T_R} x_4 + \frac{1}{\alpha} \frac{dx_4}{dt} = -\frac{K_G}{\alpha R_p T_G} x_1 - \frac{1}{\alpha T_R} x_3 + \left(\frac{1}{\alpha T_R} - \frac{1}{\alpha T_G} \right) x_4 + \frac{K_G}{\alpha T_G} \Delta P_C \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} x_4 = -\frac{K_G}{R_p T_G} x_1 - \frac{1}{T_G} x_4 + \frac{K_G}{T_G} \Delta P_C \quad (8)$$

که در آن متغیر x_1 تغییرات انحراف فرکانس و متغیر x_2 تغییرات توان مکانیکی را نشان می‌دهند. سیستم حلقه باز مجهز به جبران‌کننده دارای چهار مقدار ویژه است و معادله مشخصه سیستم را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\Delta_O(s) = s^4 + p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0 \quad (9)$$

که در آن ضرایب چند جمله‌ای به پارامترهای سیستم وابسته هستند:





$$p_0 = \frac{K_C}{K_G} \left(1 + \frac{K_G K_P}{R_P}\right) \quad (10)$$

$$p_1 = \frac{1}{\alpha T_R} \left(\frac{2}{T_W T_P} + \frac{2}{T_W T_G} + \frac{1}{T_G T_P}\right) + \frac{2}{T_W T_G T_P} - \frac{2 K_G K_P}{\alpha R_P T_G T_P} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_W}\right) \quad (11)$$

$$p_2 = \left(\frac{1}{\alpha T_R} + \frac{1}{T_G}\right) \left(\frac{2}{T_W} + \frac{1}{T_P}\right) + \frac{2}{T_W T_P} + \frac{1}{\alpha T_G} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{2 K_G K_P}{T_R T_P}\right) \quad (12)$$

$$p_3 = \frac{1}{\alpha T_R} + \frac{1}{T_G} + \frac{2}{T_W} + \frac{1}{T_P} \quad (13)$$

ضرایب p_0 و p_3 همیشه مثبت و ضرایب p_1 و p_2 می توانند منفی باشند. شرط لازم برای پایداری، مثبت بودن ضریب p_1 و p_2 است. با توجه به محدوده تغییرات T_W ، ضریب p_1 همیشه مثبت خواهد بود، بنابراین شرط لازم برای پایداری سیستم مثبت بودن ضریب p_2 است.

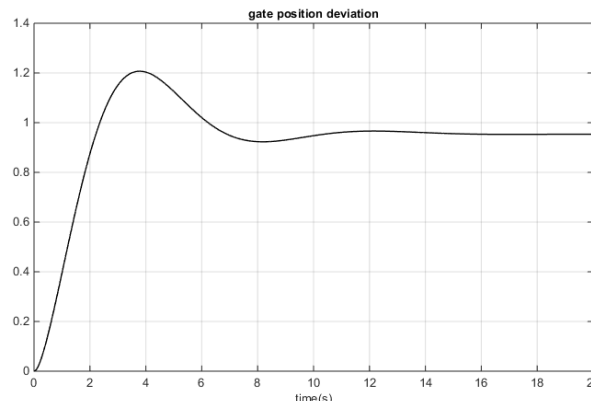
۳- نتایج شبیه سازی

پارامترهای سیستم برای انجام شبیه سازی در جدول (۱) آمده است. تغییرات تقاضای بار پله ای در نظر گرفته شده است. تغییرات موقعیت دریچه آب، تغییرات توان مکانیکی توربین و تغییرات سرعت ماشین به ترتیب در شکل های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده است. مدلهای سیستم $-۰/۲۱۴۴$ و $۰/۷۳۷۳ \pm j۰/۳۸۵۰$ هستند. همانطور که مشاهده می شود پس از باز شدن دریچه آب، توان مکانیکی توربین ابتدا افت می کند و سپس به مقدار دائمی خواهد رسید. همچنین پاسخ تغییرات سرعت ماشین بسیار کند است. شکل (۶) تغییرات توان مکانیکی توربین بر حسب تغییرات دریچه آب را نشان می دهد.

نمودار بود تابع انتقال تغییرات سرعت ماشین نسبت به تغییرات بار در شکل (۷) نشان داده شده است. زمانی که دریچه آب باز می شود به علت اینرسی آب، جریان آب به صورت لحظه ای تغییر نمی کند و فشار دو سر توربین کم می شود و لذا تغییر اولیه توان مکانیکی خلاف جهت تغییر در موقعیت دریچه آب است.

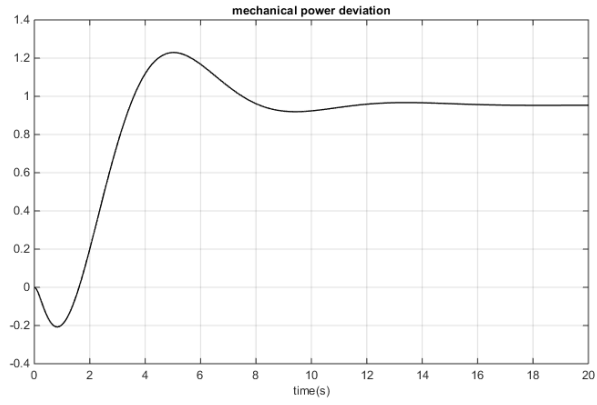
جدول (۱): پارامترهای واحد تولید با توربین آبی

پارامتر	نماد	مقدار
شیب دائمی آفتی	R_P	۰/۰۵ هرتز بر پروینیت مگاوات
زمان شروع آب	T_W	۱ ثانیه
زمان بازنشانی	T_E	۵ ثانیه
ثابت زمانی گاورنر	T_G	۰/۲ ثانیه
ثابت زمانی سیستم الکتریکی	T_P	۶ ثانیه
بهره ماندگار سیستم الکتریکی	K_P	۱ هرتز بر پروینیت مگاوات

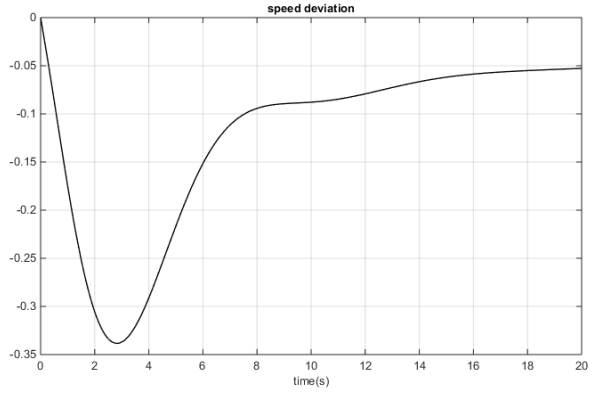


شکل (۳): تغییرات دریچه توربین به ازای تغییرات پله ای تقاضای بار

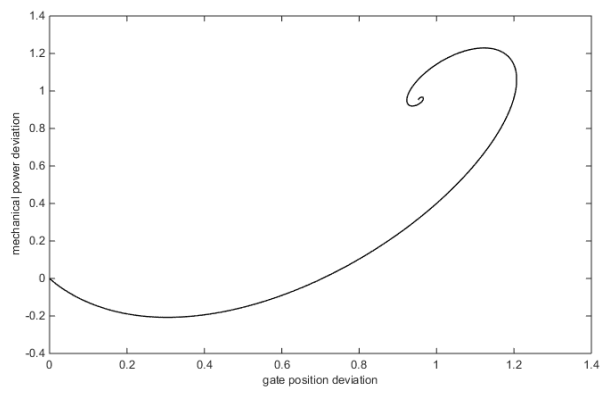




شکل (۴): تغییرات توان مکانیکی توربین به ازای تغییرات پله‌ای تقاضای بار



شکل (۵): تغییرات سرعت ماشین به ازای تغییرات پله‌ای تقاضای بار

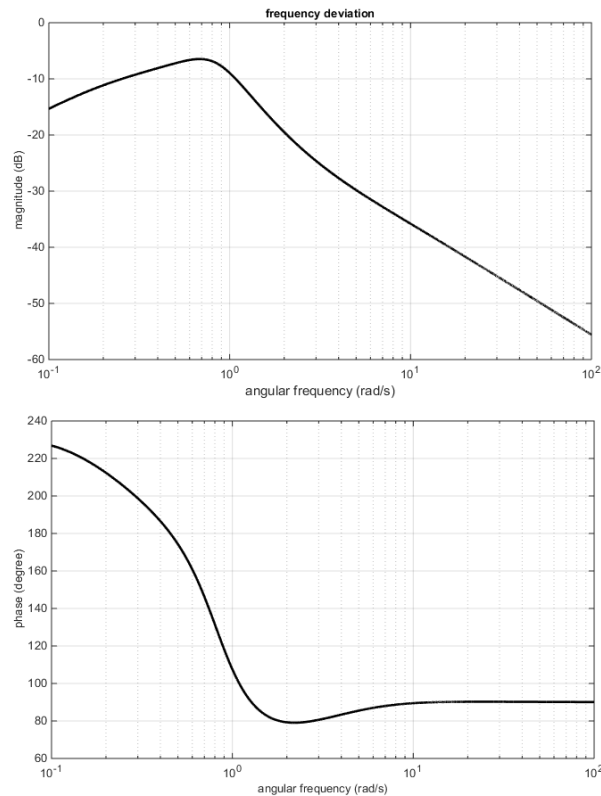


شکل (۶): تغییرات توان مکانیکی توربین برحسب تغییرات درجه آب

۴- نتیجه‌گیری

توربین آبی ماشین متحرکی است که انرژی خود را از آب در حال حرکت دریافت می‌کند و یکی از اجزای مهم در نیروگاه برق آبی است. هزینه تولید برق آبی نسبتاً کم بوده و یک منبع تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی است. در این مقاله با ارائه مدهای سیستم در فضای حالت و نتایج شبیه‌سازی تاثیر جبران‌ساز اکتیو بر رفتار دینامیکی سیستم واحد تولید با توربین آبی نشان داده شد. نتایج شبیه‌سازی در حوزه زمان و نمودار بود تابع انتقال پایداری سیستم را با استفاده از جبران‌ساز اکتیو نشان داد.





شکل (۷): نمودار بود تابع انتقال تغییرات فرکانس به تغییرات بار

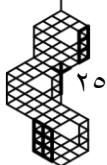
مراجع

- [1] A. O. Aluko, R. P. Carpanen, D. G. Dorrell and E. E. Ojo, "Robust state estimation method for adaptive load frequency control of interconnected power system in a restructured environment", *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 5046-5056, Dec. 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.3005979.
- [2] S.A. Seyed-Beheshti-Fini, S.M. Shariatmadar, V. Amir, "Frequency control in multi-carrier microgrids with the presence of electric vehicles based on adaptive neuro fuzzy inference system controller", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 55, pp. 27-42, Dec. 2023
- [3] M. Tavoosi, B. Fani, M. Delshad, I. Sadeghkhan, "Decentralized coordination of distributed electric vehicles charger for distribution network harmonic mitigation", *Technovations in Electrical Engineering & Green Energy System*, vol. 1, no. 2, pp. 1-16, 2022, doi: 10.30486/teeges.2022.1959-178.1014.
- [4] S.A. Seyed-Beheshti-Fini, S.M. Shariatmadar, V. Amir, "Frequency control in multi-carrier microgrids with the presence of electric vehicles based on adaptive neuro fuzzy inference system controller", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 55, pp. 27-42, December 2023.
- [5] M. Mahdavian, N. Behzadfar, "A review of wind energy conversion system and application of various induction generators", *Journal of Novel Researches on Electrical Power*, vol. 8, no. 4, pp. 55-66, 2020.
- [6] M. Zamanifar, B. Fani, M.E.H. Golshan, H.R. Karshenas, "Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II", *Electric Power Systems Research*, vol. 108, pp. 50-58, March 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2013.10.021.
- [7] M.R. Miveh, A.H. Ahmadi, M. Pishvaei, "Design and construction of a water-free cleaning robot for solar panels with the ability to adjust the height", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 51, pp. 53-73, Dec. 2022, dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.51.4.7.
- [8] S. Shojaeen, H. Akrami, "Coordination between wind power, hydro storage facility and conventional generating units according to the annual growth load", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 4, no. 14, pp. 31-40, June 2013, dor: 20.1001.1.23223871.1392.4.14.4.0.





- [9] G. Shahgholian, "An overview of hydroelectric power plant: Operation, modeling, and control", *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. 7, no. 3, pp. 14-28, July 2020, doi: 10.30501-/JREE.2020.221567.1087).
- [10] A. Das, K.B. Chimonyo, T.R. Kumar, S. Gourishankar, C. Rani, "Vertical axis and horizontal axis wind turbine- A comprehensive review", *Proceeding of the IEEE/ICECDS*, pp. 2660-2669, Chennai, India, Aug. 2017, doi: 10.1109/ICECDS.2017.8389937.
- [11] C.S. Rao, S.S. Nagaraju, P.S. Raju, "Automatic generation control of TCPS based hydrothermal system under open market scenario: A fuzzy logic approach", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 31, no. 7-8, pp. 315-322, Sept. 2009, doi: 10.1016/j.ijepes.2009-.03.007.
- [12] D. Tiomo and R. Wamkeue, "Dynamic modeling and analysis of a micro-hydro power plant for microgrid applications", *Proceeding of the IEEE/CCECE*, pp. 1-6, Edmonton, AB, Canada, May 2019, doi: 10.1109/CCECE.2019.8861875.
- [13] G. Zhang, Y. Cheng, N. Lu, Q. Guo, "Research of Hydro-Turbine Governor Supplementary Control Strategy for Islanding AC Grid at Sending Terminal of HVDC System", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 31, no. 4, pp. 1229-1238, Dec. 2016, doi: 10.1109/TEC.2016.2561958.
- [14] B.S. Thapa, O.G. Dahlhaug, B. Thapa, "Sediment erosion in hydro turbines and its effect on the flow around guide vanes of Francis turbine", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 1100-1113, Sept. 2015, doi:10.1016/j.rser.2015.04.178.
- [15] B. Xu, F. Zhu, P. Zhong, J. Chen, W. Liu, Y. Ma, L. Guo. X. Deng, "Identifying long-term effects of using hydropower to complement wind power uncertainty through stochastic programming", *Applied Energy*, Vol. 253, article number: 113535, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113535.
- [16] Z. Wang, Y. Liu, "Adaptive terminal sliding mode based load frequency control for multi-area interconnected power systems with PV and energy storage", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 120185-120192, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3109141.
- [17] A. Rahman, L.C. Saikia, N. Sinha, "Load frequency control of a hydro-thermal system under deregulated environment using biogeography-based optimised three-degree-of-freedom integral-derivative controller", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 15, pp. 2284-2293, Nov. 2015, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0317.
- [18] A. Rezghi, A. Riasi, P. Tazraei, "Multi-objective optimization of hydraulic transient condition in a pump-turbine hydropower considering the wicket-gates closing law and the surge tank position", *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 478-491, April 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.054.
- [19] W. Guo, D. Zhu, "Setting condition of downstream surge tank of hydropower station with sloping ceiling tailrace tunnel", *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 134, Article 109698, May 2020, doi: 10.1016/j.chaos.2020.109698.
- [20] W. Gil-González, O. DaniloMontoya, A. Garces, "Modeling and control of a small hydro-power plant for a DC microgrid", *Electric Power Systems Research*, vol. 180, Article: 106104, pp. 1-6, March 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106104.
- [21] R.C.F. Mendes, R.R. Mac Donald, A.R.S. Miranda, R.H. Els, M.A. Nunes, A.C.P.B. Junior, "Monitoring a hydrokinetic converter system for remaining energy in hydropower plants", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 10, pp. 1683-1691, Oct. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9387638.
- [22] A. Joseph, T.R. Chelliah, R. Selvaraj, K. Lee, "Fault diagnosis and fault-tolerant control of megawatt power electronic converter-fed large-rated asynchronous hydrogenerator", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 4, pp. 2403-2416, Dec. 2019, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2881427.
- [23] B. Xu, J. Zhang, M. Egusquiza, D. Chen, F. Li, P. Behrens, E. Egusquiza, "A review of dynamic models and stability analysis for a hydro-turbine governing system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, Article Number: 110880, July 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110880.
- [24] F. Hedarpour, G. Shahgholian, "Design and simulation of sliding and fuzzy sliding mode controller in hydro-turbine governing system", *Journal of Iranian Dam and Hedroelectric Powerplant*, Vol. 4, No. 12, pp. 10-20, Aug. 2017.
- [25] S. Chatterjee, C. K. Shiva, V. Mukherjee, "Automatic generation control of multi-area hydropower system using moth flame optimization technique", *Proceeding of the IEEE/RDCAPE*, pp. 395-403, Noida, India, Oct. 2019, doi: 10.1109/RDCAPE47089.2019.8979090.





- [26] E.J. Oliveira, L.M. Honorio, A.H. Anzai, L.W. Oliveira, E.B. Costa, "Optimal transient droop compensator and PID tuning for load frequency control in hydro power systems", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 68, pp. 345-355, June 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.071.
- [27] D.N. Konidaris, J.A. Tegopoulos, "Investigation of oscillatory problems of hydraulic generating units equipped with Francis turbines", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 12, no. 4, pp. 419-425, Dec. 1997, doi: 10.1109/60.638969.
- [28] C. D. Vournas, A. Zaharakis, "Hydro turbine transfer functions with hydraulic coupling", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 8, no. 3, pp. 527-532, Sept. 1993, doi: 10.1109/60.257069.
- [29] E. De Jaeger, N. Janssens, B. Malfliet F. Van De Meulebroeke, "Hydro turbine model for system dynamic studies", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 1709-1715, Nov. 1994, doi: 10.1109/59.331421.
- [30] A. Bensenouci, A.M.A. Ghany, "Optimal discrete-time output feedback control for multi-area load frequency control using evolutionary programming", *Proceedings of the IEEE/ISIE*, pp. 95-100, Dubrovnik, Croatia, June 2005, doi: 10.1109/ISIE.2005.1528894.
- [31] S. Bhuyan, S.H. Dey, S. Paul, S. Chaine, "Analysis of frequency regulation for a hydro-thermal system with ALFC-DR model", *Proceeding of the IEEE/ICPEE*, pp. 1-5, Bhubaneswar, India, Jan. 2021, doi: 10.1109/ICPEE50452.2021.9358728.
- [32] T. Deng, L. Tian, C. Zhou, X. Liu, W. Dou, "Compensation design of coordinated control system for supercritical once-through CHP plants based on energy analysis", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 76965-76975, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3082518.
- [33] M. Alberdi, M. Amundarain, A.J. Garrido, I. Garrido, F.J. Maseda, "Fault-ride-through capability of oscillating-water-column-based wave-power-generation plants equipped with doubly fed induction generator and airflow control", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 1501-1517, May 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2090831.
- [34] E. A. Bossanyi, P.A. Fleming, A.D. Wright, "Validation of individual pitch control by field tests on two- and three-bladed wind turbines", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 1067-1078, July 2013, doi: 10.1109/TCST.2013.2258345.
- [35] E. Prieto-Araujo, A. Junyent-Ferré, D. Lavèrnia-Ferrer, O. Gomis-Bellmunt, "Decentralized control of a nine-phase permanent magnet generator for offshore wind turbines", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 30, no. 3, pp. 1103-1112, Sept. 2015, doi: 10.1109/TEC.2015.2412550.
- [36] G. Lei, X. Chang, Y. Tianhang, W. Tuerxun, "An improved mayfly optimization algorithm based on median position and its application in the optimization of PID parameters of hydro-turbine governor", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 36335-36349, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3160714.
- [37] H. Fang, L. Chen, Z. Shen, "Application of an improved PSO algorithm to optimal tuning of PID gains for water turbine governor", *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 4, pp. 1763-1770, April 2011, doi:10.1016/j.enconman.2010.11.005.
- [38] O.P. Malik, Y. Zeng, "Design of a robust adaptive controller for a water turbine governing system", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 2, pp. 354-359, June 1995, doi: 10.1109/60.391903.
- [39] D. Kosterev, "Hydro turbine-governor model validation in pacific northwest", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1144-1149, May 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2003.821464.
- [40] G. Shahgholian, "Power system stabilizer application for load frequency control in hydro-electric power plant", *Engineering Mathematics*, vol. 2, no. 1, pp. 21-30, Feb. 2017, doi: 10.11648/j.engmath.20170201.14.
- [41] M. Mahdavian, G. Shahgholian, M. Janghorbani, S. Farazpey, M. Azadeh, "Modelling and analysis of a PSS application for LFC in hydro-electric power plant", *Proceeding of the IEEE/ECTI-CON*, pp. 1-6, Chiang Mai, Thailand, June/July 2016, doi: 10.1109/ECTICon.2016.7560910.

زیر نویس ها

1. Hydraulic
2. Pelton
3. Francis
4. Kaplan
5. Flow path
6. Water start time

