

Original Research

Stability and sensitivity analysis of wind turbine self-excitation induction generator

Jalal Sahebkar¹, Hasan Shademan^{2*}, Mohammad Zareein³, Mohammad Shademan⁴

¹MSc., Department of Electrical Engineering, Faculty of Shahid Rejaee, KhorasanRazavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Quchan, Iran.

²Faculty Member, Department of Electrical Engineering, Faculty of Shahid Rejaee, KhorasanRazavi Branch, Technical and Vocational University (TVU), Quchan, Iran.

³BSc., Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

⁴BSc., Department of Civil Engineering, Faculty of Darolfonoon, North Khorasan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Bojnord, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.27.2020

Revised: 01.04.2021

Accepted: 02.23.2021

Keyword:

Sensitivity analysis

Eigenvalues

Dynamic model

Self-excitation induction generator

Stability of power systems.

***Corresponding Author:**

Hasan Shademan

Email: h.shademan@gmail.com

ABSTRACT

Increasing the electrical demand causes the expansion of distributed generation sources and the interconnection of power systems. In the integrated power system, stability is one of the vital issues. The instability of the power system may cause a blackout. Therefore, the analysis of stabilities and sensitivities should be considered in power system studies. In this paper, the sensitivity analysis and eigenvalue of the induction wind generator were investigated by using a proper nonlinear model. First, the dynamic equations of the wind turbine induction generator were presented. For this purpose, the induction generator was connected to an infinite bus through a short transmission line. Sensitivity analysis was performed by changing some important system parameters. In this study, by changing the inductance and resistance of the transmission line, the variations of the induction generator were analyzed separately. Then the ratio r to x of the transmission line was investigated. Finally, the eigenvalues were considered for analysis of the case study's stability. Differential equations of the case study were solved using the Rang-Kutta order-four method with MATLAB software.

بررسی پایداری و آنالیز حساسیت ژنراتور القایی خودتحریک در نیروگاه بادی

جلال صاحبکار^۱، حسن شادمان^{۲*}، محمد زارعین^۳، محمد شادمان^۴

- ۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، آموزشکده شهید رجایی- قوچان، دانشگاه فنی و حرفه ای استان خراسان رضوی، ایران.
- ۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی برق، آموزشکده شهید رجایی- قوچان، دانشگاه فنی و حرفه ای استان خراسان رضوی، ایران.
- ۳- کارشناسی، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- ۴- کارشناسی، گروه مهندسی عمران، دانشکده دارالفنون-بجنورد، دانشگاه فنی و حرفه ای استان خراسان شمالی، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه، با توجه به افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، گسترش منابع تولید پراکنده و اتصال شبکه‌های قدرت به یکدیگر پایداری سیستم‌های قدرت، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در صورت بروز هر خطایی در شبکه، امکان قطع سراسری سیستم قدرت وجود دارد. به همین منظور آنالیز حساسیت و بررسی نقاط پایداری سیستم، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله به بررسی آنالیز حساسیت و مقادیر ویژه ماشین القایی به‌منظور بررسی پایداری آن به‌عنوان ژنراتور بادی مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا به معرفی و ارائه معادلات دینامیکی ژنراتور القایی پرداخته شده که برای این منظور ژنراتور القایی از طریق یک خط انتقال کوتاه به باس بی‌نهایت متصل گردیده و سپس با تغییر در مشخصات خط انتقال به بررسی رفتار پارامترهای مختلف ژنراتور القایی پرداخته شده است. در این مطالعه، با تغییر در نسبت اندوکتانس و مقاومت خط انتقال به‌صورت جداگانه به تحلیل رفتار ژنراتور در اثر این تغییرات پرداخته شده است و سپس نسبت Γ به X خط انتقال که اهمیت بسزایی در پایداری سیستم دارد مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت مقادیر ویژه سیستم مطالعه شده است. مدل‌سازی سیستم به‌صورت تحلیلی با نوشتن معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار آن انجام شده و معادلات دیفرانسیل مذکور توسط روش رانگ کوتا مرتبه چهار در نرم‌افزار متلب حل شده است.

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵

کلید واژگان:

آنالیز حساسیت

مقادیر ویژه

مدل دینامیکی

ژنراتور القایی خودتحریک

پایداری سیستم‌های قدرت

*نویسنده مسئول: حسن شادمان

پست الکترونیکی:

h.shademan@gmail.com

مقدمه

به دلیل برخی مسائل نظیر آلودگی محیط زیست، نگرانی از اتمام منابع فسیلی و کاهش هزینه انرژی، تلاش‌های قابل توجهی برای توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر پاک نظیر انرژی باد صورت پذیرفته است [۱-۲]. پیش‌بینی می‌شود که در آینده، بیشتر ساختار تولید توان توسط سیستم قدرت به صورت منابع به هم پیوسته از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر باد و خورشید می‌شود [۳]. در حال حاضر، در بین منابع انرژی تجدیدپذیر سیستم‌های بادی، توجه اقتصادی بیشتری نسبت به دیگر منابع تجدیدپذیر دارند [۴]. توربین‌های بادی، از جمله فناوری‌های مطرح در تولید انرژی پاک می‌باشند که امروزه با سرعت زیادی در حال پیشرفت هستند، علت پیشرفت سریع آن مسائل زیست‌محیطی، اقتصادی و افزایش تقاضای انرژی الکتریکی می‌باشد [۵-۶]. در نتیجه مطالعه در مورد اتصال این توربین‌ها به شبکه، بسیار مهم است [۷]. ماشین‌های القایی قفس سنجایی به دلیل قیمت پایین، مقاوم بودن و سهولت نگهداری، به وفور در صنعت به کار می‌روند. همین مزایا این ماشین را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای استفاده در سیستم‌های بادی سرعت متغیر، مطرح می‌کند [۸-۹]. توربین‌های بادی شامل توربین‌های بادی سرعت ثابت و متغیر می‌باشند [۱۰]. اکثر توربین‌های بادی که امروزه نصب می‌شوند به علت اقتصادی بودن، مقاوم بودن، نصب آسان‌تر، از نوع قفس سنجایی انتخاب می‌شوند [۱۱].

تحقیقات روی انرژی باد در مقیاس مختلف در حال پیشرفت است. از این رو استفاده از توربین‌های باد در مقیاس کوچک، به عنوان یکی از منابع تولید پراکنده در نقاط دور دست و روستایی به سرعت در حال رشد می‌باشد [۱۲]. این مدل توربین‌ها ویژگی‌ها و مزایای زیادی دارند [۱۳].

از آنجایی که بررسی پایداری یک سیستم، از مهم‌ترین مطالعات در یک شبکه قدرت می‌باشد؛ در بسیاری از مطالعات، به آنالیز حساسیت و پایداری در یک سیستم قدرت پرداخته است [۱۴-۱۵]. در [۱۶] به بررسی آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف بر پایداری اغتشاشات کوچک روی سیستم قدرت پرداخته است. در [۱۷] از روش جدیدی برای بررسی پایداری حالت گذرا با استفاده از آنالیز حساسیت و مقادیر ویژه پرداخته است.

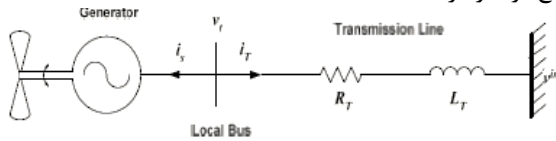
بررسی رفتار و عملکرد ژنراتورهای بادی به دلیل طبیعت نوسانی توان باد ورودی به توربین آن‌ها و رفتار گذرای ناشی از آن، نیازمند مدل‌های مناسبی می‌باشند. رفتار دینامیکی ماشین القایی را می‌توان توسط معادلات دیفرانسیل مدل کرد. این معادلات دیفرانسیل به دلیل وابستگی به زمان و تغییرات سرعت روتور دارای پیچیدگی زیادی هستند که به منظور کاهش محاسبات و حل معادلات دیفرانسیل، متغیرها را می‌توان به چارچوب مرجع دلخواه انتقال داد که در سرعت زاویه‌ای اختیاری می‌چرخند [۱۸].

در این مقاله، به بررسی آنالیز حساسیت و مقادیر ویژه ژنراتور القایی خود تحریک، با استفاده از مدل ساده دینامیکی پرداخته شده است. در ادامه، به منظور بررسی رفتار دینامیکی این ژنراتور و اتصال آن به شبکه، از یک خط انتقال کوتاه استفاده شده و با تغییر پارامترهای این خط، تغییرات پارامترهای مختلف ژنراتور القایی مطالعه شده است. در انتها به بررسی نتایج شبیه‌سازی و مطالعه بر تغییر پارامترها پرداخته شده است. مدل‌سازی سیستم به صورت تحلیلی با نوشتن معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار آن انجام شده است. معادلات دیفرانسیل مذکور توسط روش رانگ کوتا مرتبه چهار، حل شده است.

مدل دینامیکی سیستم

شکل (۱) مدل شبکه مورد بررسی در این تحقیق را نشان می‌دهد. این مدل شامل دو باس می‌باشد که باس محلی، به ژنراتور القایی متصل می‌شود و باس بی‌نهایت، به خط انتقال کوتاه متصل است. به منظور بررسی رفتار دینامیکی ژنراتور باید این ژنراتور را به سیستم قدرت وصل کرد و در واقع سیستم‌های قدرت شامل ژنراتورهای مختلف و بار می‌باشند که از طریق شبکه‌های انتقال با هم در ارتباطند. برای تجزیه و تحلیل ساده، ژنراتورهای دیگر سیستم را می‌توان با یک واحد تولید بزرگ با ظرفیت بی‌نهایت نشان داد و خط انتقال را توسط یک مقاومت و یک اندوکتانس مدل کرد. باس بی‌نهایت،

ولتاژ و فرکانس ثابت دارد و هیچ‌یک از آن‌ها تحت تأثیر ژنراتور مورد مطالعه تغییر نمی‌کنند. این بدین معناست که ولتاژ شبکه را می‌توان به‌عنوان مرجع در نظر گرفت.



شکل ۱. ژنراتور بادی اتصال سری متصل به باس بی‌نهایت

حال به‌منظور بررسی دینامیکی این مدل، نیاز به نوشتن معادله دیفرانسیل d-q، برای ژنراتور القایی اتصال سری و خط انتقال می‌باشد.

مدل دینامیکی ژنراتور القایی

به‌طور کلی می‌توان معادلات دیفرانسیلی ژنراتور القایی را به‌صورت زیر نوشت [۱۸]:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (۱)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} - \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (۲)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} + p \lambda_{dr} \quad (۳)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} + p \lambda_{qr} \quad (۴)$$

که R_s و R_r به‌ترتیب مقاومت‌های روتور و استاتور، I_{ds} و I_{qs} جریان‌های انتقال یافته استاتور به محورهای d و q، I_{dr} و I_{qr} جریان‌های انتقال یافته رتور به محورهای d و q، V_d و V_q ولتاژهای انتقال یافته به محورهای d و q، w فرکانس زاویه الکتریکی ولتاژ منبع می‌باشند.

در معادلات (۱) تا (۴) مقادیر رتور به سمت استاتور ارجاع داده شده است. شارهای پیوندی در این معادلات از روابط (۵) به‌دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_{1s} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \lambda_{qs} &= L_{1s} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \lambda_{dr} &= L_{1r} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \lambda_{qr} &= L_{1r} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \end{aligned} \quad (۵)$$

که L_s و L_r به‌ترتیب اندوکتانس‌های نشی استاتور و رتور، L_m ماکزیمم اندوکتانس متقابل رتور و استاتور می‌باشند.

با تغییر در جهت جریان در سیم‌پیچی استاتور می‌توان از این ماشین به صورت ژنراتور استفاده کرد. معادله گشتاور برای این ماشین در حالت ژنراتوری از رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۸].

$$T_L - T_e = JP_w_r + BW_r \quad (6)$$

که T_L گشتاور مکانیکی بار، T_e گشتاور الکترومغناطیسی توسعه‌یافته، W_r سرعت مکانیکی روتور می‌باشند. به‌طور کلی می‌توان معادلات دیفرانسیلی ژنراتور القایی را با توجه به (۷) به صورت زیر نوشت:

$$P[i] = [L]^{-1}([V] - [R][i] - [G][\dot{i}]) \quad (7)$$

که

$$V = [V_{dt} \quad V_{qt} \quad 0 \quad 0]^T \quad (8)$$

$$i = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T \quad (9)$$

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_s & 0 & \omega L_m \\ -\omega L_s & 0 & -\omega L_m & 0 \\ 0 & (\omega - \omega_r)L_m & 0 & (\omega - \omega_r)L_r \\ -(\omega - \omega_r)L_m & 0 & -(\omega - \omega_r)L_m & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

مدل دینامیکی توربین بادی

توربین بادی، به‌وسیله مشخصه توان-سرعت آن توصیف می‌شود. توربین‌های بادی، انرژی جنبشی باد را مهار و آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند [۲۰-۱۹]. توان قابل تولید یک توربین بادی مطابق با فرمول‌های مربوطه متناسب با سطح دایره‌ای شکل است که از چرخش پره‌های روتور حاصل می‌شود. به این دلیل با توجه به شرایط باد هر منطقه و میزان توان نامی توربین، پره‌های روتور در اندازه‌های متفاوت ساخته می‌شوند و توان آن توسط رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۱۸].

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (12)$$

که A مساحت سطح گردش روتور، V سرعت باد، ρ چگالی هوا و C_p ضریب قدرت نامیده می‌شود که طبق تعریف، درصدی از انرژی باد است که به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. در واقع C_p تابعی از نسبت سرعت نوک بال است و به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$C_P = 0.5176 \left(\frac{116}{\gamma_i} - 0.04\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\gamma_i}} + 0.0068 \quad (13)$$

که:

$$\gamma_i = \frac{1}{\frac{1}{\gamma + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (14)$$

که γ سرعت نوک رتور، β زاویه پره به سرعت باد، β زاویه پره می‌باشند.

مدل دینامیکی خط انتقال

خط انتقال در نظر گرفته شده دارای امپدانس $Z_T = (R_T + jX_T)$ است، جریان را به باس بی‌نهایت تزریق می‌کند. معادلات خط انتقال را در چارچوب مرجع سنکرون می‌توان به صورت (۱۵) بیان کرد.

$$V_{qt} = V_q^{\text{inf}} + R_T i_{qt} - w_s L_T i_{dt} + L_T P i_{qt} \quad (15)$$

$$V_{dt} = V_d^{\text{inf}} + R_T i_{dt} + w_s L_T i_{qt} + L_T P i_{dt}$$

که جریان خط انتقال به جریان ژنراتور القایی وابسته می‌باشد:

$$i_T = -i_s \quad (16)$$

مدل دینامیکی شبکه

با جایگذاری (۱۵) در روابط (۱) و (۲) می‌توان از ولتاژهای باس بی‌نهایت به منظور بیان ولتاژهای باس ژنراتور استفاده کرد. با جایگذاری این روابط در یکدیگر داریم.

$$P [i^{sys}] = [L^{sys}]^{-1} \left([V^{sys}] - [R^{sys}] [i^{sys}] - [G^{sys}] [i^{sys}] \right) \quad (17)$$

که:

$$V^{sys} = [V_d^{\text{inf}} \quad V_q^{\text{inf}} \quad 0 \quad 0]^T \quad (18)$$

که V_q^{inf} و V_d^{inf} به ترتیب ولتاژهای انتقال یافته شبکه بی‌نهایت به محورهای d و q می‌باشند. جریان‌های سیستم عبارتند از:

$$i^{sys} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T \quad (19)$$

همچنین پارامترهای دیگر رابطه (۱۶) نظیر L^{sys} و G^{sys} برابرند با:

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} L_s + L_t & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s + L_t & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (20)$$

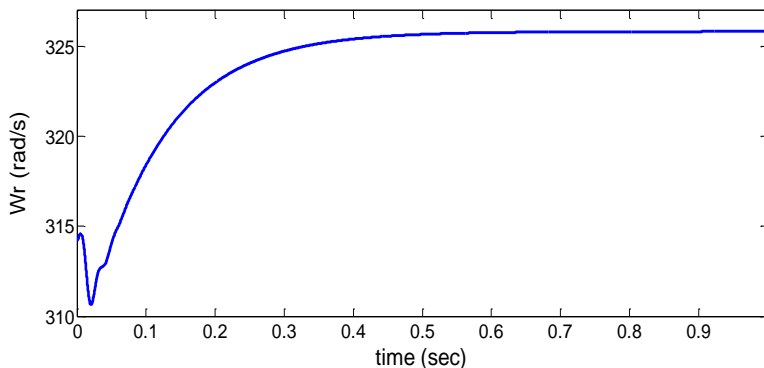
$$G = \begin{bmatrix} 0 & \omega(L_s + L_t) & 0 & \omega L_m \\ -\omega(L_s + L_t) & 0 & -\omega L_m & 0 \\ 0 & (\omega - \omega_r)L_m & 0 & (\omega - \omega_r)L_r \\ -(\omega - \omega_r)L_m & 0 & -(\omega - \omega_r)L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

از این بحث می‌توان به این نتیجه رسید که رفتار دینامیکی این ساختار را می‌توان به‌وسیله معادلات دیفرانسیلی با متغیرهای \dot{i}_{ds} ، \dot{i}_{qs} ، \dot{i}_{dr} ، \dot{i}_{qr} و ω_r بیان کرد. این معادلات را می‌توان به روش رانگ-کوتا مرتبه چهارم حل نمود.

نتایج شبیه‌سازی

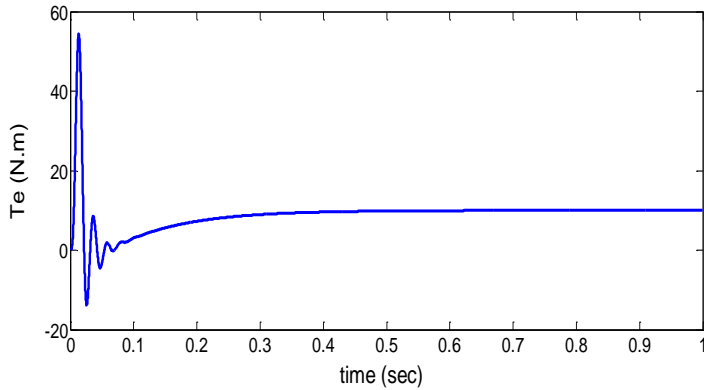
شبیه‌سازی‌ها بر روی شبکه، مطابق شکل (۱) صورت گرفته است. پارامترهای ماشین القایی سه فاز رتور سیم‌پیچی شده در نظر گرفته برای این تحقیق عبارتند از: توان نامی ماشین ۳.۶ KW، فرکانس ۵۰ Hz، ۴۱۵ ولت، ۷/۸ آمپر، ۴ قطب، $L_m = 180 \text{ mH}$ ، $L_{lr} = L_{ls} = 11/4 \text{ mH}$ ، $R_s = 1/7$ و $R_r = 2/7$ اهم می‌باشند [۲۰]. پارامترهای خط انتقال کوتاه $X_l = 1 \Omega$ و $R_l = 0.1 \Omega$ مورد استفاده قرار گرفته است.

برای حل عددی معادلات دیفرانسیل سیستم به شرایط اولیه متغیرهای حالت نیاز است. مقادیر اولیه این متغیرها حالت گذرای شروع حل معادلات را تعیین می‌کنند. برای واقعی‌تر شدن جواب‌ها سرعت اولیه ماشین برابر سرعت سنکرون و جریان‌های اولیه ماشین مساوی صفر قرار داده شده‌اند [۱۸]. البته برای مشاهده اثر شرایط اولیه تحلیل با سرعت‌های اولیه مختلف نیز انجام شده است. شکل (۲) منحنی تغییرات زمانی سرعت ژنراتور القایی را از ابتدای حل با سرعت اولیه برابر سرعت سنکرون نشان می‌دهد. مطابق شکل پس از کمی افت دور اولیه، سرعت ژنراتور به آرامی افزایش می‌یابد و به سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون می‌رسد.



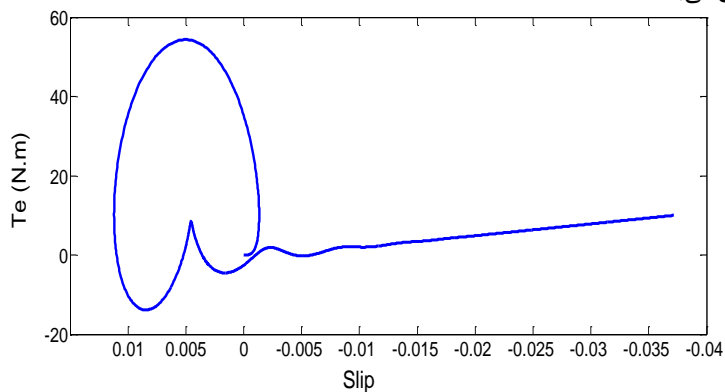
شکل ۲. منحنی مشخصه سرعت-زمان ژنراتور القایی متصل به شبکه

شکل (۳) منحنی مشخصه گشتاور-زمان را نشان می‌دهد، مقدار این گشتاور پس از حالت گذرای اولیه در حدود ۱۰٪ ثانیه به ۱۰ نیوتن متر می‌رسد. مطابق شکل ۳، ژنراتور القایی دارای گشتاور حالت گذرای نسبتاً زیادی می‌باشد.



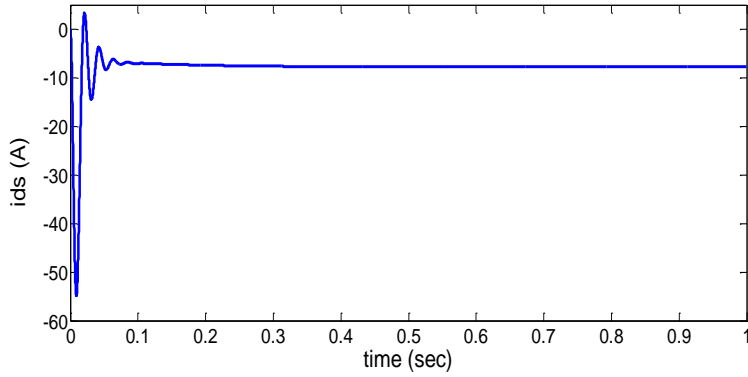
شکل ۳. منحنی مشخصه گشتاور-زمان ژنراتور القایی متصل به شبکه

شکل (۴) منحنی مشخصه گشتاور-لغزش را در ژنراتور القایی متصل به شبکه را نشان می‌دهد که راه‌اندازی ژنراتور در سرعت سنکرون می‌باشد.

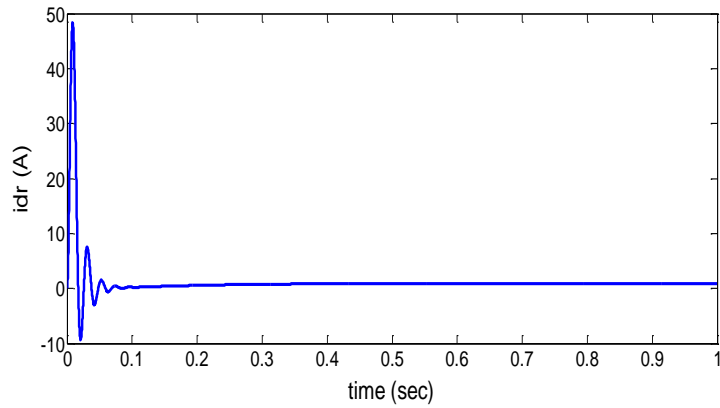


شکل ۴. منحنی مشخصه گشتاور-لغزش ژنراتور القایی متصل به شبکه

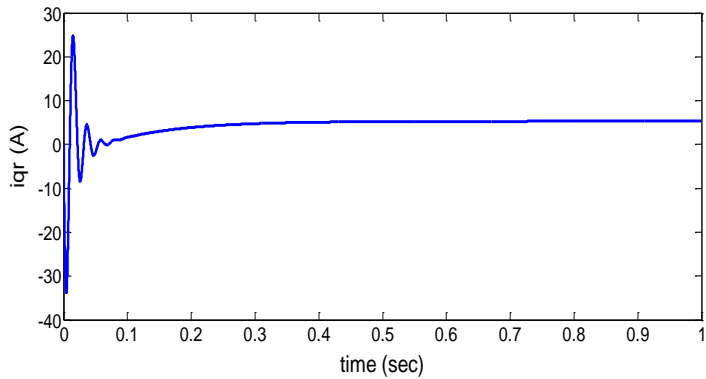
شکل‌های (۵) تا (۸) منحنی مشخصه جریان‌های ژنراتور القایی متصل به شبکه را نشان می‌دهند.



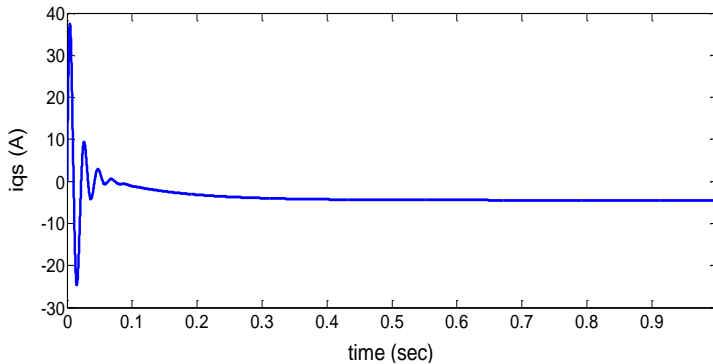
شکل ۵. منحنی مشخصه جریان i_{dr} ژنراتور القایی متصل به شبکه



شکل ۶. منحنی مشخصه جریان i_{dr}^* ژنراتور القایی متصل به شبکه



شکل ۷. منحنی مشخصه جریان i_{qr} ژنراتور القایی متصل به شبکه



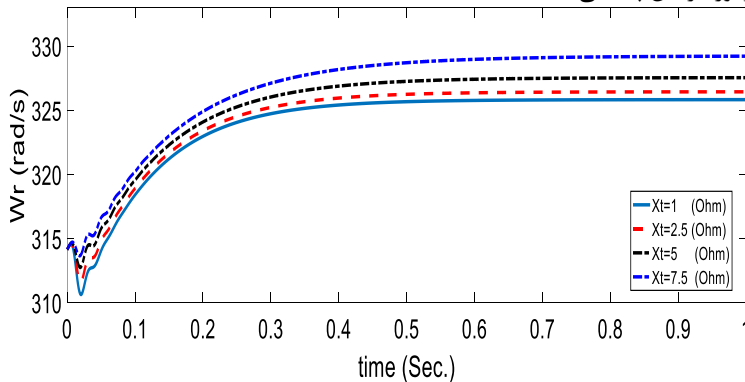
شکل ۸. منحنی مشخصه جریان i_{qgs} ژنراتور القایی متصل به شبکه

آنالیز حساسیت

در این قسمت، تحلیل حساسیت عملکرد ماشین با شرایط اولیه مختلف حل و تغییر پارامترهای سیستم و تأثیر آن‌ها بر پاسخ‌های گذرا و ماندگار مورد مطالعه بررسی شده است. در ادامه با استفاده از این آنالیز حساسیت، به بررسی مقادیر ویژه سیستم و پایداری آن در صورت تغییر در پارامترهای مورد مطالعاتی پرداخته شده است.

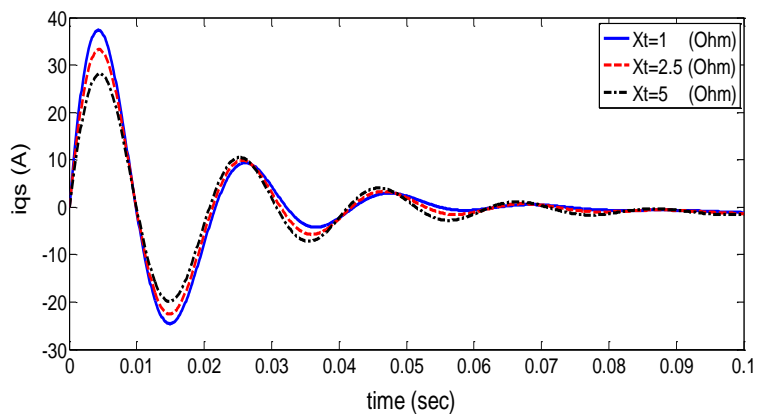
بررسی تغییرات در اندوکتانس خط انتقال

مدل خط انتقال کوتاه، شامل یک مقاومت و یک راکتانس است. خط انتقال، یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سیستم قدرت می‌باشد [۲۲]. در ادامه با تغییر در اندوکتانس خط و به بررسی تغییرات آن بر پارامترهای مختلف سیستم پرداخته شده است. شکل (۹) منحنی مشخصه سرعت-زمان را با تغییر در اندوکتانس خط انتقال نشان می‌دهد با افزایش این نسبت، سرعت ژنراتور افزایش پیدا می‌کند.

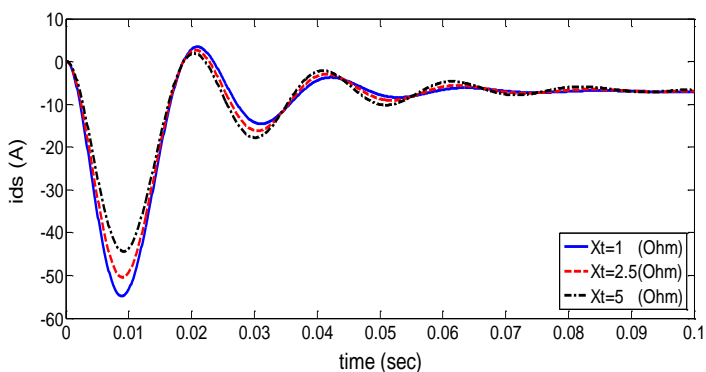


شکل ۹. منحنی مشخصه سرعت-زمان با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

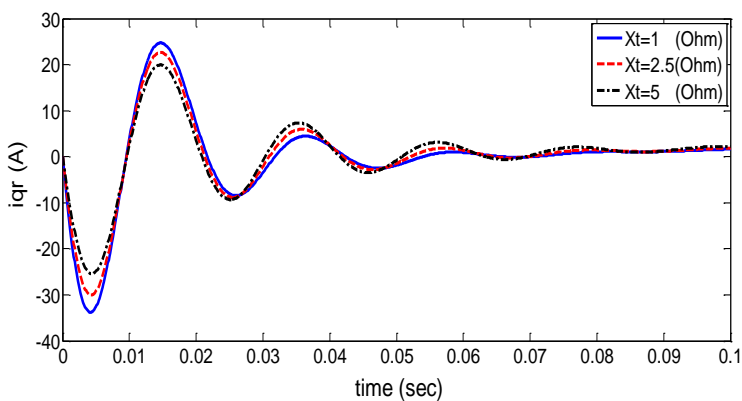
شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) تغییرات جریان محوره‌های $d-q$ ژنراتور القایی را با تغییرات در نسبت اندوکتانس خط انتقال را نشان می‌دهند که بعد از حالت گذرا، به مقدار حالت پایدار خود می‌رسند.



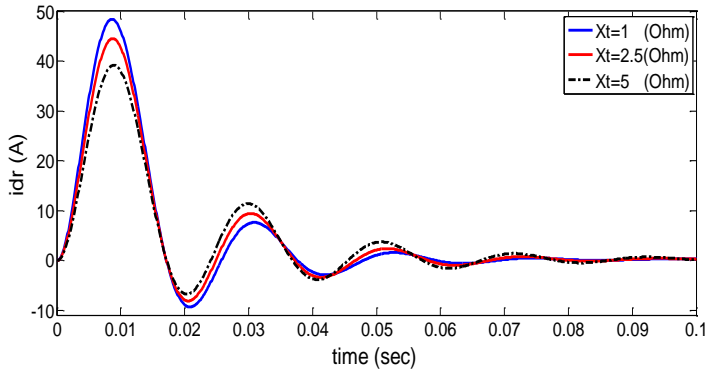
شکل ۱۰. تغییرات جریان iq_s ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال



شکل ۱۱. تغییرات جریان id_s ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

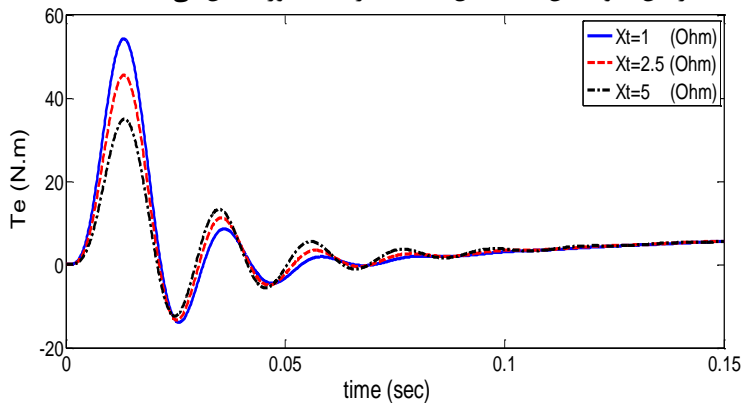


شکل ۱۲. تغییرات جریان iqr ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال



شکل ۱۳. تغییرات جریان idr ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

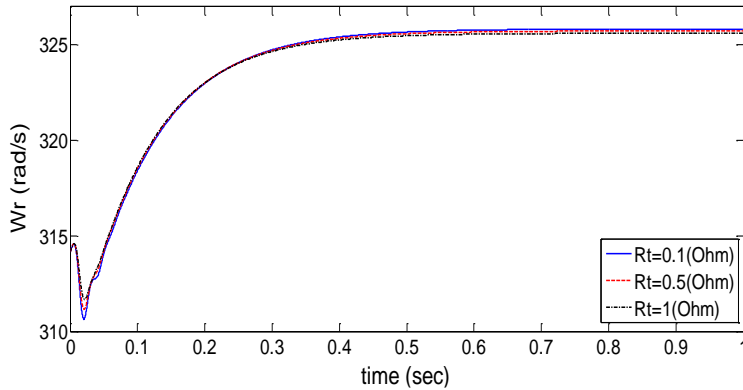
شکل (۱۴) تغییرات گشتاور را با تغییر در اندوکتانس خط انتقال نشان می‌دهد که بعد از عبور از حالت گذرای اولیه، ثابت می‌شود و البته با افزایش اندوکتانس خط انتقال، حالت گذرای گشتاور کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴. منحنی مشخصه گشتاور-زمان ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

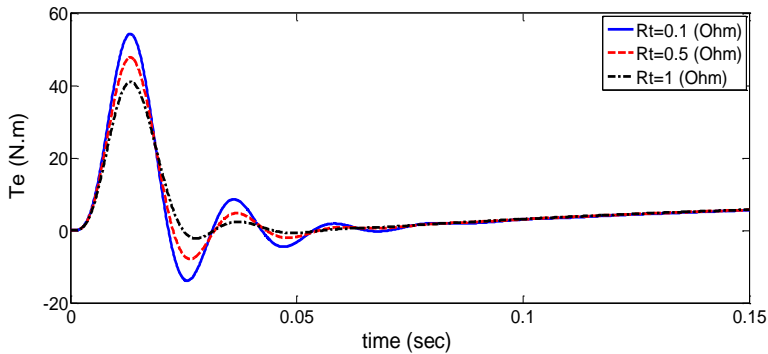
بررسی تغییرات در مقاومت خط انتقال

شکل (۱۵) منحنی مشخصه سرعت-زمان را با تغییر در مقاومت خط انتقال نشان می‌دهد؛ با افزایش این مقدار سرعت ژنراتور القایی کمی کاهش می‌یابد.



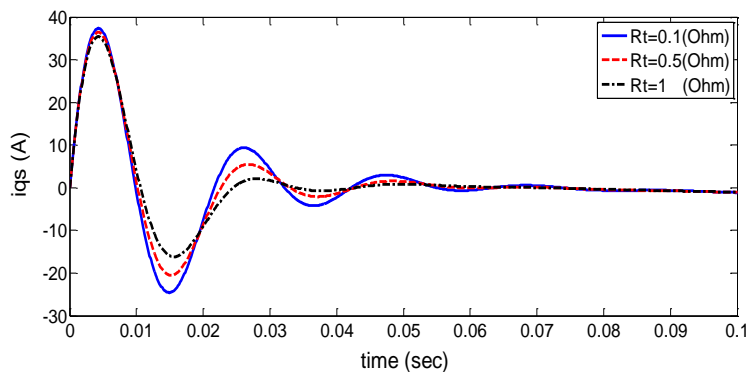
شکل ۱۵. منحنی مشخصه سرعت-زمان با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

شکل (۱۶) تغییرات گشتاور را با تغییر در اندوکتانس خط انتقال نشان می‌دهد که بعد از عبور از حالت گذرای اولیه، ثابت می‌شود و البته با افزایش اندوکتانس خط انتقال حالت گذرای گشتاور، کاهش می‌یابد.

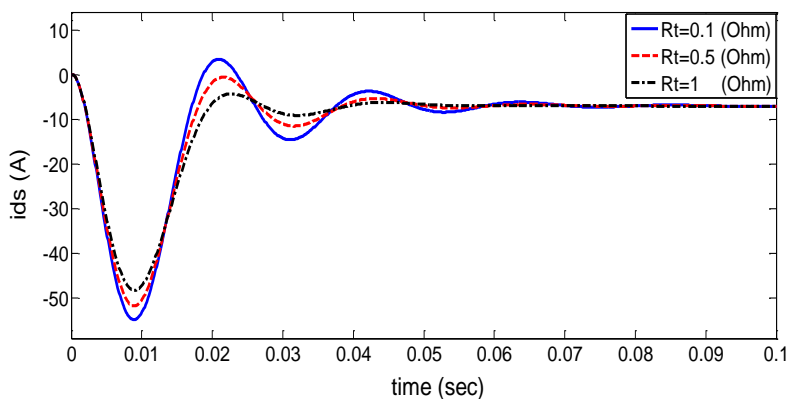


شکل ۱۶. منحنی مشخصه گشتاور-زمان ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

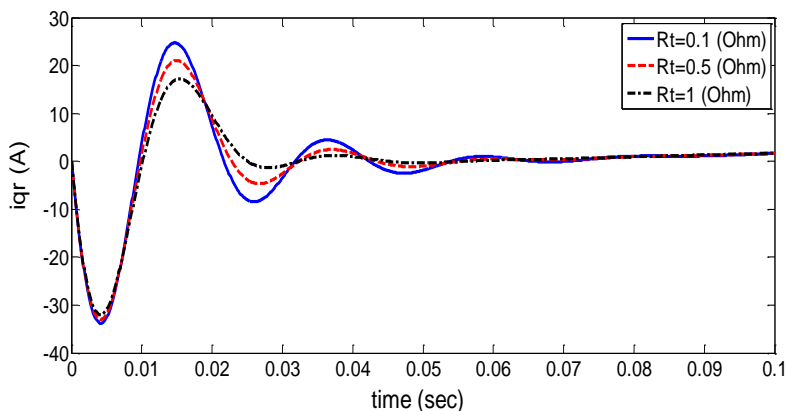
شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) تغییرات جریان محورهای d-q ژنراتور القایی را با تغییرات در نسبت اندوکتانس خط انتقال را نشان می‌دهند که پس از حالت گذرای به مقدار حالت پایدار خود می‌رسند. مطابق شکل‌ها با افزایش مقاومت خط انتقال اندازه حالت گذرا در جریان‌های ژنراتور کاهش می‌یابد.



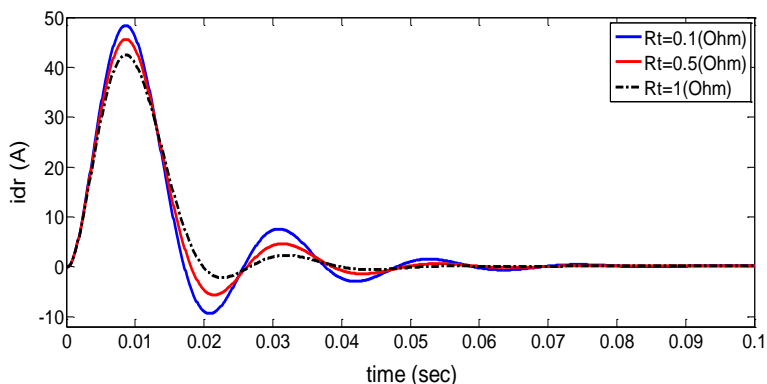
شکل ۱۷. تغییرات جریان i_{qs} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال



شکل ۱۸. تغییرات جریان i_{ds} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال



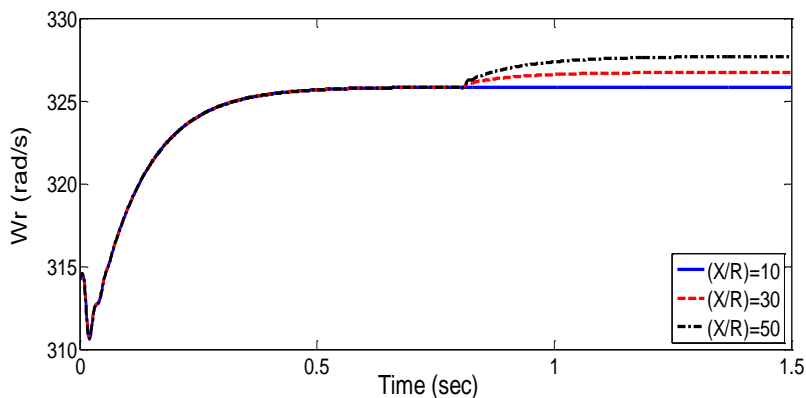
شکل ۱۹. تغییرات جریان i_{qr} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال



شکل ۲۰. تغییرات جریان i_{qr} ژنراتور القایی با تغییر در اندوکتانس خط انتقال

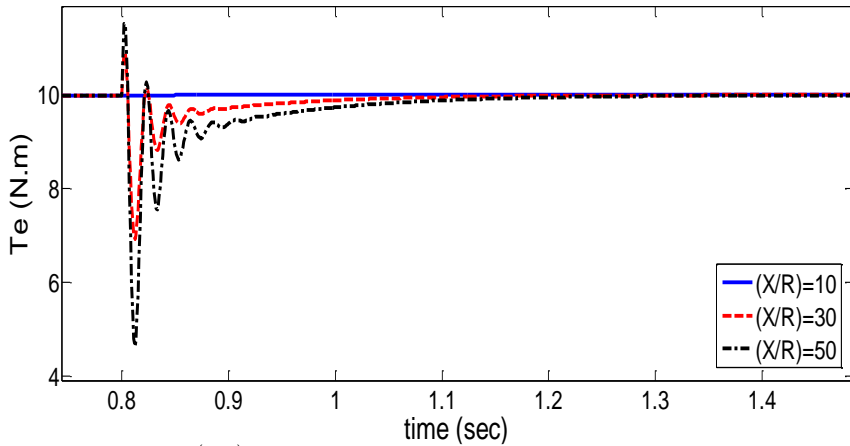
تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

از مشخصاتی که در تحلیل عملکرد ژنراتور به منظور افزایش دقت محاسبات نیاز به بررسی دارد نسبت (X/R) خط انتقال می‌باشد [۲۲]. شکل (۲۱) منحنی مشخصه سرعت-زمان را با تغییرات نسبت (X/R) خط انتقال نشان می‌دهد؛ با افزایش این نسبت، سرعت ژنراتور افزایش پیدا می‌کند.



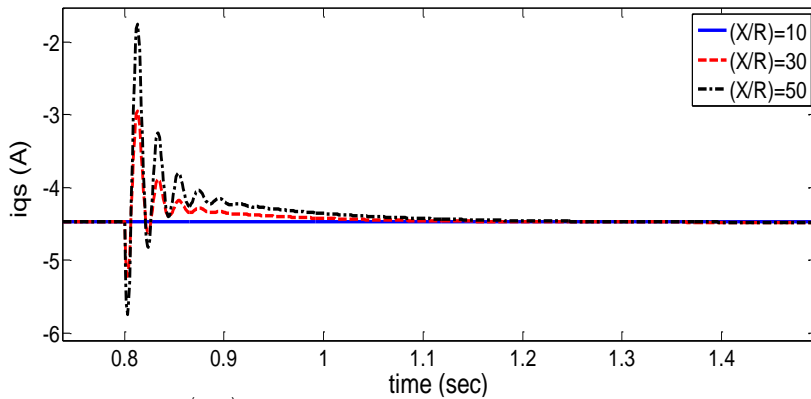
شکل ۲۱. منحنی مشخصه سرعت-زمان با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

شکل (۲۲) تغییرات گشتاور را با نسبت (X/R) خط انتقال نشان می‌دهد که بعد از نوسان نسبتاً زیادی، ثابت می‌شود ولی این تغییرات، تأثیری در مقدار حالت پایدار ندارد.

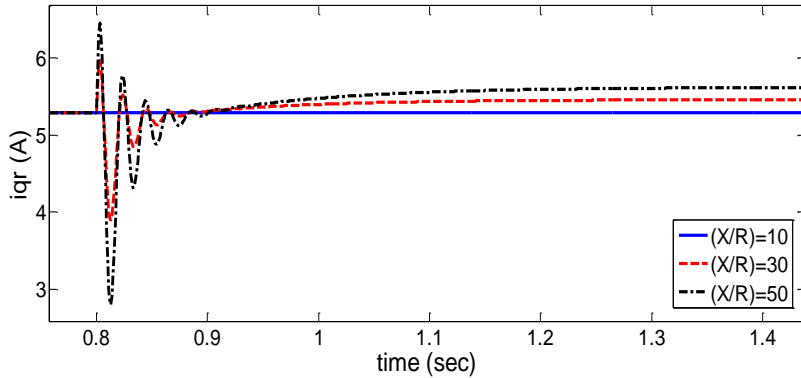


شکل ۲۲. منحنی مشخصه گشتاور-زمان با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

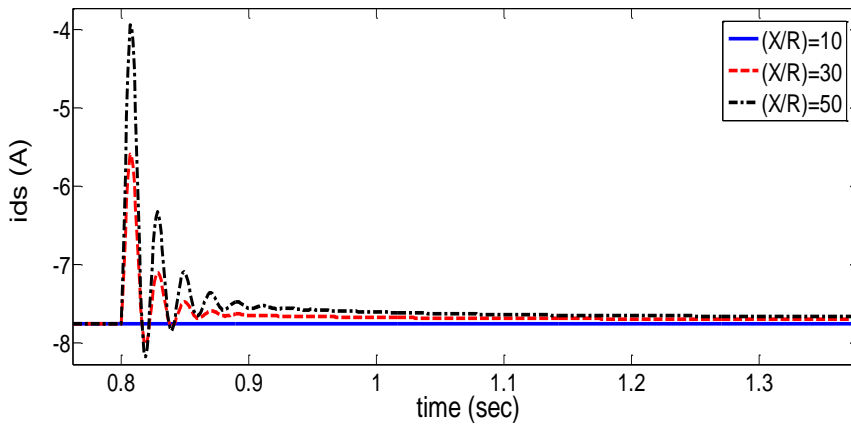
شکل (۲۳) تا (۲۶) تغییرات جریان‌های ژنراتور را با تغییرات (X/R) خط را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر (X/R) جریان ابتدا نوسان می‌کند و سپس به مقدار حالت پایدار خود می‌رسد.



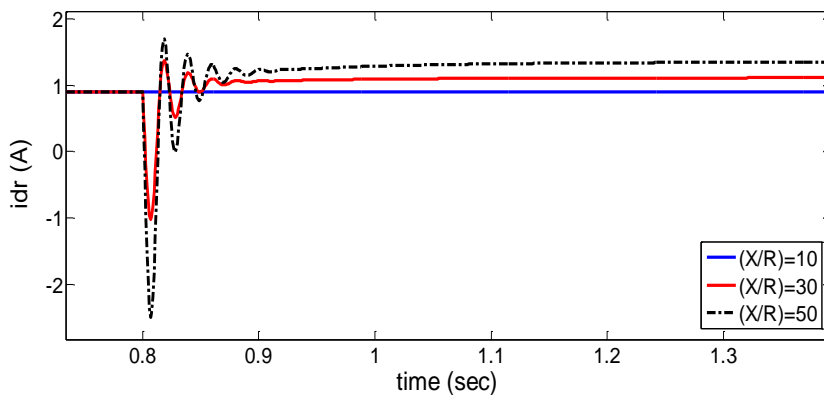
شکل ۲۳. منحنی مشخصه جریان i_{qs} با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال



شکل ۲۴. منحنی مشخصه جریان i_{qr} با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال



شکل ۲۵. منحنی جریان i_{ds} با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال



شکل ۲۶. منحنی مشخصه جریان i_{dr} با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

بررسی مقادیر ویژه

معادلات (۲۱) توصیف‌کننده یک سیستم قدرت، شامل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی است که به‌طور کلی غیرخطی‌اند.

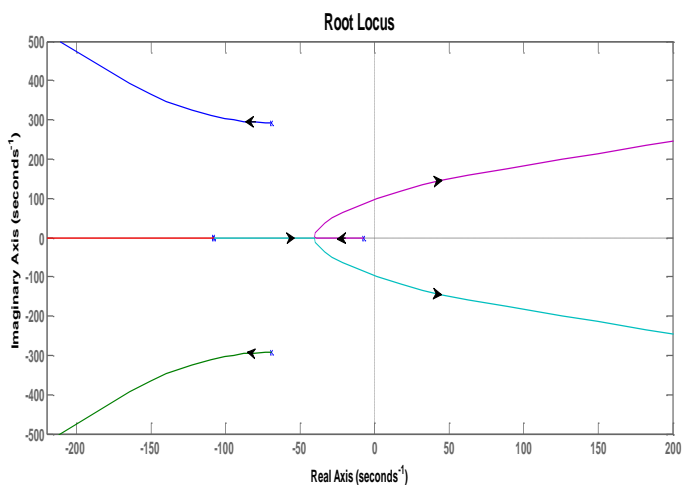
$$\dot{X} = AX + BU \quad (22)$$

پایداری یک نقطه تعادل سیستم دیفرانسیلی- جبری برای یک مقدار معین P ، به مقادیر ویژه ماتریس حالت A بستگی دارد [۱۸]. با استفاده از ماتریس، ژاکوبین کاهش می‌یابد. نقاط تعادل سیستم، مقادیر ویژه سیستم در جدول (۱) نشان داده شده است که همه مقادیر ویژه در سمت چپ محور موهومی قرار دارند و پایداری سیستم مورد مطالعه را تأیید می‌کنند. محدوده تغییرات پارامترهای تجهیزات در پایداری سیستم قدرت بسیار ضروری می‌باشد. با توجه مقادیر ویژه در یک سیستم قدرت می‌توان به بررسی پایداری آن سیستم پرداخت.

همان‌طور که در جدول نیز مشاهده می‌شود تمامی صفر و قطب‌ها در سمت چپ محور مختصات قرار دارند که نشان‌دهنده پایداری سیستم می‌باشد. در صورت وجود صفر یا قطبی در سمت راست سیستم ناپایدار خواهد بود و با توجه به تغییر در آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف می‌توان آن را پایدار کرد.

جدول ۱. مقادیر ویژه سیستم با تغییرات در نسبت (X/R) خط انتقال در حالت پایدار

λ_1	$-۶۹/۰۹+۲۹۲i$
λ_2	$-۶۹/۰۹-۲۹۲i$
λ_3	$-۷/۴۲۲-$
λ_4	$-۱۰۸/۰۳+۱/۰۵i$
λ_5	$-۱۰۸/۰۳-۱/۰۵i$



شکل ۲۷. مکان هندسی ریشه‌ها

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی آنالیز حساسیت و مقادیر ویژه ژنراتور القایی خودتحریک متصل به شبکه به منظور پایداری آن پرداخته شد. بدین منظور ابتدا از مدل ساده ماشین الکتریکی به منظور بیان روابط دینامیکی ژنراتور القایی استفاده شد. در این راستا از مدل ساده که ژنراتور القایی توسط خط انتقال کوتاهی به باس بی نهایت متصل شده استفاده گردید. ابتدا معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار سیستم را به دست آورده سپس به آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف سیستم پرداخته شده است. منحنی تغییرات سرعت ژنراتور القایی پس از کمی افت دور اولیه، سرعت ژنراتور به آرامی افزایش یافته و به سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون می رسد. منحنی مشخصه گشتاور- لغزش را دارای مقدار لغزش منفی به دلیل عملکرد ماشین در حالت ژنراتوری می باشد. گشتاور ژنراتور القایی دارای حالت گذرای نسبتاً زیادی است که پس از زمان نسبتاً کوتاهی به مقدار دائمی خود می رسد. در ادامه منحنی مشخصه جریان های ژنراتور القایی به صورت d و q نشان داده شد. این جریان ها نیز پس از عبور از حالت گذرای اولیه به مقادیر نامی خود در حالت پایدار رسیدند.

تحلیل حساسیت عملکرد ماشین با شرایط اولیه مختلف حل و تغییر پارامترهای سیستم و تأثیر آن ها بر پاسخ های گذرا و ماندگار مورد مطالعه قرار گرفت و با استفاده از این آنالیز حساسیت، به بررسی مقادیر ویژه سیستم و پایداری آن با تغییر در پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شرایط اولیه انتخابی در حل عددی معادلات دیفرانسیل تأثیر بسزایی دارند که دامنه حالت گذرای مشخصه های ژنراتور در اثر آن تغییر می یابد و مقدار حالت گذرای پارامترهای ژنراتور افزایش می یابد البته این تغییرات تأثیری در مقدار حالت پایدار ندارد. تحلیل حساسیت بر روی تمامی پارامترهای مورد مطالعه ژنراتور صورت گرفت و همان طور که مشاهده گردید با افزایش مقادیر پارامترهای مورد مطالعه، میزان حالت گذرا کاهش و پایداری سریع تر می شود.

در ادامه با تغییر در نسبت اندوکتانس و مقاومت خط انتقال به صورت جداگانه به تحلیل رفتار ژنراتور در اثر این تغییرات پرداخته شد و سپس نسبت (X/R) خط انتقال که اهمیت به سزایی در پایداری سیستم دارند مورد بررسی قرار گرفت. البته این تغییرات تأثیری در مقدار نهایی گشتاور ندارد اما مقادیر انتهایی جریان های ژنراتور با توجه به تغییر در امپدانس کل سیستم تغییر کرده است با توجه به نتایج مشاهده شد که مقدار مقاومت و اندوکتانس خط به صورت جداگانه تأثیر به سزایی در جواب سیستم دارد و تغییرات آن باعث تغییرات در پایداری سیستم مورد مطالعه می شود. همان طور که در نتایج نیز مشاهده گردید با افزایش پارامترهای X و R میزان حالت گذار کاهش می یابد ولی تأثیر به سزایی در حالت دائمی منحنی مشخصه سرعت- زمان دارد در صورتی که این تغییرات تأثیر چندانی در حالت پایدار گشتاور ندارد.

در انتها با استفاده از معادلات حالت و مشخص کردن مقادیر ویژه کل سیستم در حالت پایدار به بررسی پایداری سیستم پرداخته شد. همان طور که مشاهده گردید در سیستم پایدار، تمامی صفر و قطب های مقادیر ویژه در سمت چپ مبدأ مختصات قرار گرفته اند که نشان دهنده پایداری سیستم می باشد. در صورت وجود صفر یا قطبی در سمت راست سیستم ناپایدار خواهد بود و با توجه به تغییر در آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف می توان آن را پایدار کرد.

Reference

1. Lamnadi M., Trihi M., Boulezhar A. (2016). "Study of a Hybrid Renewable Energy System for a Rural School in Tagzirt, Morocco". International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), IEEE, 14-17 Nov. 2016, Marrakech, Morocco.
2. Woo S., Park J., and Manuel L. (2020). "Wind Field-Based Short-Term Turbine Response Forecasting by Stacked Dilated Convolutional LSTMs". IEEE Transactions on Sustainable Energy, 11(4), 2294-2304.

3. Sahebkar Farkhani J., Zarecin M., Najafi A., Melicio R., and Rodrigues E. M. (2020). "The Power System and Microgrid Protection—A Review". *Applied Sciences*, 10(22), 8271, 2020.
4. Hansen L. H., et al., (2001). "Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines". Riso National Laboratory, Roskilde, Riso-R-1205 (EN), Denmark, December, Jan. 2001.
5. Sahebkar Farkhani J., Najafi H. R., Nasrabadi A. A. (2013). "Lab-based Comparison of the Performance of Series Connected Induction Generator with Ordinary Induction Generator at Standalone Operating Mode". The Third Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, University of Isfahan. 14-10-11 April. 2016, Isfahan, Iran.
6. Larijani M., Razi L. (2017). "Explain the structure of identifying and prioritizing green jobs in the field of renewable energy: Wind energy". *Karafan journal*, 14(42), 15-32, (in Persian).
7. Zavadil R., Miller N., Ellis A., and Muljadi E. (2005). "Making connections". *IEEE Power Energy Magazine*, 3(6), 26–37.
8. Kim Seul-Ki., Kim Eung-Sang. (2007). "PSCAD/EMTDC-Based Modeling and Analysis of a Gearless Variable Speed Wind". *IEEE Turbine Trans. on Energy Convers*, 22 (2), 421 – 430.
9. Grachev P. Y., Tabachinskiy A. S., and Kanagavel P. (2020). "New Stator Construction and Simulation of High-Efficiency Wind Turbine Generators". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56 (2), 1389-1396.
10. Ackermann T. (2005). "Wind Power in Power Systems". England: John Wiley & Sons Ltd.
11. Kanabar M. and Khaparde S. A. (2008). "Evaluation of Rotor Speed Stability Margin of a Constant Speed Wind Turbine Generator". in *Proceedings of IEEE international Power India Conference*, 12-15 Oct. 2008, New Delhi, India.
12. Chagas, C.C.M., et al. (2020). "From Megawatts to Kilowatts: "A Review of Small Wind Turbine Applications, Lessons from The US to Brazil". *Sustainability*, 12(7), 2760.
13. Nazir, M.S., et al. (2020). "Comparison of Small-Scale Wind Energy Conversion Systems: Economic Indexes". *Clean Technologies*, 2(2), 144-155.
14. Tan H. M., Zivanovic R. (2007). "Transient stability sensitivity analysis of a simplified power system". *Australasian Universities Power Engineering Conference, IEEE*, 9-12 Dec. 2007, Perth, WA, Australia.
15. García Mercado Josué I., Reyes Ramos Víctor M., Horacio Tovar Hernández J., Zuñiga Ayala J. (2018). "Voltage Stability Assessment by the Modal Analysis and the Load-Flow Linear Sensitivity Techniques". *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), IEEE*, 14-16 Nov. 2018, Ixtapa, Mexico.
16. Hasan K., Preece R., Milanovic J. (2017). "Priority ranking of critical uncertainties affecting small-disturbance stability using sensitivity analysis techniques". *IEEE Power & Energy Society General Meeting, IEEE*, 16-20 July 2017, Chicago, USA.
17. Nam H.K., Shim K.S., Kim Y.K., Song S.G., Lee K.Y. (2000). "Contingency ranking for transient stability via eigen-sensitivity analysis of small signal stability model". *Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077), IEEE*, 23-27 Jan. 2000.
18. Shademan H., Sahebkar J. (2014). "Modeling the nonlinear dynamic behavior of a self-excited induction generator in a wind power plant". *Karafan journal*, 35, p. 10, (in Persian).
19. Petru T., Thiringer T. (2002). "Modeling of Wind Turbines for Power System Studies". *IEEE Transactions on energy Conversion*, 17(4), 1132-1139.

20. Popa L. M., Blaabjerg F. and Boldea I. (2004). "Wind Turbine Generator Modeling and Simulation Where Rotational Speed is the Controlled Variable". IEEE Transactions on Industry Applications, 40 (1), pp. 3-10.
21. Seyoum D., Grantham C., Rahman M. F. (2003). "The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine". IEEE Transactions on Industry Applications, 39 (4), 936 – 944.
22. Kumkratug P. (2012). "The Effect of R/X Ratio of the Short Transmission Line on Transient Stability". American Journal of Applied Sciences, 9(3), 365-367.