

مدل سازی رفتار دینامیکی غیرخطی ژنراتور القایی خودتحریک در نیروگاه بادی

حسن شادمان

مدرس دانشگاه فنی و حرفه‌ای، آموزشکده فنی قوچان، خراسان رضوی

جلال صاحبکارفرخانی*

مدرس دانشگاه فنی و حرفه‌ای، آموزشکده فنی قوچان، خراسان رضوی

حمیدرضا نجفی

استادیار دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، خراسان جنوبی

تاریخ پذیرش نهایی: ۹۲/۱۲/۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۹/۳

چکیده

امروزه، ضرورت استفاده از ژنراتورهای بادی به منظور تولید انرژی و مسایل زیست محیطی، اهمیت مطالعه هر چه بیشتر این نوع ژنراتورها را نشان می‌دهد. بدین منظور در این مقاله پس از ارائه مدل غیرخطی سیستم، رفتار دینامیکی غیرخطی ژنراتور القایی در نیروگاه بادی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل سازی سیستم به صورت تحلیلی با نوشتن معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار آن انجام شده است و معادلات دیفرانسیل مذکور توسط روش ریاضی رانگ کوتاه مرتبه چهار حل شده است.

با استفاده از مدل ارائه شده حساسیت پاسخ دینامیکی سیستم در برابر تغییرات پارامترهای مختلف اجزا سیستم از جمله ژنراتور مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که شرایط اولیه انتخابی در حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار ماشین تاثیر به‌سزایی دارند. در ادامه به تحلیل حساسیت در تغییرات سرعت اولیه، تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال و جبران ساز توان راکتیو پرداخته شده است. در انتها با استفاده از معادلات حالت و پیدا کردن نقاط تعادل سیستم و مشخص کردن مقادیر ویژه کل سیستم، می‌توان حساسیت پایداری سیستم را نشان داد.

واژه‌های کلیدی

مدل سازی دینامیکی، تحلیل حساسیت، ژنراتور القایی خودتحریک، نیروگاه بادی و روش رانگ کوتاه مرتبه چهار.

۱. مقدمه

امروزه، با توجه به افزایش روزافزون اهمیت انرژی‌های تجدیدپذیر به‌خصوص انرژی باد، ماشین‌های القایی در حالت ژنراتوری بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و انجام تحقیقات و آرایه دستاوردهای جدید در این زمینه بیش از پیش مورد نیاز است. ماشین‌های القایی قفس سنجایی به دلیل قیمت پایین، مقاوم بودن و سهولت نگهداری به‌وفور در صنعت به کار می‌روند. همین مزایا این ماشین را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای استفاده در سیستم‌های بادی سرعت متغیر مطرح می‌کند (شادمان و همکاران، ۱۳۸۹) و (SahebkarFarkhani & Najafi, 2013). توربین‌های بادی یکی از تکنولوژی‌های انرژی‌های نو می‌باشند که امروزه با سرعت زیادی در حال پیشرفت است. علت پیشرفت سریع آن مسایل زیست‌محیطی و اقتصادی می‌باشد (SahebkarFarkhani & Najafi, 2013). در نتیجه پرداختن به آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

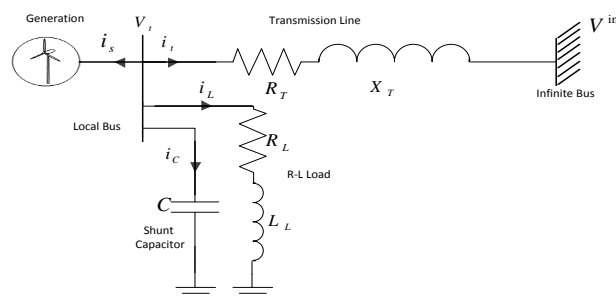
پدیده خودتحریکی در ژنراتور القایی در (Agalgaonkar et al., 2013; Elder et al., 1983) مورد بررسی قرار گرفته است. در (Osheiba & Rehman, 1991; Rajakaruna & Bonert, 1993) مدل‌های مختلفی براساس مرجع $d-q$ آرایه شده است که عملکرد آنها براساس مدل توسعه‌یافته امیدانس، مدل‌هایی براساس ادمیتانس، مدارهای عملیاتی و معادلات توان از این جمله می‌باشند. آنالیز حالت پایدار از دو دیدگاه طراحی و عملیاتی بسیار مهم بوده و در (Murthy et al., 1982; Sridhar et al., 1995) به آنها اشاره شده است. در (Demoulia & Dokopoulos, 1990; Farret et al., 2005) به بررسی حالت پایدار ژنراتور القایی پرداخته شده 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 ماشین‌های 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 به‌منظور کاهش محاسبات و حل معادلات دیفرانسیل، متغیرها را می‌توان به چارچوب مرجع دلخواه انتقال داد که در سرعت زاویه‌ای اختیاری می‌چرخند (SahebkarFarkhani & Najafi, 2013).

در این مقاله به بررسی رفتار دینامیکی غیرخطی ژنراتور القایی خودتحریک، با استفاده از مدل ساده پرداخته شده است. در ادامه به آنالیز حساسیت سیستم با تغییر در پارامترهای مختلف سیستم پرداخته و تاثیر آنها بر پارامترهای مختلف سیستم مورد بررسی قرار گرفته شده است. مدل‌سازی سیستم به‌صورت تحلیلی با نوشتن معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار آن انجام شده است. معادلات دیفرانسیل مذکور توسط روش رانگ کوتا مرتبه چهار حل شده است.

۲. مدل دینامیکی سیستم

به‌منظور بررسی رفتار دینامیکی ژنراتور باید این ژنراتور را به سیستم قدرت وصل کرد. 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. شین بی‌نهایت دارای ولتاژ و فرکانس ثابت بوده و هیچ یک از آنها تحت تاثیر ژنراتور مورد مطالعه تغییر نمی‌کنند. این بدین معناست که ولتاژ شبکه را می‌توان به‌عنوان مرجع در نظر گرفت (SahebkarFarkhani & Najafi, 2013). این مدل شامل دو شین می‌باشد که شین محلی به ژنراتور القایی خودتحریک، جبران‌ساز توان راکتیو و بار محلی متصل شده و باس بی‌نهایت به خط انتقال متصل است (شکل ۱).



شکل ۱. ژنراتور بادی اتصال سری متصل به باس بی‌نهایت

انتقال را در چهارچوب مرجع سنکرون می توان به صورت (۱۲) بیان کرد.

$$V_{qt} = V_q^{\text{inf}} + R_T i_{qt} - \omega_s L_T i_{dt} + L_T P i_{qt} \quad ۱۲$$

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

۳-۲. مدل دینامیکی بار و جبران کننده موازی

بار محلی در نظر گرفته شده در این تحقیق را ثابت و با امپدانس $Z_L = (R_L + jX_L)$ در نظر گرفته شده است. معادلات آن در روابط (۱۳) و (۱۴) آورده شده است:

$$p i_{dL} = (V_{dt} - R_L i_{dL} + \omega_s L_L i_{qL}) / L_L \quad ۱۳$$

$$p i_{qL} = (V_{qt} - R_L i_{qL} + \omega_s L_L i_{dL}) / L_L \quad ۱۴$$

معادلات خازن هنگامی که به باس ژنراتور متصل است به صورت زیر می باشند:

$$p V_{qt} = (i_{qc} - C \omega_s V_{qt}) / C \quad ۱۵$$

$$p V_{dt} = (i_{dc} + C \omega_s V_{dt}) / C \quad ۱۶$$

جریان خازن را می توان با استفاده از جریان خط، ژنراتور و بار به صورت زیر بیان کرد:

$$i_c = -(i_T + i_L + i_s) \quad ۱۷$$

۴-۲. مدل دینامیکی سیستم

مدل دینامیکی سیستم با استفاده از شکل (۱) و مدل دینامیکی خط انتقال، بار و جبران کننده موازی توان راکتیو برای ژنراتور مطابق معادله (۱۸) است.

$$p [i^{\text{sys}}] = [L^{\text{sys}}]^{-1} ([V^{\text{sys}}] - [R^{\text{sys}}] [i^{\text{sys}}] - [G^{\text{sys}}] [i^{\text{sys}}])$$

$$p \omega_r = \left(\frac{1}{2J} \right) (T_L - T_e)$$

$$p i_{qL} = (V_{qt} - R_L i_{qL} - \omega_s L_L i_{dL}) / L_L$$

$$p i_{dL} = (V_{dt} - R_L i_{dL} + \omega_s L_L i_{qL}) / L_L$$

$$p i_{qt} = (V_{qt} - V_q^{\text{inf}} - R_T i_{qt} - \omega_s L_T i_{dt}) / L_T \quad ۱۸$$

$$p i_{dt} = (V_{dt} - V_d^{\text{inf}} - R_T i_{dt} + \omega_s L_T i_{qt}) / L_T$$

$$p V_{qt} = (i_{qc} - C \omega_s V_{qt}) / C$$

$$p V_{dt} = (i_{dc} + C \omega_s V_{dt}) / C$$

این معادلات را می توان به روش رانگ کوتاه مرتبه چهارم حل کرد.

۱-۲. مدل دینامیکی ژنراتور القایی

به طور کلی می توان معادلات دیفرانسیلی ژنراتور القایی را به صورت زیر نوشت:

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

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

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

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

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

$$\lambda_{ds} = L_{1s} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr})$$

$$\lambda_{qs} = L_{1s} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr})$$

$$\lambda_{dr} = L_{1r} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad ۵$$

$$\lambda_{qr} = L_{1r} i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr})$$

با تغییر در جهت جریان در سیم پیچی استاتور می توان از این ماشین به صورت ژنراتور استفاده کرد. معادله گشتاور برای این ماشین در حالت ژنراتوری از رابطه (۶) به دست می آید.

$$T_L - T_e = JP \omega_r + B \omega_r \quad ۶$$

به طور کلی می توان معادلات دیفرانسیلی ژنراتور القایی را با توجه به (۷) به صورت زیر نوشت:

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

$$V = [V_{dt} \quad V_{qt} \quad 0 \quad 0]^T \quad ۸$$

$$i = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T \quad ۹$$

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad ۱۰$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_s & 0 & \omega L_m \\ -\omega L_s & 0 & -\omega L_m & 0 \\ 0 & (\omega - \omega_r) L_m & 0 & (\omega - \omega_r) L_r \\ -(\omega - \omega_r) L_m & 0 & -(\omega - \omega_r) L_m & 0 \end{bmatrix} \quad ۱۱$$

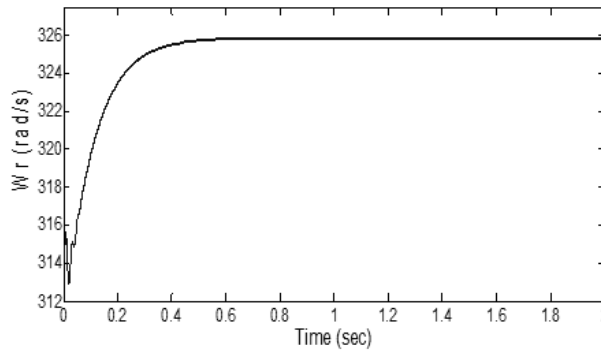
۲-۲. مدل دینامیکی خط انتقال

خط انتقال در نظر گرفته شده دارای امپدانس $Z_T = (R_T + jX_T)$ است که جریان را به باس بی نهایت تزریق می کند. معادلات خط

۳. نتایج شبیه‌سازی

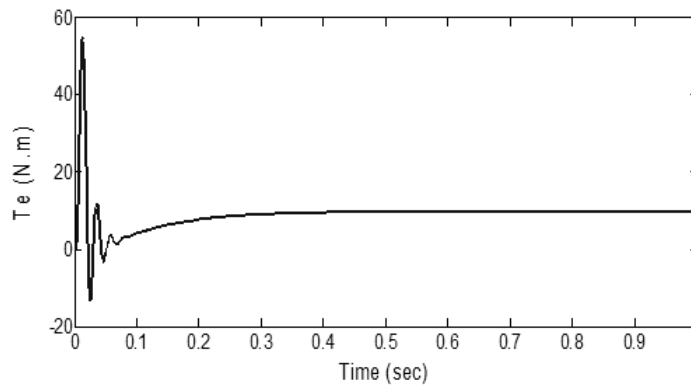
شبیه‌سازی‌ها روی شبکه، مطابق شکل ۱ صورت گرفته است. پارامترهای ماشین القایی سه‌فاز رتور سیم‌پیچی شده در نظر گرفته برای این تحقیق در پیوست آورده شده است. برای حل عددی معادلات دیفرانسیل سیستم به شرایط اولیه متغیرهای حالت نیاز است. مقادیر اولیه این متغیرها حالت گذرای شروع حل معادلات را تعیین می‌کنند. برای واقعی‌تر شدن جواب‌ها سرعت اولیه ماشین برابر

سرعت سنکرون و جریان‌های اولیه ماشین مساوی صفر قرار داده شده‌اند (SahebkarFarkhani & Najafi, 2013). 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 یافته و با سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون می‌رسد.



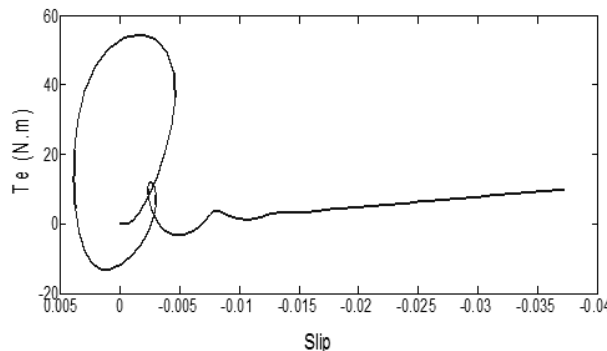
شکل ۲. منحنی مشخصه سرعت - زمان ژنراتور القایی متصل به شبکه

شکل (۳) منحنی مشخصه گشتاور - زمان را نشان می‌دهد. مقدار این گشتاور بعد از حالت گذرای اولیه در حدود ۰/۱ ثانیه به ۱۰ نیوتن متر زیادی می‌باشد.



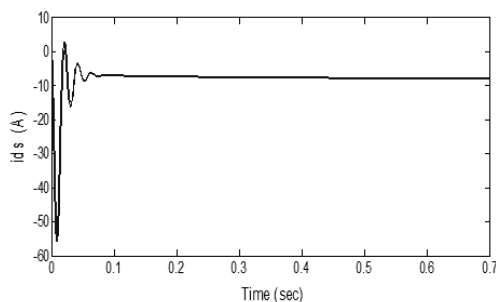
شکل ۳. منحنی مشخصه گشتاور - زمان ژنراتور القایی متصل به شبکه

شکل (۴) منحنی مشخصه گشتاور - لغزش را در ژنراتور القایی متصل به شبکه نشان می‌دهد که راه‌اندازی ژنراتور در سرعت سنکرون می‌باشد. مقدار لغزش منفی به دلیل عملکرد ماشین در حالت ژنراتوری می‌باشد.

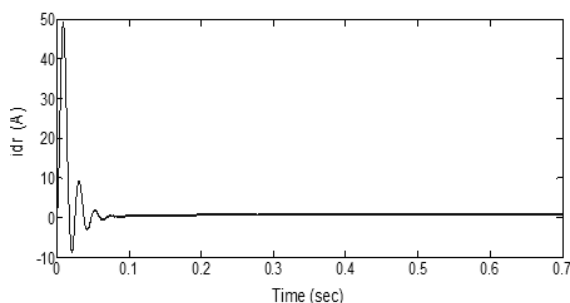


شکل ۴. منحنی مشخصه گشتاور - لغزش ژنراتور القایی متصل به شبکه

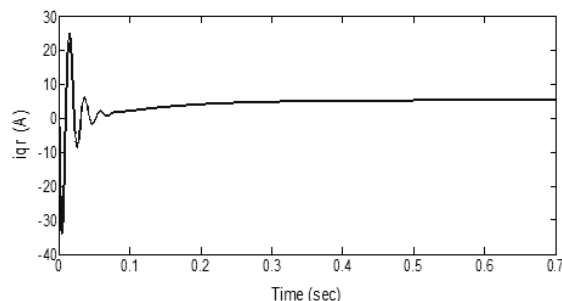
شکل‌های (۵) تا (۸) منحنی مشخصه جریان‌های ژنراتور القایی متصل به شبکه را نشان می‌دهند.



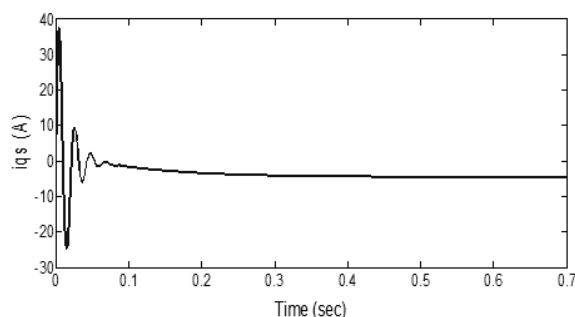
شکل ۵. منحنی مشخصه جریان i_{ds} ژنراتور القایی متصل به شبکه



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_{qs} ژنراتور القایی متصل به شبکه

۳-۱. آنالیز حساسیت

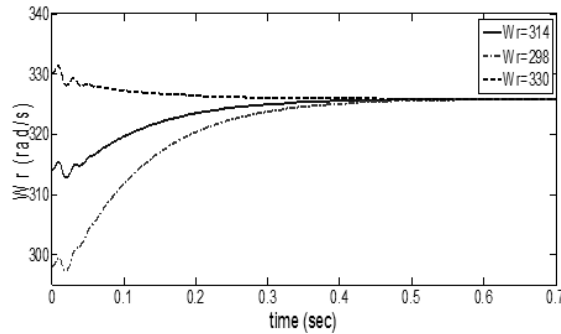
در این قسمت حساسیت عملکرد ماشین با شرایط اولیه مختلف حل و تغییر پارامترهای سیستم و تاثیر آنها بر پاسخ‌های گذرا و ماندگار مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳-۱-۱. اثرات تغییرات سرعت اولیه

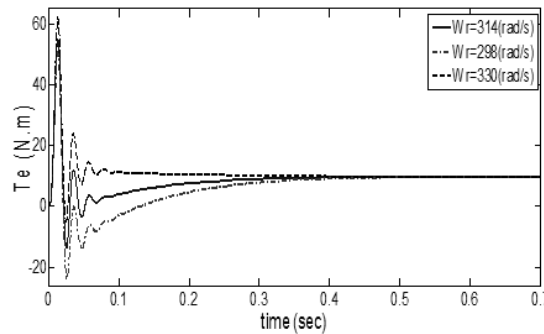
در این بخش اثرات تغییر در سرعت اولیه و مقایسه رفتار آنها با یکدیگر و تغییرات مختلف ژنراتور القایی متصل به شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت‌های اولیه در نظر گرفته شده برای این منظور در سرعت سنکرون، ۵٪ بالاتر از سرعت سنکرون و ۵٪ پایین‌تر از سرعت سنکرون می‌باشد.

به شکل، با افزایش سرعت اولیه، میزان حالت گذرا افزایش یافته ولی سریع‌تر به حالت پایدار می‌رسد.

در شکل (۹) به مقایسه منحنی مشخصه سرعت - زمان در سرعت‌های اولیه مختلف پرداخته شده است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت اولیه، نمودار سرعت - زمان سریع‌تر به حالت پایداری می‌رسد و شکل (۱۰) منحنی مشخصه گشتاور - زمان را در سرعت‌های اولیه مختلف نشان می‌دهد. با توجه

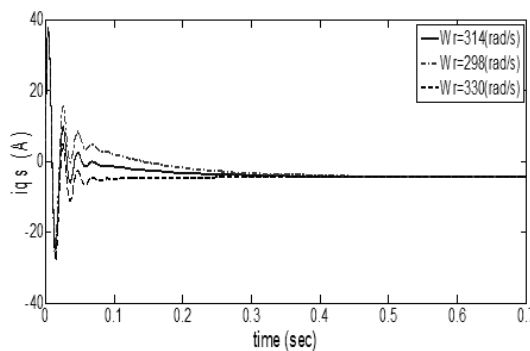


شکل ۹. منحنی مشخصه سرعت - زمان ژنراتور القایی متصل به شبکه با تغییر در سرعت اولیه

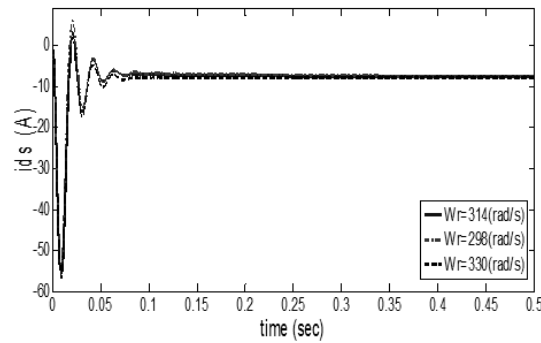


شکل ۱۰. منحنی مشخصه گشتاور - زمان ژنراتور القایی متصل به شبکه با تغییر در سرعت اولیه

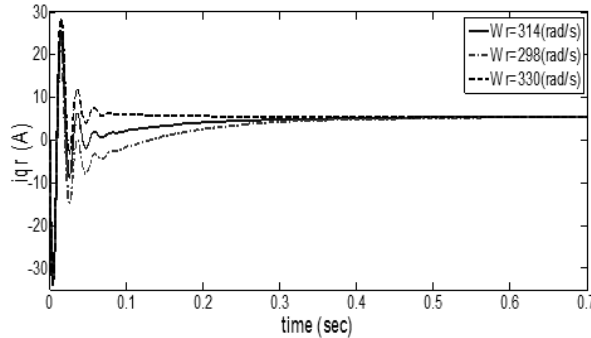
شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) جریان‌های ژنراتور القایی را نشان می‌دهند. گذرای جریان‌ها افزایش می‌یابد. البته تاثیر این تغییرات در محور d همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت اولیه، میزان حالت بسیار ناچیز است.



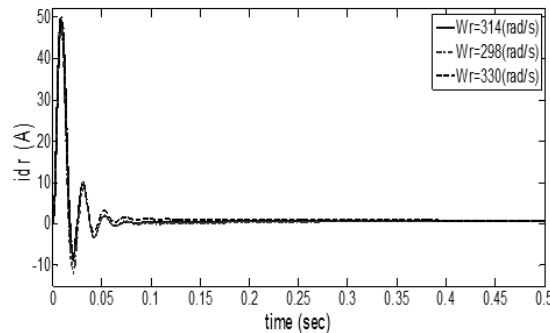
شکل ۱۱. منحنی مشخصه جریان i_{qs} ژنراتور القایی متصل به شبکه با تغییر در سرعت اولیه



شکل ۱۲. منحنی مشخصه جریان i_{ds} ژنراتور القایی متصل به شبکه با تغییر در سرعت اولیه



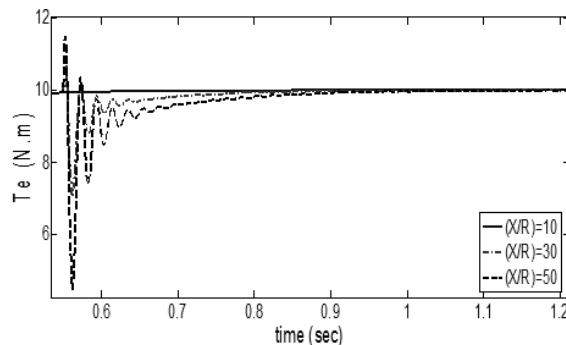
شکل ۱۳. منحنی مشخصه جریان i_{qr} ژنراتور القایی متصل به شبکه با تغییر در سرعت اولیه



شکل ۱۴. منحنی مشخصه جریان i_{dr} ژنراتور القایی متصل به شبکه با تغییر در سرعت اولیه

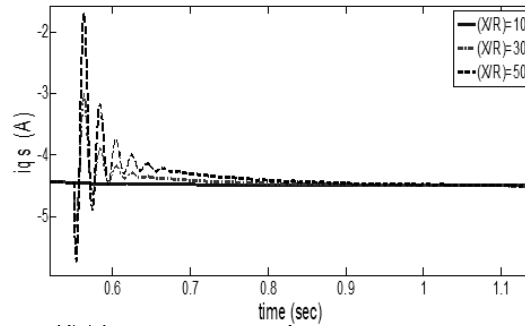
شکل (۱۵) تغییرات گشتاور را با نسبت (X/R) خط انتقال نشان می‌دهد که بعد از نوسان نسبتاً زیادی ثابت شده ولی این تغییرات تأثیری در مقدار حالت پایدار ندارد.

۳-۱-۲. 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 (GodySimoes & Farret, 2008).

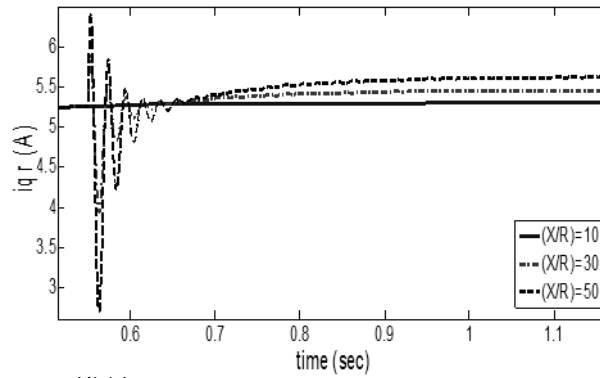


شکل ۱۵. منحنی مشخصه گشتاور - زمان با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

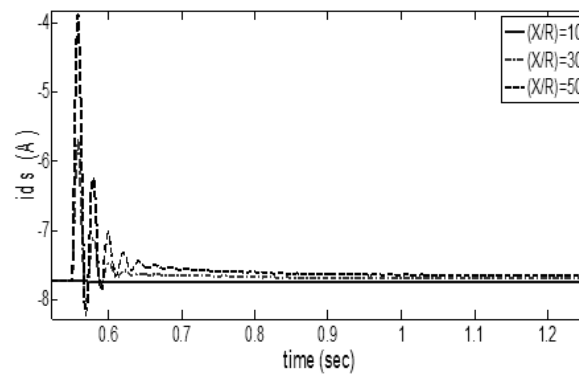
شکل (۱۶) تا (۱۹) تغییرات جریان‌های ژنراتور را با تغییرات (X/R) خط را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود با تغییر (X/R) جریان ابتدا نوسان کرده و سپس به مقدار حالت پایدار خود می‌رسد.



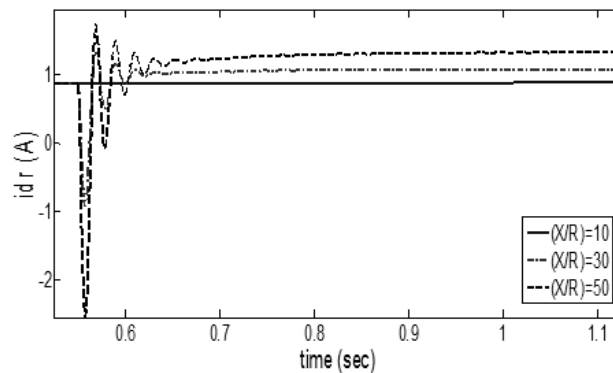
شکل ۱۶. منحنی مشخصه جریان i_{q_s} در تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال



شکل ۱۷. منحنی مشخصه جریان i_{q_r} در تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

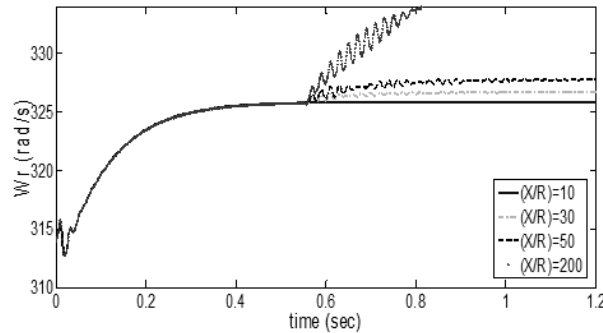


شکل ۱۸. منحنی جریان i_{d_s} در تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال



شکل ۱۹. منحنی مشخصه جریان i_{d_r} در تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

شکل (۲۰) منحنی مشخصه سرعت - زمان را با تغییرات نسبت (X/R) پیدا می کند. البته همانطور که در شکل نیز مشاهده می شود افزایش خط انتقال نشان می دهد. با افزایش این نسبت سرعت ژنراتور افزایش



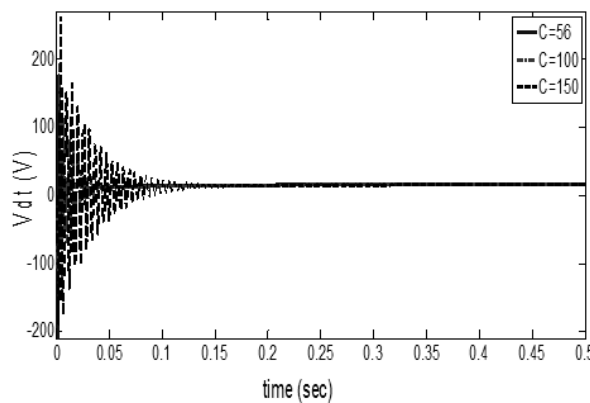
شکل ۲۰. منحنی مشخصه سرعت - زمان با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال

شکل های (۲۱) و (۲۲) به ترتیب ولتاژ q و d باس محلی را نشان می دهند. همانطور که در شکل ها نیز مشاهده می شود با افزایش جبران کننده توان راکتیو ولتاژ بار محلی افزایش می یابد. این در حالی است که مقدار حالت گذرا نیز با افزایش جبران کننده افزایش می یابد. البته تاثیر این تغییرات در محور d کمتر است.

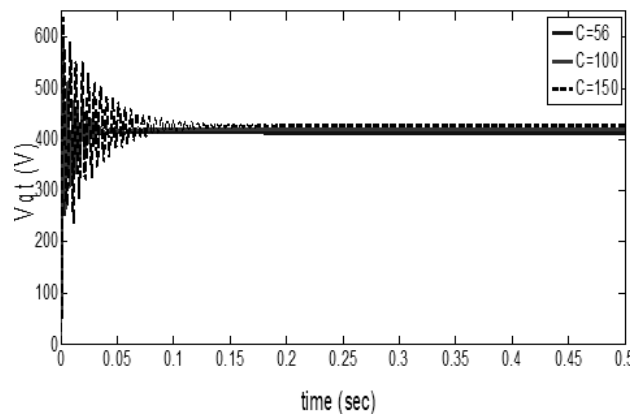
۳-۱-۳. تغییر در جبران ساز توان راکتیو

پدیده خودتحریکی تنها زمانی در ژنراتور القایی رخ می دهد که به ترمینال های استاتور خازن مناسبی متصل گردد (Kumkratug, 2012) (Wagner, 1939) & حد اقل مقدار تقریبی خازن مورد نیاز برای تحریک تحت شرایط بی بار را می توان به صورت زیر محاسبه کرد (Grantham et al., 1989):

$$C_{min} = \frac{1}{W_s^2 L_m} \quad ۱۹$$



شکل ۲۱. منحنی مشخصه ولتاژ d باس محلی با تغییر در جبران کننده توان راکتیو موازی



شکل ۲۲. منحنی مشخصه ولتاژ q باس محلی با تغییر در جبران کننده توان راکتیو موازی

۴. بررسی مقادیر ویژه

معادلات (۲۱) توصیف کننده یک سیستم قدرت، شامل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی است که به طور کلی غیرخطی‌اند.

۲۰

$$\dot{X} = AX + B$$

پایداری یک نقطه تعادل سیستم دیفرانسیلی - جبری برای یک مقدار معین P، به مقادیر ویژه ماتریس حالت A بستگی دارد (Basic et al., 2011).

با استفاده از ماتریس ژاکوبین کاهش یافته و نقاط تعادل سیستم، مقادیر ویژه سیستم در جدول (۱) نشان داده شده است. تمام مقادیر ویژه در سمت چپ محور موهومی قرار دارند و پایداری سیستم مورد مطالعه را تایید می‌کنند.

جدول ۱. مقادیر ویژه سیستم

λ_1	$-۱۶/۶۵ + ۱۶۰۵i$
λ_2	$-۱۶/۶۵ - ۱۶۰۵i$
λ_3	$-۱۶/۶۵ - ۹۷۷i$
λ_4	$-۱۶/۶۵ + ۹۷۷i$
λ_5	$-۹/۲۱$
λ_6	$-۱۰۷/۴ - ۱۸/۲۳i$
λ_7	$-۱۰۷/۴ + ۱۸/۲۳i$
λ_8	$-۶۴/۷۶ + ۲۹۲/۷i$
λ_9	$-۶۴/۷۶ - ۲۹۲/۷i$
λ_{10}	$-۱/۶۶ + ۳۱۴i$
λ_{11}	$-۱۶/۶۷ - ۳۱۴i$

۵. نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی رفتار دینامیکی ژنراتور القایی خودتحریک متصل به شبکه پرداخته شد. در ژنراتور القایی برای آنالیز و بررسی به مدل‌های ساده نیاز است. در این راستا از مدل ساده که ژنراتور القایی توسط خط انتقال کوتاهی به باس بی‌نهایت متصل شده استفاده گردید. شرایط اولیه انتخابی در حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم بر رفتار ماشین تاثیر به‌سزایی دارند، به‌ویژه سرعت اولیه انتخابی که دامنه حالت گذرای مشخصه‌های ژنراتور در اثر آن تغییر می‌یابد. تغییر در مقدار شرایط اولیه انتخابی، تاثیری در مقدار نهایی پارامترهای ژنراتور ندارد. با افزایش سرعت اولیه محرک راه‌انداز تا نزدیکی سرعت حالت پایدار، جریان‌ها و گشتاور سریع‌تر به حالت پایداری می‌رسند و مقدار حالت گذرای پارامترهای ژنراتور افزایش می‌یابد. البته این تغییرات تاثیری در مقدار حالت پایدار ندارد.

در ادامه با تغییر در نسبت (X/R) خط انتقال و جبران‌کننده توان راکتیو به بررسی تغییرات رفتار پارامترهای سیستم پرداخته شد. همانطور که مشاهده شد با افزایش بیشتر نسبت (X/R) خط انتقال سیستم ناپایدار می‌گردد. البته با استفاده از معادلات حالت و مشخص کردن مقادیر ویژه کل سیستم به بررسی پایداری سیستم پرداخته شد. تغییرات در جبران‌کننده توان راکتیو باعث افزایش مقدار ولتاژ باس محلی شد که البته با افزایش این جبران‌کننده میزان حالت گذرای اولیه نیز افزایش می‌یابد.

پی‌نوشت‌ها

پارامتر ماشین القایی رتور سیم‌پیچی شده عبارتند از (Taylor, 1994):

توان نامی ماشین ۳/۶ KW، فرکانس ۵۰ Hz، ۴۱۵ ولت، ۷/۸ آمپر فرکانس ۵۰ Hz، ۴ قطب، $Rr=۲/۷\Omega$ و $Rs=۱/۷\Omega$ ، $L1r=L1s=۱۱/۴mH$ می‌باشند.

منابع

11. GodySimoes, M. & Farret, F. (2008), “**Alternative energy systems, design and analysis with induction generators,**” 2nd edition, CRC Press, Taylor & Francis group, Boca Raton London, New.
12. Grantham, C.; Sutanto, D. & Mismail, B. (1989), “**Steady-state and transient analysis of self-excited induction generators,**” In Proc. Inst. Elect. Eng., Pt. B., pp. 61–68.
13. Grantham, C.; Sutanto, D. & Mismail, B. (1989), “**Steady-state and transient analysis of self-excited induction generators,**” In Proc. Inst. Elect. Eng., Pt. B., pp. 61–68.
14. Hallenius, K.E.; Vas, P. & Brown, J.E. (1991), “**The analysis of a saturated self-excited asynchronous generator,**” IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 6, No. 2, pp. 336–345.
15. 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.
16. Murthy, S.S.; Malik, O.P. & Tandon, A.K. (1982), “**Analysis of self-excited induction generator,**” Proc. Inst. Elect. Eng. C, Vol. 129, No. 6, pp. 260–265.
17. Novotony, D.W.; Gritter, D.J. & Studtmann, G.H. (1977), “**Self-excitation in inverter driven induction machines,**” IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. 96, No. 4, pp.1117–1125.
18. Osheiba A.M. & Rehman, M.A. (1991), “**Performance analysis of self-excited induction and reluctance generators,**” Elect. Mach. Power Syst., Vol. 19, pp. 477–499.
19. Rajakaruna S. & Bonert, R. (1993), “**A technique for the steady state analysis of a induction generator with variable speed,**” IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 8, No. 4, pp. 757–761.
20. SahebkarFarkhani, 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.
۱. حسن شادمان، محمدحسین بقایی، طاهره غلامیان (۱۳۸۹)، «آموزش گام به گام تکنولوژی برق صنعتی»، انتشارات آیلار تهران.
2. Agalgaonkar, A.; Dobariya, C.; Kanabar, M. & Khaparde, S.A. (2006), “**Optimal sizing of distributed generation in micro grid,**” presented at the proceedings of IEEE international power India conference, New Delhi.
3. Alolah A.L. & Alkanthal, M.A. (2000), “**Optimization based steady state analysis of three phase SEIG,**” IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 15, No. 1, pp. 61–65.
4. Bašić, M.; Vukadinović, D. & Lukač, D. (2011), “**Novel dynamic model of self-excited induction generator with iron losses,**” International journal of mathematical models and methods in applied sciences.
5. Chan, T.F. (1994), “**Steady state analysis of self-excited induction generators,**” IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 9, No. 2, pp. 288–296.
6. Chan, T.F. (1995), “**Analysis of self-excited induction generators using an iterative method,**” IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 10, No. 3, pp. 502–507.
7. Chan, T.F. & Lai, L.L. (2001), “**Steady-state analysis and performance of a stand-alone three-phase induction generator with asymmetrically connected load impedances and excitation capacitances,**” IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 16, No. 4, pp. 327–333.
8. Demoulias C.S. & Dokopoulos, P.S. (1990), “**Transient behavior and self-excitation of wind-driven induction generator after its disconnection from the power grid,**” IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 5, No. 2, pp. 272–278.
9. Elder, J.M.; Boys, J.T. & Woodward, J.L. (1983), “**The process of self-excitation in induction generators,**” Proc. Inst. Elect. Eng. Elec. Eng. B, Vol. 130, No. 2, pp. 103–108.
10. Farret, F.A.; Palle, B. & Simoes, M.G. (2005), “**State space modeling of parallel self-excited induction generators for wind farm simulation**” IEEE transaction on industry applications, Vol. 41, No. 4.

21. SahebkarFarkhani, J. & Najafi, H. R. (2013), **“Dynamic analysis of wind turbine implemented with series connected induction generator,”** The third Iranian conference on renewable energy and distributed generation, University of Isfahan.
22. Sauer, P.W. & Pai, M.A. (1998), **“Power system dynamics and stability,”** Upper saddle river, NJ: Prentice-Hall.
23. 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, Vol. 39, No. 4.
24. Singh, S.P.; Singh, B. & Jain, M.P. (1992), **“Steady state analysis of self-excited pole changing induction generator,”** J. Inst. Eng., Vol. 73, pp.137–144.
25. Sridhar, L.; Singh, B. & Jha, C.S. (1995), **“Transient performance of the Self-regulated short shunt self-excited induction generator,”** IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, pp. 261-267.
26. Taylor, C.W. (1994), **“Power system voltage stability,”** New York: McGraw-Hill, Inc.
27. Tandon, A.K.; Murthy, S.S. & Berg, G.J. (1984), **“Steady state analysis of capacitor self-excited induction generators,”** IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. 103, No. 3, pp. 612–618.
28. Wang, L. & Lee, C.H. (1997), **“A novel analysis of the performance of an isolated self-excited induction generator,”** IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 12, No. 2, pp. 109–115.
29. Wagner, C. (1939), **“Self-excitation of induction motors,”** Trans. IEEE, Vol. 58, pp 47-51.