

روشی جدید برای تخمین جریان تحریک در ژنراتور سنکرون بدون جاروبک مبتنی بر سیستم تحریک سنکرون

کامیلا حشمتی^۱، مصطفی شاه نظری^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه یزد، یزد، k.heshmati@stu.ac.ir

^۲ استادیار، دانشگاه یزد، یزد، shahnazari@yazd.ac.ir

چکیده

ژنراتورهای سنکرون بدون جاروبک بواسطه قابلیت اطمینان بالا و نیاز کم به تعمیر و نگهداری در بسیاری کاربردها مورد استفاده قرار می گیرند. در سیستم تحریک بدون جاروبک اندازه گیری ولتاژ و جریان تحریک ژنراتور اصلی امکان پذیر نیست و لذا تخمین این کمیت ها در مواردی چون پایش وضعیت و تشخیص خطا، تخمین پارامتر، کنترل و حفاظت از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این مقاله دو روش برای تخمین جریان تحریک در ژنراتور سنکرون بدون جاروبک مشتمل بر سیستم تحریک از نوع سنکرون ارائه شده است. روش اول بر کمیت های سمت ژنراتور تحریک استوار است که به موقعیت رتور و زاویه کموتاسیون وابسته می باشد. اما روش دوم از کمیت های سمت ژنراتور اصلی برای تخمین استفاده می کند و به موقعیت رتور بستگی ندارد. نتایج شبیه سازی قابلیت این روش را در تخمین جریان تحریک به خوبی نشان می دهد.

واژه های کلیدی

ژنراتور سنکرون، سیستم تحریک بدون جاروبک، تخمین جریان تحریک

۱-مقدمه

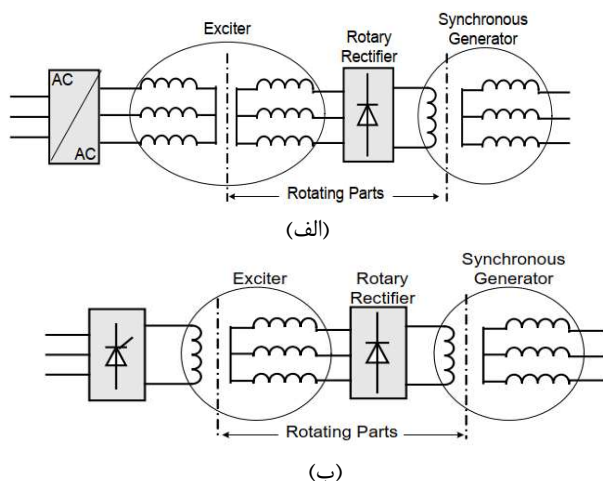
ژنراتورهای سنکرون از نوع رتور سیم پیچی شده بسته به نوع تحریک به دو دسته با جاروبک و بدون جاروبک تقسیم می شوند. در حالت بدون جاروبک ذغال ها و حلقه های لغزان حذف شده و ضمن افزایش قابلیت اطمینان سیستم نیاز به تعمیر و نگهداری کاهش می یابد [۱-۳]. با عنایت به این ویژگی ها ژنراتورهای سنکرون بدون جاروبک علاوه بر کاربرد معمول برای تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه ها، در کاربردهای دیگری نیز مورد استفاده قرار می گیرند که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف- سیستم های تولید توان در محل (on-board) و یا استارت-ژنراتور که در آنها قابلیت اطمینان و ایمنی بسیار مهم است مانند کاربردهای هوافضا و تجهیزات دریایی [۴-۶].

ب- کاربرد هایی که هزینه تعمیر و نگهداری بالایی دارند مانند سیستم های تبدیل انرژی جزر و مدی (tidal) و توربین های بادی نصب شده در دریا (off-shore) [۷-۸].

ج- سیستم های تولید توان متوسط و کوچک جهت تامین انرژی در ریز شبکه ها، مناطق دورافتاده، منابع انرژی اضطراری و ... [۹-۱۱].

در سیستم تحریک بدون جاروبک توان مورد نیاز تحریک را می توان از دو روش تامین نمود. در ساختار اول از یک ماشین القایی سه فاز رتور سیم پیچی شده استفاده می شود بگونه ای که استاتور از یک مبدل کنترل شده تغذیه شده و ولتاژ القایی در رتور از طریق یک یکسوساز دیودی گردان به تحریک ژنراتور اعمال می شود (سیستم تحریک القایی) [۷]. در ساختار دوم تحریک از طریق یک ژنراتور سنکرون با طراحی معکوس (میدان ساکن و آرمیچر گردان) تامین می شود (ژنراتور تحریک اصلی). ولتاژ آرمیچر که روی رتور قرار دارد توسط یکسوساز گردان یکسو شده و به سیم پیچ تحریک ژنراتور اصلی اعمال می شود. سیم پیچ تحریک ژنراتور نیز از طریق یک مبدل کنترل شده توسط یک ژنراتور سنکرون آهنربای دایم تغذیه می شود (سیستم تحریک سنکرون). شکل (۱) ساختار سیستم تحریک القایی (الف) و سیستم تحریک سنکرون (ب) را نشان می دهد.



شکل ۱: ساختار سیستم تحریک بدون جاروبک
الف- سیستم تحریک القایی ب- سیستم تحریک سنکرون

با توجه به توضیحات فوق، در ساختار بدون جاروبک دسترسی مستقیم به سیم پیچ تحریک ژنراتور اصلی امکان پذیر نیست و لذا ولتاژ/توان خروجی ژنراتور از طریق مبدل کنترل شده متصل به ژنراتور تحریک اصلی توسط سیستم تثبیت ولتاژ (AVR) کنترل و تنظیم می گردد.

از آنجا که ولتاژ و جریان تحریک ژنراتور اصلی قابل اندازه گیری نیستند، موضوعاتی همچون شناسایی و تخمین پارامتر، پایش وضعیت و اعمال روش های کنترلی جدید در ژنراتور های سنکرون بدون جاروبک همواره بعنوان یک چالش مد نظر محققان بوده است. در [۱۲] دو روش برای تخمین جریان تحریک در موتور سنکرون بدون جاروبک ارائه شده است. در روش اول جریان های سه فاز سیم بندی رتور از روی کمیت های سمت استاتور تخمین زده شده و با فرض مدل ساده یک سو ساز، جریان تحریک محاسبه می شود. در روش دوم ابتدا ولتاژ های سه فاز سمت رتور با استفاده از کمیت های سمت استاتور محاسبه شده و سپس بر مبنای آن جریان تحریک تخمین زده می شود. جریان تخمینی سپس در سیستم کنترل برداری سرعت متغیر موتور سنکرون مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۳] یک سیستم کنترل بدون سنسور موتور سنکرون رتور سیم پیچی شده مورد بررسی قرار گرفته است که در آن سنسور های جریان استاتور حذف شده و این جریان ها با استفاده از یک رویکرد غیر خطی تخمین زده شده اند. همچنین در [۱۴] از تخمینگر نزدیکترین همسایگی (k-NN) مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تخمین مقادیر پارامتر های ماشین به همراه جریان تحریک در موتور سنکرون رتور سیم پیچی شده استفاده شده است.

اخیرا روش ارائه شده در [۱۲] جهت محاسبه جریان تحریک در سیستم تحریک بدون جاروبک از نوع القایی توسعه داده شده است [۱۵-۱۶]. روش های مذکور در این مطالعات به موقعیت رتور وابسته نیستند اما از طرفی پیاده سازی آنها به محاسبات نسبتا پیچیده نیاز دارد.

همانگونه که اشاره شد در پژوهش های مذکور بر روی تخمین جریان تحریک در سیستم تحریک بدون جاروبک از نوع القایی و یا حذف سنسور جریان در درایو کنترل موتور سنکرون رتور سیم پیچی شده تمرکز شده است اما در زمینه سیستم تحریک بدون جاروبک از نوع سنکرون مطالعه جامعی صورت نگرفته است. در [۱۷] نویسندگان با هدف شناسایی پارامتر های یک واحد تولید توان مشتمل بر تحریک بدون جاروبک از نوع سنکرون، ولتاژ تحریک را تخمین زده و با استفاده از آن پارامتر های ژنراتور اصلی (راکتانس ها و ثابت زمانی ها) به همراه پارامتر های سیستم تحریک از نوع IEEE AC7B شناسایی شده اند. در این مقاله دو روش برای تخمین جریان تحریک در ژنراتور سنکرون با تحریک بدون جاروبک از نوع سنکرون ارائه شده است. در روش اول مدل ولتاژ پشت راکتانس (VBR) ژنراتور تحریک استخراج شده و سپس بر مبنای مدل مقدار میانگین یک سو ساز گردان روشی برای تخمین جریان تحریک ارائه شده که به موقعیت رتور و حالت

عملکردی یک سو ساز گردان وابسته است. اما در روش دوم جریان تحریک با استفاده از کمیت های سمت استاتور ژنراتور اصلی استخراج شده و به موقعیت رتور وابسته نیست.

در ادامه در بخش دوم این مقاله روابط مربوط به مدل VBR ژنراتور تحریک استخراج شده و سپس بر مبنای این روابط مدل مقدار میانگین یک سو ساز بیان شده است. در بخش سوم روش تخمین جریان تحریک ارائه شده و سپس در بخش چهارم کارایی روش مذکور با استفاده از داده های شبیه سازی بررسی و ارزیابی شده است. در انتها نیز نتایج بررسی این روش بیان شده است.

۲- مدل سازی ژنراتور تحریک

در ساختار ژنراتور تحریک سیم پیچ میدان روی استاتور (ساکن) و سیم بندی سه فاز آرمیچر روی رتور قرار دارند. با این وجود روابط ریاضی توصیف کننده رفتار ماشین تفاوتی با ساختار معمول ندارد. از سوی دیگر توان ژنراتور تحریک بسیار کمتر از ژنراتور اصلی بوده و لذا فاقد سیم پیچ میراکننده است. بنابراین روابط ولتاژ-جریان ژنراتور تحریک در قاب مرجع دوماحوری رتور بصورت زیر بیان می شوند شکل (۲):

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \omega_r \lambda_{dr} + p \lambda_{qr} \quad (1)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} - \omega_r \lambda_{qr} + p \lambda_{dr} \quad (2)$$

$$v_{0r} = r_r i_{0r} + p \lambda_{0r} \quad (3)$$

$$v_{fe} = r_{fe} i_{fe} + p \lambda_{fe} \quad (4)$$

در این روابط p عملگر مشتق (d/dt) است. شارهای پیوندی نیز طبق روابط زیر بیان می گردند:

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + \lambda_{mqr} \quad (5)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + \lambda_{mdr} \quad (6)$$

$$\lambda_{0r} = L_{lr} i_{0r} \quad (7)$$

$$\lambda_{fe} = L_{lfe} i_{fe} + \lambda_{mdr} \quad (8)$$

$$\lambda_{mq} = L_{mqr} i_{qr} \quad (9)$$

$$\lambda_{md} = L_{mdr} (i_{dr} + i_{fe}) \quad (10)$$

$$\lambda_{qr} = L_q i_{qr} \quad (11)$$

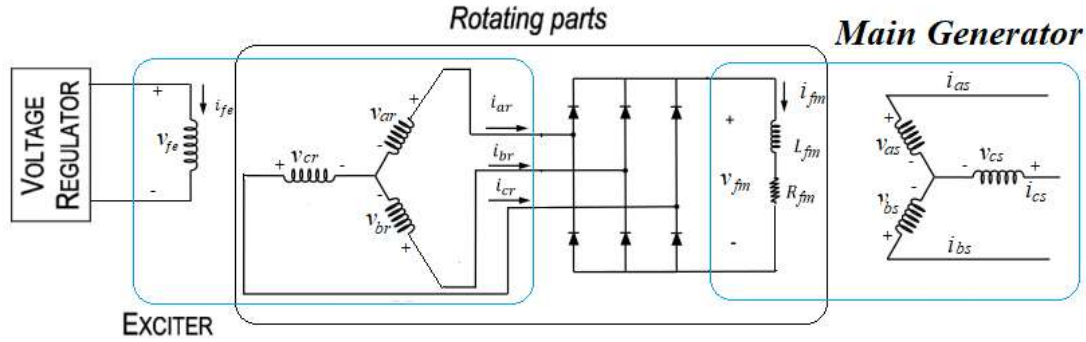
$$\lambda_{dr} = L_d' i_{dr} + \lambda_d'' \quad (12)$$

$$L_q = L_{lr} + L_{mqr} \quad (13)$$

$$L_d' = L_{lr} + L_{md}' \quad (14)$$

$$\lambda_d'' = L_{md}'' \left(\frac{\lambda_{fm}}{L_{lfe}} \right) \quad (15)$$

$$L_{md}'' = \left(\frac{1}{L_{mdr}} + \frac{1}{L_{lfe}} \right)^{-1} \quad (16)$$



شکل ۲: ساختار ژنراتور سنکرون بدون جاروبک مشتمل بر ژنراتور تحریک و یکسوساز گردان

به همین ترتیب بر اساس روش تابع کلیدزنی رابطه بین جریان‌های سه فاز آرمیچر و جریان خروجی یکسوساز عبارت است از:

$$\begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} i_{fm} \quad (25)$$

که در آن \$S_a\$, \$S_b\$ و \$S_c\$ توابع کلیدزنی یکسوساز می‌باشند.

با جایگذاری توابع مذکور در رابطه (۲۴) داریم:

$$i_{dr} = \frac{2}{3} i_{fm} \left(S_a \sin \theta_r + S_b \sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + S_c \sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (26)$$

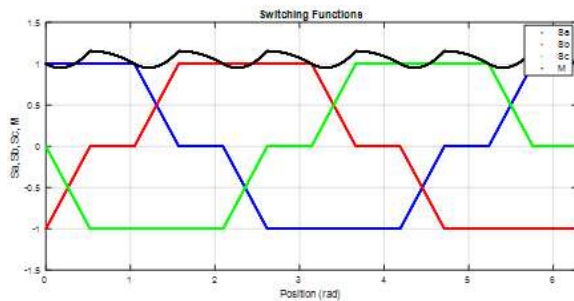
در نهایت با توجه به روابط (۲۴) و (۲۶) جریان تحریک ژنراتور اصلی را می‌توان بصورت زیر بدست آورد:

$$i_{dr} = \left(\int (v_{fe} - r_{fe} i_{fe}) dt - L_{fe} i_{fe} \right) / (M \cdot L_{md}) \quad (27)$$

که در آن:

$$M = \frac{2}{3} \left(S_a \sin \theta_r + S_b \sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + S_c \sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (28)$$

توابع \$S_a\$, \$S_b\$ و \$S_c\$ و در نتیجه مقدار \$M\$ به موقعیت رتور و نیز زاویه کموتاسیون وابسته هستند. با مشخص بودن این مقادیر می‌توان جریان تحریک را در هر لحظه محاسبه نمود. این کمیت‌ها برای زاویه کموتاسیون \$\frac{\pi}{6}\$ در شکل (۳) ترسیم شده‌اند.



شکل ۳: توابع کلیدزنی و تغییرات کمیت \$M\$

۳-۲- تخمین بر مبنای کمیت‌های ژنراتور اصلی

مدل ریاضی ژنراتور اصلی مشابه ژنراتور تحریک می‌باشد. لذا از تکرار روابط صرفنظر می‌گردد. شایان ذکر است که در بیان مدل این ژنراتور

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \omega_r L_d'' i_{dr} + \omega_r \lambda_d'' + L_q p i_{qr} \quad (17)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} - \omega_r L_q i_{qr} + L_d'' p i_{dr} + p \lambda_d'' \quad (18)$$

اگر از تغییرات شار پیوندی میدان (\$\lambda_{fm}\$) صرفنظر کنیم، آنگاه \$p \lambda_d'' = 0\$ بوده و رابطه ولتاژ خروجی یکسوساز را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۸]:

$$v_{fm} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \omega_r \lambda_d'' - \frac{3}{\pi} \omega_r L_d'' i_{fm} - \frac{3L_q + L_d''}{2} p i_{fm} \quad (19)$$

همچنین با فرض عملکرد یکسوساز دیودی در حالت یک (بار کم) زاویه کموتاسیون از رابطه غیر خطی زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$\sqrt{3} \lambda_d'' (1 - \cos u) = \left[(L_q - L_d'') \sin(2u - 2\pi/3) + \frac{L_q + 3L_d''}{2} \right] i_{fm} \quad (20)$$

شکل (۲) ساختار ژنراتور سنکرون بدون جاروبک را همراه با یکسوساز دیودی نشان می‌دهد.

۳- تخمین جریان تحریک

۳-۱- تخمین بر مبنای ژنراتور تحریک

با توجه به روابط (۸) و (۱۰) رابطه شار پیوندی میدان در ژنراتور تحریک را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\lambda_{fe} = L_{fe} i_{fe} + L_{md} i_{dr} \quad (21)$$

همچنین با توجه به (۴) داریم:

$$\lambda_{fe} = \int (v_{fe} - r_{fe} i_{fe}) dt \quad (22)$$

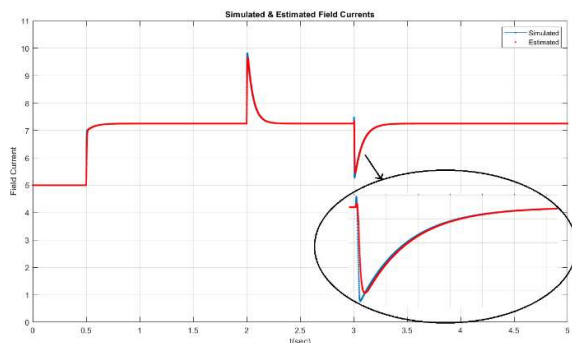
و لذا جریان \$i_{dr}\$ را می‌توان مطابق زیر نوشت:

$$i_{dr} = \left(\int (v_{fe} - r_{fe} i_{fe}) dt - L_{fe} i_{fe} \right) / L_{md} \quad (23)$$

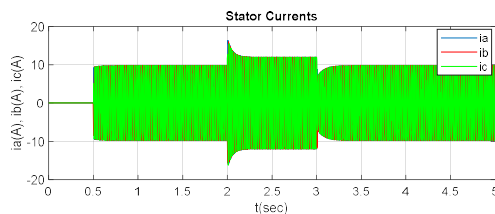
با توجه به ماتریس تبدیل پارک رابطه بین جریان \$i_{dr}\$ و جریان‌های سه فاز آرمیچر را می‌توان بصورت زیر در نظر گرفت:

$$i_{dr} = \frac{2}{3} \left(i_{ar} \sin \theta_r + i_{br} \sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + i_{cr} \sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (24)$$

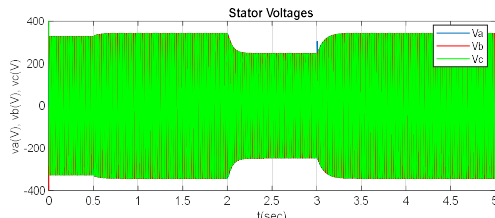
تغییرات جریان تحريك ژنراتور اصلی و نیز جریان تخمین زده شده بر مبنای کمیت‌های ژنراتور اصلی در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین شکل‌های (۶) تا (۸) به ترتیب تغییرات جریان‌ها و ولتاژهای استاتور و توان خروجی آنرا نشان می‌دهند.



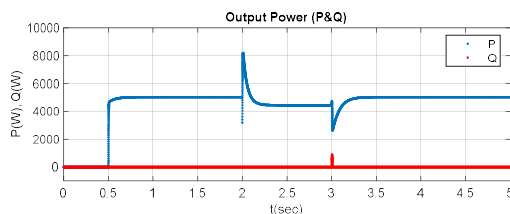
شکل ۵: تغییرات جریان تحريك ژنراتور اصلی



شکل ۶: تغییرات جریان‌های سه فاز استاتور



شکل ۷: تغییرات ولتاژهای سه فاز استاتور



شکل ۸: تغییرات توان حقیقی و توان موهومی

همانگونه که از شکل (۵) مشخص است با استفاده از روش ارائه شده جریان تحريك ژنراتور اصلی با دقت و سرعت مناسب تخمین زده شده است. در $t=2\text{sec}$ بار ژنراتور و در نتیجه جریان خروجی آن افزایش می‌یابد اما با توجه به اینکه سیستم بصورت حلقه باز کنترل می‌شود با افزایش بار ولتاژ خروجی بواسطه ثابت بودن ولتاژ تحريك ژنراتور تحريك کاهش یافته و در نتیجه توان خروجی نیز کاهش می‌یابد. جریان تخمین زده شده را می‌توان به منظور پایش وضعیت، طراحی کنترل کننده، حفاظت و نیز تخمین پارامترهای ژنراتور و سیستم تحريك به کار برد.

از اثر اشباع مغناطیسی و نیز سیم بندی میراکننده صرف‌نظر شده است. هرچند سیم‌پیچ‌های میراکننده در سرعت سنکرون بی‌تأثیر بوده و ولتاژی در آنها القا نخواهد شد. رابطه شار پیوندی ژنراتور اصلی در راستای محور مستقیم عبارتست از:

$$\lambda_{ds} = L_{ds}i_{ds} + L_{mds}i_{fm} \quad (29)$$

از طرفی بر اساس رابطه ولتاژ-جریان استاتور در راستای محور مستقیم داریم:

$$p\lambda_{ds} = v_{ds} - r_s i_{ds} + \omega_r \lambda_{qs} \quad (30)$$

$$\lambda_{qs} = L_{qs}i_{qs}$$

که در آن نتیجه:

$$\lambda_{ds} = \int (v_{ds} - r_s i_{ds} + \omega_r \lambda_{qs}) dt \quad (31)$$

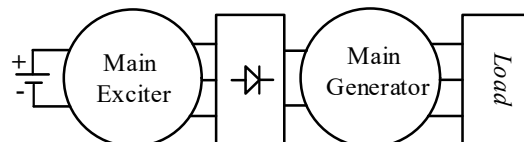
با توجه به روابط (۲۹) و (۳۱) جریان تحريك ژنراتور اصلی را می‌توان بصورت زیر تعیین نمود:

$$i_{fm} = \left(\int (v_{ds} - r_s i_{ds} + \omega_r \lambda_{qs}) dt - L_{ds}i_{ds} \right) / L_{mds} \quad (32)$$

این رابطه صرفاً به مقادیر ولتاژها و جریان‌های استاتور و سرعت ژنراتور اصلی وابسته است که براحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشند. بنابراین با اندازه‌گیری کمیت‌های سمت استاتور می‌توان جریان میدان را با دقت مناسب تعیین نمود.

۴- شبیه سازی روش تخمین جریان تحريك

به منظور ارزیابی کارایی روش‌های فوق یک سیستم تولید توان مبتنی بر ژنراتور سنکرون بدون جاروبک با مشخصات ۸/۱kVA، ۴۰۰V، ۵۰Hz، ۳۰۰۰rpm مطابق شکل (۴) بصورت حلقه باز شبیه سازی شده است. سایر مشخصات ژنراتور در جدول (۱) ذکر شده‌اند.



شکل ۴: ساختار سیستم تولید توان مبتنی بر ژنراتور سنکرون بدون جاروبک

جدول ۱: پارامترهای ژنراتور سنکرون

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$r_s(\Omega)$	۱/۶۲	$L_{ls}(H)$	۰/۰۰۴۵۲۷
$r_{fm}(\Omega)$	۱/۲۰۸	$L_{lfm}(H)$	۰/۰۱۱۳۲
$L_{mds}(H)$	۰/۱۰۸۶	$L_{mq}(H)$	۰/۰۵۱۷۵

ژنراتور ابتدا تحت ولتاژ تحريك نامی ۳۳/۲ ولت و با سرعت سنکرون راه اندازی شده و در لحظه ۰/۵ ثانیه باری با ضریب توان واحد به ژنراتور اعمال شده و همزمان ولتاژ تحريك جهت تولید ولتاژ نامی در خروجی افزایش داده می‌شود. سپس در $t=2\text{sec}$ بار بصورت پله ای افزایش یافته و در $t=3\text{sec}$ مجدداً به حالت قبل باز می‌گردد.

در این مقاله دو روش برای تخمین جریان تحریک در ژنراتور سنکرون بدون جاروبک مشتمل بر سیستم تحریک از نوع سنکرون ارائه شده است. روش اول از پارامترهای ژنراتور تحریک و ولتاژ/جریان میدان آن که قابل اندازه‌گیری است، برای تخمین استفاده می‌کند. بواسطه وجود یک سو ساز گردان این روش به موقعیت رتور و زاویه کموتاسیون نیاز دارد. در روش دوم از پارامترهای ژنراتور اصلی و ولتاژ/جریان خروجی آن استفاده می‌شود و به موقعیت رتور بستگی ندارد. برای بررسی کارایی روش یک سیستم تولید توان مشتمل بر ژنراتور سنکرون بدون جاروبک شبیه‌سازی شده و عملکرد روش تخمین دوم در حضور تغییرات بار بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد این روش را در تخمین جریان تحریک به خوبی نشان می‌دهد.

فهرست علائم

v_{qs}	ولتاژ محور q ژنراتور اصلی
v_{ds}	ولتاژ محور d ژنراتور اصلی
v_{fm}	ولتاژ تحریک ژنراتور اصلی
v_{qr}	ولتاژ محور q ژنراتور تحریک
v_{dr}	ولتاژ محور d ژنراتور تحریک
v_{fe}	ولتاژ تحریک ژنراتور تحریک
i_{qs}	جریان محور q ژنراتور اصلی
i_{ds}	جریان محور d ژنراتور اصلی
i_{fm}	جریان تحریک ژنراتور اصلی
i_{qr}	جریان محور q ژنراتور تحریک
i_{dr}	جریان محور d ژنراتور تحریک
i_{fe}	جریان تحریک ژنراتور تحریک
λ_{qs}	شار پیوندی محور q ژنراتور اصلی
λ_{ds}	شار پیوندی محور d ژنراتور اصلی
λ_{fm}	شار پیوندی میدان ژنراتور اصلی
λ_{qr}	شار پیوندی محور q ژنراتور تحریک
λ_{dr}	شار پیوندی محور d ژنراتور تحریک
λ_{fe}	شار پیوندی میدان ژنراتور تحریک
λ_{mqr}	شار مغناطیس‌کنندگی محور q ژنراتور تحریک
λ_{mdr}	شار مغناطیس‌کنندگی محور d ژنراتور تحریک
r_s	مقاومت استاتور ژنراتور اصلی
r_{fm}	مقاومت میدان ژنراتور اصلی
r_r	مقاومت آرمیچر ژنراتور تحریک
r_{fe}	مقاومت میدان ژنراتور تحریک
L_{ls}	اندوکتانس پراکندگی استاتور ژنراتور اصلی
L_{mds}	اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی محور d ژنراتور اصلی
$L_{mq s}$	اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی محور q ژنراتور اصلی
L_{lr}	اندوکتانس پراکندگی آرمیچر ژنراتور تحریک
L_{mdr}	اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی محور d ژنراتور تحریک
$L_{mq r}$	اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی محور q ژنراتور تحریک
$L_{l f m}$	اندوکتانس پراکندگی میدان ژنراتور اصلی
$L_{l f e}$	اندوکتانس پراکندگی میدان ژنراتور تحریک

مراجع و منابع

- [1] J. Li, *Design and Application of Modern Synchronous Generator Excitation Systems*. Wiley-IEEE Press, 2019.
- [2] J. K. Nøland, S. Nuzzo, E. F. Alves, "Excitation system technologies for wound-field synchronous machines: survey of solutions and evolving trends," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 109699–109718, Aug. 2019.
- [3] C. Chakraborty, S. Basak, Y. T. Rao, "Synchronous generator with embedded brushless synchronous exciter," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 34, no. 3, pp. 1242–1254, Sep. 2019.
- [4] M. G. McArdle, D. J. Morrow "Noninvasive detection of brushless exciter rotating diode failure," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 378–383, Jun. 2004
- [5] N. Jiao, C. Sun, X. Zhang, X. Duan, and W. Liu, "Double-side voltage-behind-reactance model of brushless exciter in aircraft wound-rotor synchronous starter-generator considering magnetic saturation," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 36, no. 3, pp. 2358–2369, Sep. 2021.
- [6] Y. Wang, S. Nuzzo, H. Zhang, W. Zhao, C. Gerada, M. Galea, "Challenges and opportunities for wound field synchronous generators in future more electric aircraft," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 4, pp. 1466–1477, Dec. 2020.
- [7] C. Chakraborty, Y. T. Rao, "Performance of brushless induction excited synchronous generator," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 4, pp. 2571–2582, Dec. 2019.
- [8] H. Bhattacharjee, D. Mukherjee, U. Vuyyuru, C. Chakraborty, "Brushless synchronous generator-unidirectional rectifier for offshore wind energy conversion system" *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 37, no. 2, pp. 1060–1074, Jun. 2022.
- [9] S. Nuzzo, P. Bolognesi, G. Decuzzi, P. Giangrande, M. Galea, "A consequent-pole hybrid exciter for synchronous generators" *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 36, no. 4, pp. 368–379, March 2021.
- [10] E. Mostajeran, A. Safavizadeh, S. M. Ebrahimi, J. Jatskevich, "Efficient simulation of variable-speed diesel-engine generators using constant-parameter voltage-behind-reactance formulation" in *2022 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, June 2022.
- [11] S. Basak, A. K. Mondal, C. Chakraborty, "Performance and analysis of a new brushless synchronous generator for dc microgrid application," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 56, no. 3, pp. 3137–3148, May/Jun. 2020.
- [12] P. C. Kjaer, T. Kjellqvist, and C. Delaloye, "Estimation of field current in vector-controlled synchronous machine variable-speed drives employing brushless asynchronous exciters," *IEEE*

Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 3, pp. 834–840, May 2005

- [13] A. Corne, N. Yang, et al., “Nonlinear Estimation of Stator Currents in a Wound Rotor Synchronous Machine,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 4, pp. 3858 - 3867, July-Aug. 2018
- [14] H.T. Kahraman, R. Bayindir, S. Sagioglu, “A new approach to predict the excitation current and parameter weightings of synchronous machines based on genetic algorithm-based k-NN estimator,” *Energy Conversion and Management.*, vol. 64, pp. 129–138, 2012
- [15] A. Deriszadeh, M. P. Calasan, A. Alaei, J. F. Gieras, “A Novel Field Current Estimation Method for Brushless Wound-Field Synchronous Machine,” *IEEE Trans. Transportation Electrification*, vol. 8, no. 3, pp. 3524–3533, Sep. 2022
- [16] Z. Zhang, W. Li, L. Shi, J. Ma and Z. Yin, “A Rotor Position Signal-Free Based Field Current Estimation Method for Brushless Synchronous Starter/Generator,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 124408–124419, 2022
- [17] B. Zaker, A. Khodadadi and M. Karrari, “A new approach to parameter identification of generation unit equipped with brushless exciter using estimated field voltage,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 141, 2022
- [18] S. D. Pekarek, O. Wasynczuk, H. J. Hegner, “An efficient and accurate model for the simulation and analysis synchronous machind/converter systems,” *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 13, no. 1, pp. 42–48, March 1998