بهبود عملکرد دینامیکی مولد سنکرون مقیاس کوچک متصل به شبکه توزیع در حضور کوره قوس الکتریکی

رضا بخردیان[1] مهدی داورپناه[2] یاشار کر[3] مجید صنایع‌پسند[4]

۱-دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران
r.bekhradian@ut.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران
m.davarpanah@ut.ac.ir

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران
yashar.kor@ut.ac.ir

۴- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران
msanaye@ut.ac.ir

چکیده:کوره قوس الکتریکی دارای توان مصرفی متغیر با زمان است که باعث ایجاد نوسانات مکانیکی در مولدهای سنکرون مقیاس کوچک مجاور و در نتیجه کاهش عمر آن می‌شود. در این مقاله، در ابتدا مدلی مناسب برای کوره قوس الکتریکی ارائه می‌شود و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی نیز صحت سنجی می‌گردد. در ادامه یک سیستم توزیع واقعی متشکل از مولد سنکرون مقیاس کوچک، که بارهای صنعتی از جمله کوره قوس الکتریکی را تغذیه می‌کند، بر اساس شبیه‌سازی حوزه زمان مورد آنالیز و بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از مطالعات تحلیلی و نتایج شبیه‌سازی، مقدار مناسب برای پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه به گونه‌ای تعیین می‌شوند که نوسانات مکانیکی مولد سنکرون مقیاس کوچک ناشی از کوره قوس الکتریکی کاهش یابد. بعلاوه، پاسخ حالت گذرای مولد سنکرون مقیاس کوچک نیز در تنظیم مناسب پارامترهای مذکور در نظر گرفته شده است. در نهایت مقاوم و موثر بودن پارامترهای پیشنهادی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری واقعی سنجیده می‌شود.

کلمات کلیدی: کوره‌ی قوس الکتریکی،ژنراتور سنکرون مقیاس کوچک، تغییر گشتاور ژنراتور،کنترل ریزشبکه

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۱۱/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهدی داورپناه

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – خیابان کارگر شمالی– دانشکده فنی دانشگاه تهران– دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

۱- مقدمه

یکی از مهمترین راه های تولید فولاد در ابعاد بزرگ، استفاده از کوره‌های قوس الکتریکی است. به همین دلیل بکارگیری کوره‌های قوس الکتریکی در صنایع آهن و فولاد هم در ابعاد بزرگ (با توان مصرفی بیش از صد مگاوات) و هم در ابعاد متوسط (توان مصرفی در حد مگاوات) رشد روزافزونی داشته است. در این کوره‌ها ایجاد قوس الکتریکی بین الکترودها و ایجاد گرمای شدید باعث ذوب شدن مواد خام و قراضه‌ها می‌شود[۱].

کوره قوس الکتریکی به دلیل ذات تصادفی و تولید هارمونیک‌های کمتر و بیشتر از فرکانس نامی، ممکن است بر تجهیزات سیستم قدرت و حتی سایر مصرف کنندگان تاثیر نامطلوبی داشته باشد. از شاخص ترین اثرات کوره بر شبکه می‌توان به پدیده‌های از قبیل نوسانات ولتاژ [۱]، اضافه ولتاژهای گذرا [۲]، کاهش کیفیت توان [۳]، نوسانات توان [۴، ۵] و نوسانات پیچشی در ژنراتورهای سنکرون نزدیک به کوره قوس الکتریکی اشاره نمود [۵، ۶]. برای مشکلات بیان شده راه حل‌هایی نیز در مقالات متعدد ارایه شده است. استفاده از جبران کننده‌های توان راکتیو(SVC[۱]) [۷]، جبران‌کننده‌های استاتیک سنکرون (STATCOM[۲]) [۸]، راکتورهای اکتیو سری (ASR[۳]) [۹] و ذخیره کننده‌های انرژی از جمله مهمترین روش‌های ارایه شده می‌باشند [۴]. همچنین در مرجع [۶] از چرخ لنگر بعنوان یک فیلتر مکانیکی برای میراسازی نوسانات پیچشی وارد شده به شفت ژنراتور سنکرون استفاده شده است.

بی‌برقی طولانی مدت در این کوره‌ها باعث جامد شدن مواد مذاب داخل پاتیل کوره قوس الکتریکی شده که تبعات و مشکلات زیادی را در پی دارد. از این رو حفظ قابلیت اطمینان بالا در تغذیه‌ی کوره قوس الکتریکی امری حیاتی می‌باشد. از سوی دیگر هزینه‌ی بالای تامین برق، در کنار مشوق‌های اقتصادی موجود باعث شده است که برخی صنایع، از مولدهای مقیاس کوچک نیز در کنار تامین برق از شبکه قدرت استفاده نمایند [۱۰]. در چنین شرایطی که مولد بصورت موازی با شبکه قدرت بهره‌برداری می‌شود، کوره قوس الکتریکی به دلیل توان مصرفی متغیر با زمان بر مولد مقیاس کوچک تاثیرات زیادی خواهد گذاشت. به نحوی که گشتاور الکتریکی و مکانیکی، سرعت محور مولد و محرک اولیه و توان خروجی از این نوسانات توان، متاثر خواهند شد. این تنش متناوب باعث ایجاد خستگی در توربوژنراتور می‌شود و در نتیجه عمر آن کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند [۶]. این نوسانات همچنین باعث ایجاد گشتاور پیچشی در محور توربوژنراتور می‌شود [۴]-[۶] و [۱۱].

در [۵] کارخانه‌ای شامل کوره قوس الکتریکی که توسط مولد سنکرون تغذیه می‌شود با مدل جرم و فنر شبیه‌سازی شده است و نوسانات پیچشی وارده بر محور توربوژنراتور ناشی از نوسانات ولتاژ حاصل از بار کوره قوس الکتریکی، بررسی می‌گردد. در این مقاله با استفاده از نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است که کوره قوس الکتریکی باعث بوجود آوردن مؤلفه نوسانی زیرسنکرون در گشتاور الکتریکی تولیدی مولد سنکرون می‌شود. در این مرجع با استفاده از روش پایش فرکانس، تداخل فرکانس‌های زیر سنکرون ناشی از کوره با فرکانس‌های طبیعی روتور و در نتیجه بروز پدیده تشدید زیر سنکرون نشان داده می‌شود.

در [۶] یک کارخانه فولاد ۹۰ تنی که به وسیله‌ی یک ژنراتور مقیاس کوچک در حالت متصل به شبکه بالادست تغذیه می‌شود، مدل گردیده است. همانند [۵] برای مدل‌سازی ژنراتور سنکرون از مدل جرم و فنر، و برای مدل کردن کوره قوس الکتریکی از اندازه‌گیری‌های واقعی استفاده شده است. در ادامه به بررسی نقش کوره قوس الکتریکی در پدیده‌ی تشدید زیرسنکرون با استفاده از شبیه‌سازی زمانی پرداخته می‌شود. همچنین در این مقاله برای بهبود نوسانات و تنش‌های حاصل از نوسانات زیرسنکرون استفاده یک فیلتر پایین گذر مکانیکی پیشنهاد گردیده است که علاوه بر هزینه بالا، باعث افزایش تلفات می‌شود.

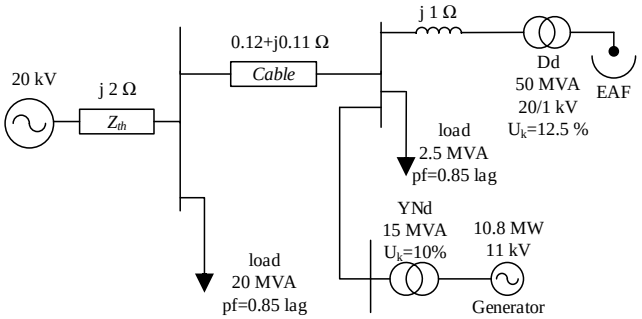
در [۴] به بررسی نوسانات ولتاژ ناشی از بار کوره قوس الکتریکی بر ژنراتور سنکرون در حالت متصل به شبکه‌ی بالادست و موتورهای القایی مجاور پرداخته شده است. در مرجع مذکور برای مدل کردن ژنراتور و موتور از مدل جرم و فنر، و برای مدل کردن کوره‌ی قوس الکتریکی از اندازه‌گیری‌های واقعی استفاده شده است. ضمناً برای کاهش اثرات ناشی از کوره، افزایش سطح اتصال کوتاه شبکه بالادست پیشنهاد شده است؛ لیکن این روش ممکن است در هر شرایطی عملی نباشد.

در [۱۱] با در نظر گرفتن مدل کوره قوس الکتریکی بصورت توان پالسی و مدل کردن ژنراتور سنکرون به صورت مدل جرم و فنر، اثر کوره قوس الکتریکی بر گشتاور مکانیکی ژنراتور سنکرون بررسی گردیده است. در مرجع مذکور بیان شده است که بیشترین تاثیر کوره بر گشتاور ژنراتور سنکرون، به هنگام فرآیند ذوب می‌باشد و لذا تأثیر کوره فقط در حین فرآیند ذوب بررسی شده است.

در این مقاله برای مطالعه بار کوره قوس الکتریکی بر مولد سنکرون، بخشی از ریزشبکه متصل به شبکه توزیع شامل مولد سنکرون مقیاس کوچک و بار کوره قوس الکتریکی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC مدل‌سازی می‌شود. بار کوره قوس الکتریکی مدل شده با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی صحت سنجی شده است. برای کنترل محرک اولیه از کنترل کننده متداول تناسبی - انتگرالی (PI[۴]) استفاده شده است. تحلیل ریاضی و مطالعات شبیه‌سازی انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که تنظیمات مناسب برای کنترل‌کننده محرک اولیه باعث می‌شود که مقدار نوسانات مکانیکی کاهش چشمگیری پیدا کند. همچنین این روش در مولدهای سنکرون مقیاس کوچک نوین که دارای کنترل‌کننده‌های دیجیتال هستند، به راحتی قابل پیاده‌سازی است. با استفاده از

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3- Fall 2018

استراتژی پیشنهادی در این مقاله پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه به نحوی تعیین می‌شوند که شرایط زیر محقق گردد:



شکل (۱): شبکه مورد مطالعه شامل کوره قوس الکتریکی و مولد مقیاس کوچک

(۱) نوسانات مکانیکی مولد در حضور کوره قوس الکتریکی کاهش یابد.

(۲) پاسخ دینامیکی سیستم به هنگام وقوع اغتشاش مناسب باشد.

(۳) پایداری گذرای مولد بهبود یابد.

همچنین از یک فیلتر پایین‌گذر بهمراه کنترل‌کننده PI استفاده می‌شود تا نوسانات مکانیکی به طور موثرتری کاهش یابند. بعلاوه عملکرد مولد در مقابل کوره قوس الکتریکی با فرکانس نوسانات متغیر و همچنین داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده سنجیده می‌شود.

از جمله دستاوردها و نوآوری‌های مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

(۱) بررسی اثرات مخرب کوره قوس الکتریکی بر پارامترهای مولد سنکرون مقیاس کوچک در حالت متصل به شبکه

(۲) بررسی تاثیر پارامترهای کنترل‌کننده دیجیتال مولد سنکرون بر نوسانات مکانیکی ناشی از کوره قوس الکتریکی با استفاده از تحلیل ریاضی و همچنین بر مبنای مطالعات شبیه‌سازی

(۳) انتخاب و تنظیم مناسب پارامترهای کنترل‌کننده‌های دیجیتال مولد سنکرون مقیاس کوچک بر مبنای سه شاخص پیشنهادی زیر:

- شاخص نوسانات مکانیکی ناشی از کوره قوس الکتریکی
- شاخص پاسخ دینامیکی مولد سنکرون
- شاخص پایداری گذرای مولد سنکرون

(۴) استفاده از فیلتر الکترونیکی پایین‌گذر به همراه کنترل‌کننده PI مولد به منظور کاهش نوسانات ناشی از کوره

(۵) بررسی تاثیر روش‌های پیشنهادی بر میزان نوسانات مکانیکی بر مبنای مطالعات شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف

شایان ذکر است، چالش مطرح شده در این مقاله، یکی از مشکلات صنعتی اتفاق افتاده در برخی از کارخانه‌های تولید فولاد کشور از جمله فولاد طبرستان واقع در استان مازندران می‌باشد؛ که تا پیش از این راهکار عملی و موثری برای آن پیشنهاد نشده بود. در این مقاله راهکارهای ساده و کم هزینه‌ای برای بهبود این چالش اساسی پیشنهاد شده است.

۲- شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه در این مقاله در شکل (۱) نمایش داده شده است. این شبکه بخشی از کارخانه صنعتی فولاد طبرستان واقع در استان مازندران (با در نظر گرفتن طرح توسعه آینده) می‌باشد. مجموع کوره های قوس الکتریکی مورد مطالعه دارای توان مصرفی ۳۸ مگاوات هستند که در حالت اتصال مولد به شبکه، این توان بین شبکه و مولد تقسیم می‌شود. مولد مقیاس کوچکی که به شبکه بالادست وصل می‌شود یک مولد ۱۱ کیلو ولت است که دارای توان نامی ۱۰/۸ مگاوات می‌باشد. مشخصات این مولد در بخش ضمائم ارائه شده است.

۲-۱- مدل‌سازی کوره قوس الکتریکی

نحوه عملکرد کوره‌های قوس الکتریکی متداول بدین صورت است که ابتدا این کوره‌ها توسط قراضه یا آهن اسفنجی پر می‌شوند و سپس توسط گرمای ناشی از قوس الکتریکی، مواد داخل کوره شروع به ذوب شدن می‌نمایند. در مراحل اولیه ذوب به علت ناهمگن بودن مواد داخل کوره (به ویژه قراضه)، طول قوس الکتریکی ایجاد شده در پاتیل، دارای تغییرات شدیدی می‌باشد که باعث نوسانات شدیدی در توان مصرفی کوره می‌شود. البته با گذشت زمان و ذوب شدن مواد داخل کوره، محیطی نسبتاً همگن ایجاد شده و در نتیجه تغییرات طول قوس الکتریکی کمتر می‌شود. در این شرایط نوسانات توان مصرفی کوره نیز کمتر خواهد شد[۱].

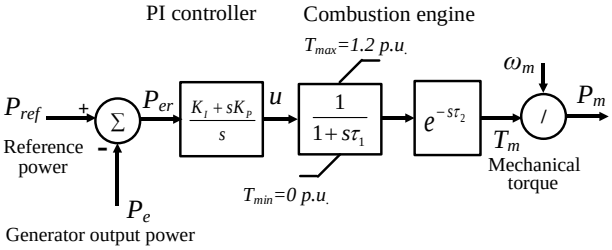
برای مدل‌سازی کوره قوس الکتریکی با توجه به نوع مطالعه می‌توان از مدل استاتیک یا دینامیک استفاده نمود [۱]. از آنجایی‌که در این مقاله به بررسی اثرات نوسان توان بر روی گشتاور مولد مقیاس کوچک پرداخته می‌شود و رفتار فرکانس پایین کوره اهمیت زیادی دارد، از مدل دینامیکی کوره قوس الکتریکی استفاده شده است.

در این مقاله مقاومت دینامیکی قوس الکتریکی (R_a) در مرحله ذوب، بر اساس روش ارائه شده در [۱] محاسبه می‌شود. به منظور مدل‌سازی نوسانات فرکانس پایین حاصل از کوره قوس الکتریکی، مقاومت قوس با استفاده از مدولاسیون سینوسی و بصورت زیر مدل می‌شود[۱۲]:

$$R_{arc}(t) = R_a(t) \times [1 + \sin(2\pi f_f t)] \qquad (۱)$$

در رابطه فوق پارامتر f_f فرکانس نوسانات کوره است که مقدار متداول آن در کوره های مختلف بین ۰/۵ تا ۲۵ هرتز می‌باشد [۱۲، ۱۳].

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018



شکل (۲): بلوک دیاگرام محرک اولیه و کنترل‌کننده آن

شایان ذکر است مقدار پارامتر f_f برای یک کوره خاص، در بازه کوچکتری تغییر می‌کند.

۲-۲- مدل‌سازی مجموعه دیزل ژنراتور

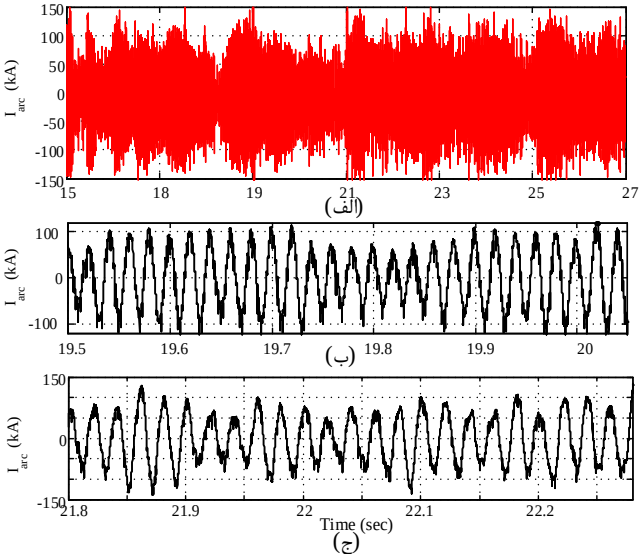
مولد مقیاس کوچک مورد مطالعه یک ژنراتور سنکرون است که مطابق اغلب طرح های اجرا شده در کشور، به محرک اولیه از نوع موتور گازسوز با احتراق داخلی متصل شده است [۱۴]-[۱۷]. برای کنترل سوخت ورودی این موتور از یک کنترل‌کننده PIکه در حالت اتصال به شبکه، توان حقیقی خروجی مولد را کنترل می‌کند استفاده شده است [۱۸، ۱۹]. مدل دیزل به همراه کنترل‌کننده سوخت ورودی در شکل (۲) نشان داده شده است.

برای مدل‌سازی راه‌انداز و سیستم احتراق در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC، به ترتیب از یک تابع تبدیل پس فاز مرتبه اول با ثابت زمانی τ_1 و یک عامل تاخیر با ثابت زمانی τ_2 استفاده شده است[۲۰، ۲۱]. پارامترهای K_I و K_P به ترتیب نشان‌دهنده گین عامل انتگرال‌گیر و عامل تناسبی می‌باشند. مقدار پارامترهای τ_1 و τ_2 به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۵۲ میلی ثانیه انتخاب شده‌اند.

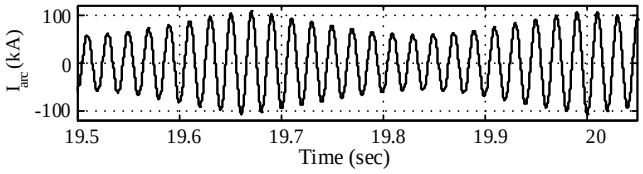
سیستم تحریک ژنراتور مورد مطالعه از نوع ژنراتور القایی سه فاز است که مجهز به یکسوساز دیودی چرخان است. این ژنراتور توسط یک ژنراتور آهنربای دائم تغذیه شده و در نتیجه مولد مورد مطالعه، قابلیت استفاده به عنوان مولد خودتامین را نیز دارد. برای مدل‌سازی این سیستمتحریک از مدل AC5A استاندارد IEEE استفاده شده است [۲۲]. ضمنا به دلیل آنکه مولد در حالت متصل به شبکه توزیع می‌باشد، سیستم تحریک مولد در وضعیت کنترل توان راکتیو (Q) در نظر گرفته شده است [۲۳]. شایان ذکر است، مقدار پارامترهای سیستم تحریک برابر با مقادیر ارائه شده در مرجع [۲۲] در نظر گرفته شده است.

۲-۳- صحت سنجی مدل بار کوره قوس الکتریکی

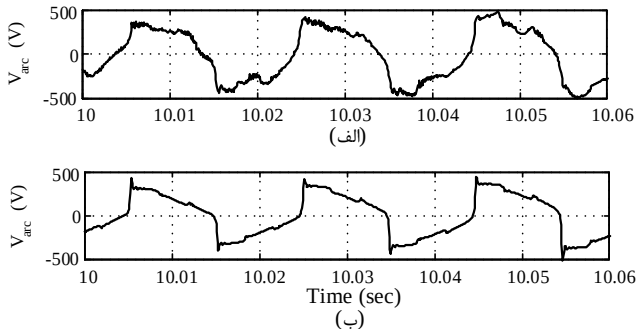
شکل (۳-الف) شکل موج واقعی اندازه‌گیری شده جریان کوره را نشان می‌دهد که علاوه بر فرکانس شبکه قدرت، همراه با نوسانات اضافی به



شکل (۳): سیگنال جریان اندازه‌گیری شده کوره قوس الکتریکی، (الف) شکل موج جریان اندازه‌گیری شده I_{arc} در فاز A، (ب) قسمتی از سیگنال I_{arc} با f_f=3Hz ، (ج) قسمتی از سیگنال I_{arc} با f_f=9Hz



شکل (۴): جریان شبیه‌سازی شده کوره قوس الکتریکی

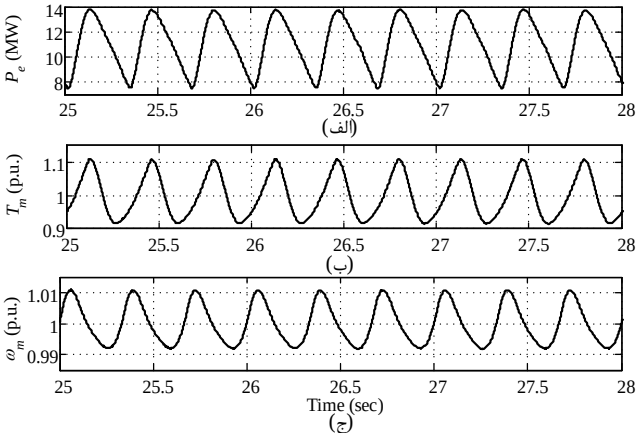


شکل (۵): شکل موج ولتاژ قوس الکتریکی، (الف) اندازه‌گیری شده، (ب) شبیه‌سازی شده

شکل تقریبا سینوسی است که فرکانس این نوسانات در بازه ۳ تا ۹ هرتز می‌باشد. به ترتیب دو قسمت از این شکل موج در شکل‌های (۳-ب) و (۳- ج) نشان داده شده است که فرکانس نوسانات در آنها به ترتیب برابر با ۳ و ۹ هرتز می باشد. بر مبنای روش بیان شده در بخش (۲-۱)، بلوک جدیدی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC برای مدل‌سازی کوره قوس الکتریکی پیاده‌سازی شده است. برای صحت‌سنجی مدل کوره از شکل (۳-ب) استفاده شده است و لذا مقدار پارامتر f_f در رابطه (۱) برابر با ۳ هرتز انتخاب می‌گردد. شکل (۴) جریان کوره قوس الکتریکی حاصل از نتایج شبیه‌سازی را نشان می-

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]

دهد که به خوبی با شکل موج جریان اندازه‌گیری شده تطابق دارد. شکل (۵-ب) نتیجه شبیه‌سازی مربوط به ولتاژ دو سر مقاومت قوس را نمایش می‌دهد که شبیه موج مربعی می‌باشد. در شکل (۵-الف) ولتاژ واقعی اندازه‌گیری شده از ثانویه ترانسفورماتور کوره نمایش داده شده-است که مطابقت بسیار مناسبی با نتایج شبیه‌سازی دارد.



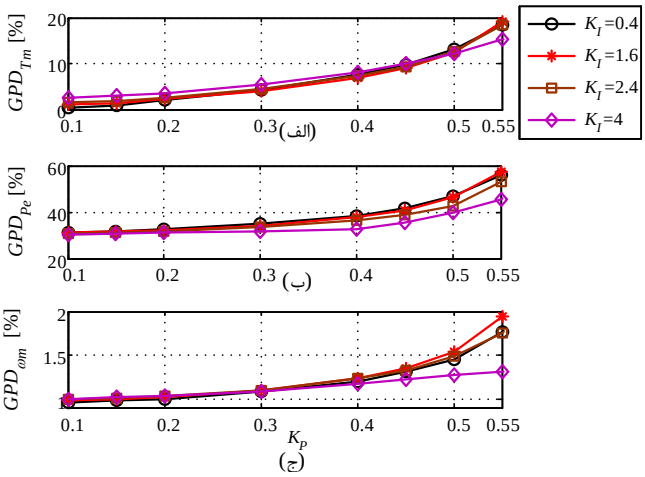
شکل (۶): شکل موج (الف) توان خروجی، (ب) گشتاور مکانیکی، (ج) سرعت مکانیکی مولد

از منظر تاثیر بر بخش های مکانیکی مجموعه ژنراتور و محرک اولیه، نوسانات فرکانس پایین ولتاژ و جریان کوره قوس الکتریکی اهمیت زیادی دارد که از این منظر، نتایج شبیه‌سازی مطابقت مناسبی با شکل موج‌های اندازه گیری شده، دارد. لازم به ذکر است که نوسانات فرکانس بالای ولتاژ و جریان از یک‌سو تاثیر کمتری بر بخش‌های مکانیکی داشته و در واقع به دلیل لختی ذاتی بخش‌های مکانیکی، فیلتر می‌شود و از سوی دیگر، بخشی از این نوسانات فرکانس بالا مربوط به نویزهای اندازه گیری می‌باشد و عملا وجود ندارد. در بخش بعدی مقاله، تاثیر بار کوره قوس الکتریکی بر عملکرد مولد سنکرون مقیاس کوچک بررسی می‌شود.

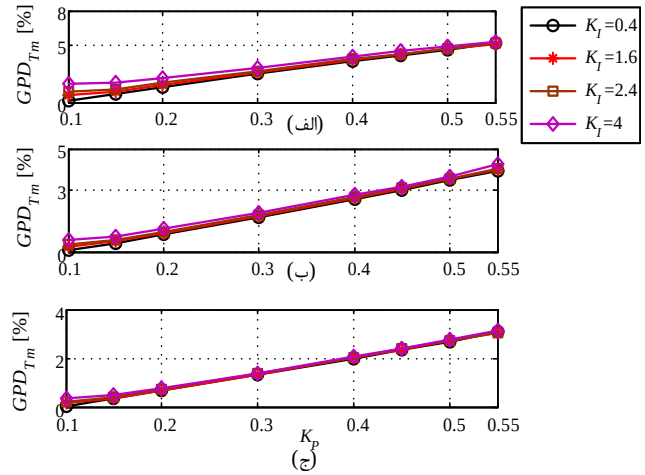
۳- بررسی نوسانات مکانیکی حاصل از کوره قوس الکتریکی

در ابتدای این بخش نوسانات مکانیکی حاصل از کوره قوس الکتریکی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین در ادامه تاثیر پارامترهای کنترل-کننده محرک اولیه بر این نوسانات مکانیکی بررسی می‌شود.

مطابق طرح‌های متداول در حالت اتصال مولد به شبکه بالادست، کنترل‌کننده سیستم تحریک و محرک اولیه به ترتیب در وضعیت کنترل توان راکتیو و کنترل توان اکتیو کار می‌کنند. ابتدا پارامترهای سیستم کنترل به نحوی تعیین می‌شود که شبکه پایدار شده و مولد بتواند در حالت اتصال به شبکه با بار خطی، توان اکتیو و راکتیو تنظیم



شکل (۷): مقادیر شاخص *GPD* برای (الف) گشتاور مکانیکی، (ب) توان اکتیو خروجی، (ج) سرعت محور مولد به ازای مقادیر مختلف K_I و K_P



شکل (۸): مقادیر شاخص GPD_{Tm} برای (الف) f_f= 5Hz (ب) f_f= 7Hz، (ج) f_f= 9Hz به ازای مقادیر مختلف K_I و K_P

شده را تحویل دهد. سپس بار غیرخطی کوره قوس الکتریکی به این شبکه متصل می‌شود. شکل (۶-الف) توان اکتیو خروجی مولد در حالتی که K_I=۱ و K_P=۰/۵۵ است را نشان می‌دهد. با توجه به نوسانی بودن توان خروجی، گشتاور مکانیکی مولد نیز نوسانی می‌گردد. شکل (۶-ب) نشان می‌دهد که دامنه نوسانات گشتاور مکانیکی حدود ۰/۱۲ پریونیت می باشد. شایان ذکر است که سیگنال گشتاور مکانیکی، از خروجی بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل (۲) استخراج شده است. این دامنه بالا در نوسانات فرکانس پایین گشتاور مکانیکی باعث ایجاد تنش مکانیکی متناوب بر مجموعه توربوژنراتور شده که پیری قطعات مختلف مکانیکی و در نتیجه کاهش زمان تعمیرات اساسی را به دنبال دارد. همانطور که در شکل (۶-ج) مشاهده می‌شود، این نوسانات مکانیکی حتی در سرعت ژنراتور نیز تاثیرگذار بوده و باعث تغییر مداوم آن می‌شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

۳-۱- بررسی تاثیر پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه بر نوسانات مکانیکی بر مبنای روش تحلیلی

شکل (۲)، بلوک دیاگرام کنترل‌کننده محرک اولیه و همچنین مدل محرک اولیه را نشان می‌دهد. به منظورخطی سازی عملگر تاخیر ($e^{-s\tau_2}$)، از بسط تیلور استفاده می‌شود [۲۰]:

$$e^{-s\tau_2} \cong \frac{1-0.5s\tau_2}{1+0.5s\tau_2} \quad (۲)$$

برای تحلیل وابستگی مقدار نوسانات مکانیکی به پارامترهای کنترلی، در ابتدا تابع تبدیل بین خطای توان (P_{er}) و توان مکانیکی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{T_m}{P_{er}} = \frac{-K_p\,\tau_2\,s^2 + (2K_p - K_I\,\tau_2)s + 2K_I}{\tau_1\,\tau_2\,s^3 + (2\tau_1+\tau_2)s^2 + 2s} \quad (۳)$$

بطوریکه سیگنالP_{er}، برابر با اختلاف بین سیگنال مرجع توان و سیگنال توان الکتریکی خروجی مولد می‌باشد. سیگنال خطای P_{er} به دلیل نوسانات توان الکتریکی خروجی مولد، با فرکانس f_f نوسان می‌نماید. در نتیجه می‌توان سیگنال خطای P_{er} را بصورت زیر نمایش داد:

$$P_{er}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(2n\pi f_f t + \phi_n) \quad (۴)$$

به طوریکه A_n و Φ_n به‌ترتیب دامنه و فاز n امین مولفه سری فوریه و با فرکانس $n\times f_f$ را نشان می‌دهند. با استفاده از تبدیل لاپلاس داریم:

$$P_{er}(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n\pi f_f \cos(\phi_n) + \sin(\phi_n)\,s}{s^2 + (2n\pi f_f)^2} \quad (۵)$$

با ترکیب دو رابطه (۳) و (۵) عبارت زیر حاصل می‌شود:

$$T_m(t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n[D_n + F_n\cos(2n\pi f_f t + \phi_n) + G_n \sin(2n\pi f_f t + \phi_n)] \quad (۶)$$

به طوریکه T_0 مقدار مانای گشتاور مکانیکی می‌باشد. ضرایب D_n، F_n و G_n برابرند با:

(۷)

$$D_n = \frac{K_I\cos(\phi_n)}{n\omega_f} + \frac{2\tau_2\,e^{-2t/\tau_2}(2K_P - K_I\tau_2)[2\sin(\phi_n) - n\omega_f\tau_2\cos(\phi_n)]}{(2\tau_1-\tau_2)(\tau_2^{\,2}n^2\omega_f^{\,2}+4)} - \frac{e^{-t/\tau_1}(K_P - K_I\tau_1)(2\tau_1+\tau_2)[\sin(\phi_n) - n\omega_f\tau_1\cos(\phi_n)]}{(2\tau_1-\tau_2)(\tau_1^{\,2}n^2\omega_f^{\,2}+1)}$$

(۸)

$$F_n = \frac{K_P\tau_1\tau_2^{\,2}n^4\omega_f^{\,4} - (4K_P\tau_1 + 4K_P\tau_2 - K_I\tau_2^{\,2} - 4K_I\tau_1\tau_2)n^2\omega_f^{\,2} - 4K_I}{n\omega_f(\tau_2^{\,2}n^2\omega_f^{\,2}+4)(\tau_1^{\,2}n^2\omega_f^{\,2}+1)}$$

(۹)

$$G_n = \frac{(K_P\tau_2^{\,2} - K_I\tau_1\tau_2^{\,2} + 4K_P\tau_1\tau_2)n^3\omega_f^{\,3} + (4K_I\tau_1 - 4K_P + 4K_I\tau_2)n\omega_f}{-n\omega_f(\tau_2^{\,2}n^2\omega_f^{\,2}+4)(\tau_1^{\,2}n^2\omega_f^{\,2}+1)}$$

به طوریکه $\omega_f = 2\pi f_f$.

با توجه به توضیحات فوق، دامنه نوسانات مکانیکی مولفه nام از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M_n = \sqrt{A_n^2(F_n^2+G_n^2)} = \frac{A_n}{2n\pi f_f}\sqrt{\frac{K_I^2 + (K_p\times 2n\pi f_f)^2}{4\pi^2n^2\tau_1^{\,2}f_f^{\,2}+1}} \quad (۱۰)$$

برای کاهش نوسانات مکانیکی بایستی مقدار پارامتر M_n کاهش یابد. همانطور که از رابطه (۱۰) دریافت می‌شود، M_n با پارامترهای K_P و K_I رابطه مستقیم دارد و با افزایش آن‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه برای کاهش دامنه نوسانات بایستی عامل‌های انتگرالی و تناسبی در کنترل‌کننده محرک اولیه کاهش یابند. همچنین همانطور که از رابطه (۱۰) مشاهده می‌شود، پارامترK_P در عدد بزرگی نیز ضرب گردیده است که باعث می‌شود تاثیر آن در کاهش و یا افزایش M_n بسیار بزرگتر از K_I باشد. در نتیجه برای کاهش مقدارM_n به طور موثر، بایستی پارامتر K_P تا حد امکان کوچک انتخاب شود. قابل ذکر است که تاثیر کاهش و یا افزایش پارامتر K_I در مقابل پارامترK_P ناچیز می‌باشد.

تغییر پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه عملکرد دینامیکی و گذرای مولد سنکرون را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. در نتیجه بایستی برای انتخاب مناسب پارامترهای مذکور عملکرد دینامیکی و حالت گذرای مولد نیز در نظر گرفته شود. در بخش بعدی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی تاثیر پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه بر نوسانات مکانیکی بررسی می‌شود.

۳-۲- بررسی تاثیر پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه بر مقدار نوسانات مکانیکی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی تاثیر پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه بر نوسانات مکانیکی با استفاده از شبیه‌سازی زمانی، شاخص GPD به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$GPD_X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{ave}} \times 100 \quad (۱۱)$$

به طوریکه پارامتر X می‌تواند بیان کننده پارامترهای ژنراتور یا محرک اولیه نظیر توان اکتیو خروجی ژنراتور (P_e)، گشتاور مکانیکی خروجی محرک اولیه (T_m) و همچنین سرعت مکانیکی محور مولد (ω_m) باشد. مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط پارامترX در حالت کارکرد عادی مولد سنکرون به ترتیب با X_{max}، X_{min} و X_{ave}در نظر گرفته شده است. با بهینه کردن مقدار این شاخص، میزان نوسانات پارامترهای ژنراتور و

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]

محرک اولیه به حداقل خواهد رسید و مقدار میرایی این نوسانات افزایش خواهد یافت.

شاخص GPD برای پارامترهای P_e، T_m و ω_m با استفاده از شبیه‌سازی زمانی شبکه مورد مطالعه به ازای مقادیر مختلف K_I و K_P در حالتی که فرکانس نوسانات کوره قوس الکتریکی برابر با ۳ هرتز باشد، محاسبه گردیده و در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. قابل ذکر است که شبکه مورد مطالعه برای $0.4 \le K_I \le 4$ و $0.1 \le K_P \le 0.5$ پایدار می‌ماند و در غیر اینصورت ناپایدار خواهد بود. بنابراین شاخص GPD به ازای بازه‌های مذکور محاسبه شده است. حساسیت شاخص GPD_{Tm} به پارامترهای K_I و K_P به ازای مقادیر مختلف f_f نیز در شکل (۸) نشان داده شده است.

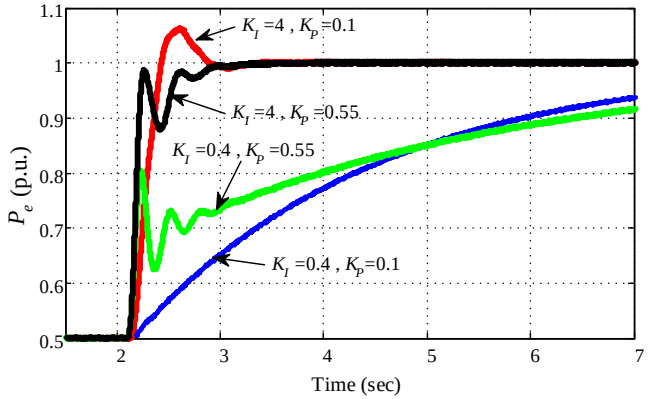
با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که با کاهش پارامتر K_P مقدار اندیس GPD_{Tm} به طور موثری کاهش می‌یابد؛ در حالیکه حساسیت شاخص مذکور نسبت به پارامتر K_I کوچک می‌باشد. در نتیجه برای بهبود نوسانات مکانیکی و افزایش میرایی آنها، بایستی مقدار پارامتر K_P برابر با حداقل مقدار ممکن انتخاب شود، به طوریکه سیستم پایدار بماند. با مقایسه اشکال (۷-الف) و (۸) مشاهده می‌شود که افزایش فرکانس f_f باعث کاهش دامنه نوسانات مکانیکی شده است که این نتیجه از رابطه (۱۰) نیز قابل استنتاج است. شایان ذکر است که پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه بر پاسخ دینامیکی مولد سنکرون در برابر اغتشاشات و حالات گذرای سیستم نیز تاثیر گذار می‌باشد. بنابراین در بخش بعدی این مقاله به بررسی تاثیر پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه بر پاسخ دینامیکی مولد پرداخته می‌شود.

۴- بررسی عملکرد دینامیکی مولد سنکرون مقیاس کوچک در برابر حالات گذرای سیستم

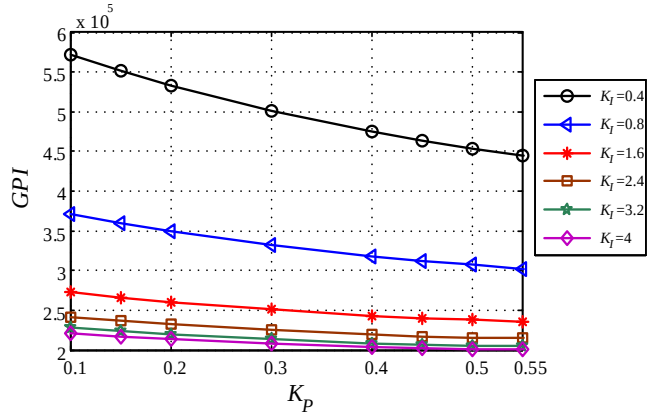
۴-۱- معرفی شاخص پاسخ دینامیکی مولد

برای تنظیم مناسب پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه لازم است تا تاثیر آن‌ها بر پاسخ دینامیکی مولد سنکرون نیز ارزیابی شود. به منظور اطمینان از عکس‌العمل سریع سیستم کنترلی در کنار بالازدگی و پایین‌زدگی اندک، از شاخص پاسخ دینامیکی ژنراتور استفاده شده است. به عبارت دیگر با بهینه کردن مقدار این شاخص دینامیکی، پاسخ مناسب از منظر پارامترهای زمان نشست[۵]، زمان صعود[۶] و درصد بالازدگی[۷] حاصل خواهد شد. شکل (۹) توان الکتریکی خروجی مولد سنکرون (P_e) را به ازای مقادیر مختلف پارامترهای K_I و K_P در حالتی که مقدار مرجع توان مولد (P_{ref}) از ۰/۵ پریونیت به ۱ پریونیت تغییر می‌یابد، نشان می‌دهد. به دلیل استفاده از کنترل کننده PI، خطای ماندگار برابر با صفر بوده و لذا پس از مدتی توان خروجی مولد (P_e) برابر با مقدار مرجع (P_{ref}) می‌شود. البته به ازای مقادیر مختلف پارامترهای کنترل کننده، سیگنال P_e با زمان نشست و نوسانات متفاوتی به سیگنال P_{ref} میل می‌کند. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی که در شکل (۹) نشان داده شده است نتایج زیر دریافت می‌شود:

(۱) پارامتر K_I تاثیر چندانی بر شاخص GPD (که بیان‌کننده‌ی نوسانات حالت ماندگار می‌باشد) نداشته و بالعکس تأثیر زیادی بر پاسخ دینامیکی دارد.



شکل (۹): توان اکتیو خروجی مولد به ازای مقادیر مختلف K_I و K_P



شکل (۱۰): مقادیر شاخص GPI به ازای مقادیر مختلف K_I و K_P

(۲) حساسیت پاسخ دینامیکی به پارامتر K_P به مراتب از K_I کمتر می‌باشد.

(۳) مقادیر بزرگتر پارامتر K_I باعث افزایش بالازدگی و مقادیر کم آن باعث افزایش زمان نشست خواهد شد.

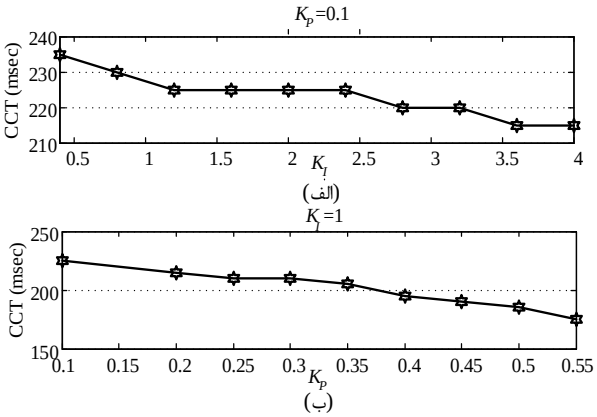
به منظور کمّی نمودن پاسخ دینامیکی مولد سنکرون شاخص GPI به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$GPI = \int_{t_0}^{\infty} [(P_{ref} - P_e)^2 + K_u \times u^2] \qquad (۱۲)$$

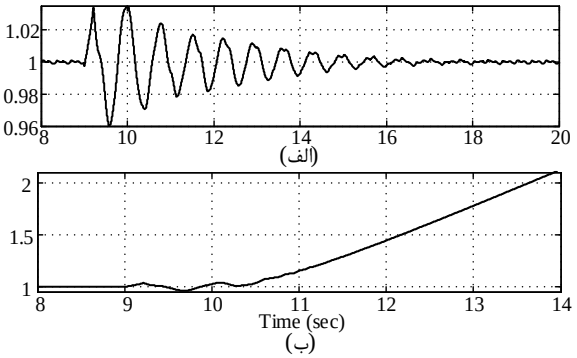
که در رابطه فوق پارامتر t_0 زمان تغییر مرجع توان می‌باشد. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، سیگنال خروجی کنترل‌کننده PI با نماد u مشخص شده است و نشان‌دهنده تلاش کنترل‌کننده برای تنظیم توان در مقدار دلخواه می‌باشد. بعبارت دیگر سیگنال u، معادل با سوخت ورودی به محرک اولیه در نظر گرفته می‌شود. پارامتر K_u عدد ثابتی می‌باشد که برابر با ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

شاخص *GPI* به ازای مقادیر مختلف K_I و K_P و با شبیه‌سازی زمانی شبکه تحت مطالعه در محیط نرم‌افزار PSCAD/EMTDC محاسبه گردیده و در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به این شکل دریافت می‌شود که حساسیت *GPI* برخلاف شاخص *GPD*، نسبت به پارامتر K_I بسیار بیشتر از پارامتر K_P می‌باشد. لذا لازم است



شکل (۱۱): مقادیر شاخص CCT به ازای مقادیر مختلف K_I (الف)، K_P (ب)



شکل (۱۲): شکل موج سرعت مکانیکی مولد برای FCT=212ms (الف)، FCT=218ms (ب)

تا برای حذف نوسانات مکانیکی پارامتر K_P و برای بهبود پاسخ دینامیکی پارامتر K_I در مقادیر مناسب تنظیم شوند.

۴-۲- معرفی شاخص پایداری گذرای مولد

مقدار اینرسی مولد سنکرون مقیاس کوچک کم است و از طرفی زمان رفع خطا در شبکه توزیع طولانی می‌باشد. لذا پایداری گذرای مولد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است[۲۴]. معمولا مقدار پارامترهای سیستم کنترلی ژنراتور در زمان بروز اتصال کوتاه در ریزشبکه تغییر نمی‌کند و مقدار آنها بر پایداری حالت گذرای مولد تاثیر گذار می‌باشد؛ لذا مناسب است تا تاثیر پارامترهای K_I و K_P بر پایداری گذرای مولد بررسی شود. برای این مطالعه از شاخص CCT استفاده شده است. شاخص CCT در این مقاله برابر با حداکثر زمان مجاز رفع خطای سه فاز بدون مقاومت در پایانه مولد بدون آنکه ناپایداری گذرا اتفاق بیفتد، در نظر گرفته می‌شود [۲۵].

در هنگام بروز اتصال کوتاه در شبکه، توان اکتیو خروجی مولد کاهش می‌یابد و در نتیجه اختلاف توان مکانیکی ورودی و توان الکتریکی خروجی (P_{er} در شکل ۲) زیاد می‌شود. مقدار مثبت P_{er} در این شرایط باعث افزایش خروجی کنترلر u می‌شود و در نتیجه مقدار سوخت بیشتری وارد محرک اولیه خواهد شد. در نتیجه گشتاور مکانیکی ورودی مولد نیز افزایش می‌یابد. از آنجا که مولد قادر نیست که این توان را به شبکه انتقال دهد، لذا سرعت مولد بیشتر افزایش می‌یابد. بنابراین هرچه کنترل‌کننده محرک اولیه کندتر باشد و تغییر گشتاور مکانیکی در حین خطا به آهستگی انجام شود، افزایش سرعت مولد در حین خطا کمتر خواهد بود. شکل (۱۱) مقدار CCT محاسبه شده مولد مقیاس کوچک تحت مطالعه را به ازای مقادیر مختلف پارامترهای K_P و K_I نشان می‌دهد. همانطور که از شکل‌های (۱۱-الف) و (۱۱-ب) مشاهده می‌شود پارامترهای K_I و K_P هر دو بر شاخص CCT تأثیرگذار هستند. لیکن مقدار تأثیر پارامتر K_P بسیار بیشتر از K_I می‌باشد. زیرا بلوک انتگرال‌گیر بر خلاف بلوک تناسبی به صورت آنی عمل نمی‌کند و نیاز به زمان دارد. از آنجایی که مدت زمان استمرار خطا کوتاه است و خروجی بلوک انتگرال‌گیر در طول این زمان کوچک است، لذا مقدار پارامتر K_I تأثیر کمتری بر شاخص CCT خواهد داشت. بعلاوه برای افزایش CCT بایستی پارامتر K_P تا حد امکان کوچک انتخاب شود. شکل (۱۲-الف) سرعت مکانیکی مولد را به ازای K_I=۴ و K_P=۰/۱، در شرایطی که خطای سه فاز رخ داده و پس از ۲۱۲ میلی‌ثانیه رفع شده است، نشان می‌دهد. از آنجایی که مقدار زمان رفع خطا (FCT^{A}) در این حالت از CCT کوچکتر می‌باشد (FCT=212ms) و مقدار CCT در این حالت با توجه به شکل(۱۱-الف) برابر با ۲۱۵ میلی‌ثانیه است)، لذا نوسانات سرعت مکانیکی مولد میرا شده و مولد بعد ازرفع خطا می‌تواند به صورت پایدار با شبکه باقی بماند. لیکن شکل (۱۲-ب) نشان می‌دهد که اگر مقدار FCT از CCT بیشتر باشد (FCT=218ms) دامنه‌ی نوسانات افزایش یافته و میرا نخواهد شد. لذا در این حالت مولد ناپایدار می‌شود.

از آنجایی که پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه دارای تأثیرهای متفاوتی بر شاخص‌های معرفی شده داشتند، لذا در قسمت بعد به تعیین مقدار مناسب این پارامترها با در نظر گرفتن هر سه شاخص پرداخته می‌شود.

۵- بحث و بررسی

در این بخش با توجه به آنالیز حساسیت انجام شده در بخش‌های قبل، مقدار مناسب پارامترهای بهینه‌ی کنترل‌کننده محرک اولیه جهت کاهش تنش مکانیکی وارده به مجموعه‌ی توربوژنراتور و بهبود دینامیک مولد در مواجهه با حالات گذرا تعیین می‌شوند. در این بخش

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]

در ابتدا، دستاوردهای بخش‌های قبل جمع‌بندی شده و مقدار مطلوب پارامترهای کنترل‌کننده معین می‌شوند. در ادامه این بخش برای بهبود نوسانات مکانیکی وارده، پیشنهاد می‌شود تا از یک فیلتر پایین گذر بهمراه کنترل‌کننده PI استفاده شود. در انتهای این بخش نیز عملکرد شبکه تحت مطالعه، با تنظیم پارامترهای مناسب پیشنهادی در دو حالت زیر مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد:

(۱) زمانی که فرکانس f_f با زمان متغیر است.

(۲) زمانی که سیگنال واقعی اندازه‌گیری شده کـه در شـکل (۳-الـف) نشان داده شده است بعنوان جریان کوره قـوس الکتریکـی بکـار بـرده می‌شود.

۵-۱- تعیین مقادیر مناسب پارامترهای کنترل‌کننده

به طور خلاصه می‌توان نتایج بخش‌های قبل را در سه قسمت زیر جمع‌بندی نمود:

(۱) با توجه به آنالیز حساسیت انجام شده در بخش (۳) و شکل‌های (۷-الف) و (۸)، انتخاب مقدار کوچک برای بلوک تناسبی باعث کاهش مقدار شاخص GPD_{Tm} می‌گردد؛ در حالیکه پارامتر K_I تأثیر چندانی بر این شاخص ندارد. در نتیجه برای کاهش مقدار شاخص GPD_{Tm} بایستی پارامترK_P برابر با حداقل ممکن در نظر گرفته شود. کاهش پارامتر K_P علاوه بر اینکه مقدار شاخص GPD_{Tm} را کاهش می‌دهد باعث کاهش مقادیر شاخص‌های GPD_{Pe} و $GPD_{\omega m}$ نیز خواهد شد. در این مقاله با توجه به بازه‌های تعیین شده برای عملکرد پایدار شبکه‌ی معرفی شده در حالت ماندگار، مقدار مطلوب پارامتر K_P برابر با ۰/۱ خواهد بود.

(۲) با توجه به شکل (۱۱)، کاهش پارامترهایK_P و K_I مقدار شاخص CCT را بهبود می‌بخشد، لیکن تأثیر K_I بسیار اندک می‌باشد. بنابراین مناسب است که پارامترK_P برابر با حداقل مقدار ممکن در نظر گرفته شود، که برای شبکه‌ی مورد مطالعه در این مقاله حداقل مقدار K_P برابر با ۰/۱ می‌باشد. پارامتر K_I بر شاخص GPD و CCT تأثیر ناچیزی دارد در حالیکه مقدار این پارامتر تاثیر قابل توجهی در بهبود شاخص GPI دارد. بنابراین مناسب است که پارامتر K_Iبر اساس شاخص GPI تعیین شود.

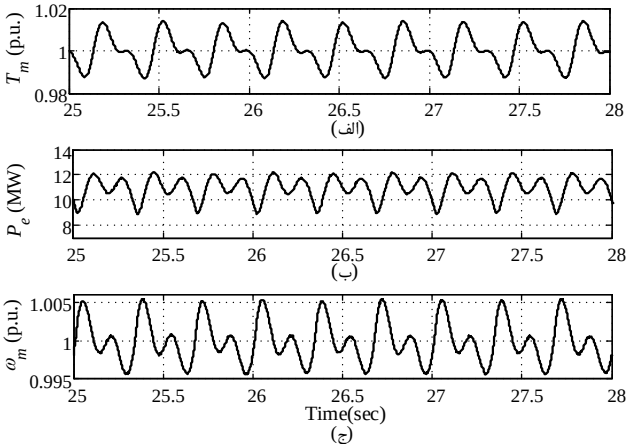
(۳) با توجه به آنالیز حساسیت شکل (۱۰)، با تنظیم مناسب پارامترK_Iمی‌توان به پاسخ دینامیکی مطلوب رسید و پارامتر K_P تأثیر اندکی بر مقدار شاخص GPI دارد. با افزایش K_I مقدار شاخص GPI بهبود می‌یابد. لذا مقدار K_I باید در حداکثر مقدار ممکن تنظیم گردد که در شبکه مورد مطالعه برابر با ۴ می‌باشد.

با توجه به نکات ذکر شده، مقدار مناسب پارامترهای K_Iو K_P به ترتیب برابر با ۴ و ۰/۱ خواهد بود. شکل (۱۳) توان اکتیو لحظه‌ای خروجی مولد، گشتاور مکانیکی و سرعت محور مولد را در این حالت نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود در حالت استفاده از K_I=۴ وK_P=۰/۱، مقدار نوسانات پارامترهای مولد نسبت به حالت اولیه‌ای که در بخش (۳) بررسی شد، کاهش چشم‌گیری پیدا کرده است. همچنین در این حالت مقدار شاخص CCT و GPI نسبت به حالت اولیه بهبود پیدا کرده است. به نحوی که CCT از ۱۷۵ به ۲۱۵ میلی ثانیه افزایش یافته و GPI از $۲/۸\times۱۰^{۵}$ به $۲/۲\times۱۰^{۵}$ کاهش پیدا کرده است.

از آنجایی که روش بکار گرفته شده برای تعیین مقدار مناسب پارامترهای کنترل‌کننده، کلی و عمومی می‌باشد، لذا با تغییر ساختار شبکه نیز می‌توان از این روش استفاده نمود. لیکن بازه پارامترهای کنترل‌کننده به منظور پایداری شبکه متفاوت خواهد بود؛ که براحتی و با استفاده از شبیه‌سازی شبکه مورد نظر در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی زمانی قابل محاسبه خواهند بود.

۵-۲- تغییر ساختار کنترل‌کننده محرک اولیه

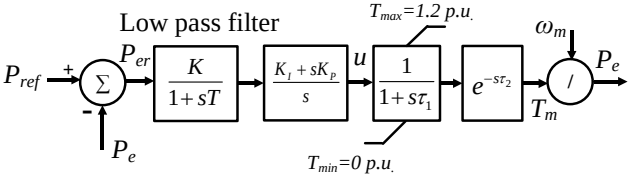
از آنجایی که سیگنال خطای ورودی به کنترل کننده PI (P_{er})، بر اساس سیگنال توان لحظه‌ای خروجی (P_{er}) محاسبه می‌شود، لذا نوساناتی با فرکانس پایین در سیگنال P_{er} وجود خواهد داشت که منجر به نوسانات گشتاور مکانیکی می‌گردد. لذا یک راه مناسب برای جلوگیری از عکس‌العمل گاورنر به این نوسانات استفاده از یک فیلتر پایین گذر قبل از کنترل‌کننده PI می‌باشد. شکل (۱۴) بلوک دیاگرام محرک اولیه و کنترل‌کننده PI را به همراه فیلتر پایین‌گذر نشان می‌دهد. ثابت زمانی این فیلتر به نحوی تعیین می‌شود که فرکانس قطع آن تقریباً برابر با فرکانس نوسانات توان مصرفی کوره‌ی قوس الکتریکی باشد. فیلتر پایین‌گذر بکار رفته در این مقاله، دارای K=1 و T=0.1 می‌باشد. شکل (۱۵)، سیگنال گشتاور مکانیکی (T_m) در حالتی که فیلتر پایین‌گذر بکار رفته است را با حالتی که این فیلتر وجود ندارد مقایسه کرده‌است. مطابق این شکل دامنه نوسانات گشتاور مکانیکی به مقدار ۵۷ درصد کاهش پیدا کرده است.



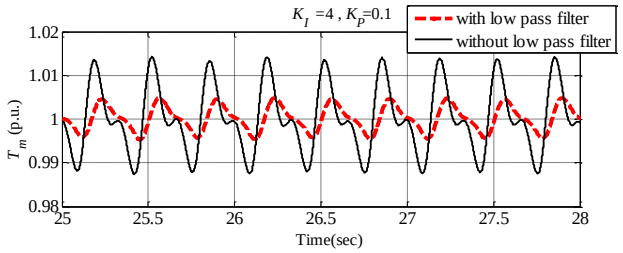
شکل (۱۳): شکل موج (الف)گشتاور مکانیکی،(ب) توان اکتیو لحظه‌ای خروجی، (ج) سرعت مکانیکی مولد در حالت بهینه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

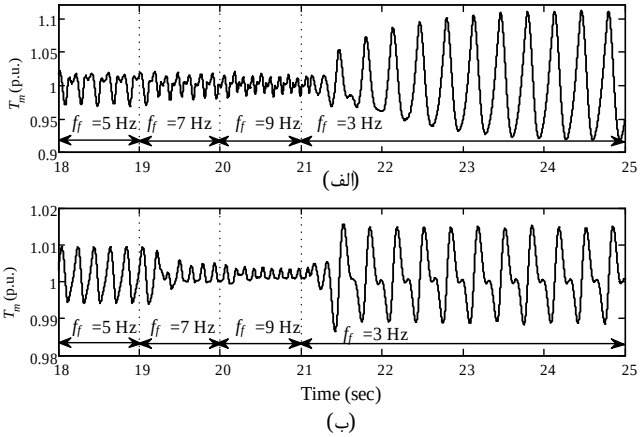
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018



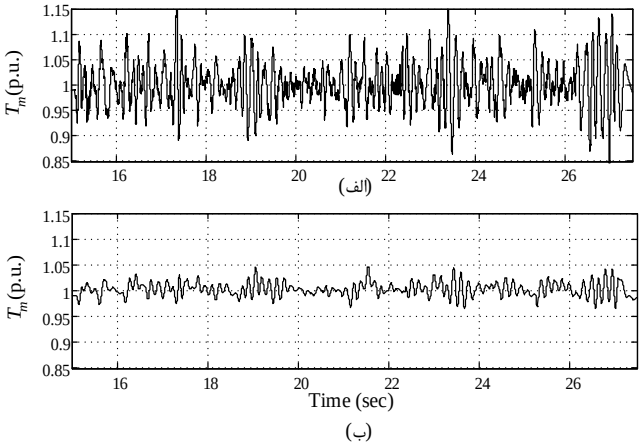
شکل (۱۴): بلوک دیاگرام محرک اولیه بهمراه کنترل کننده PI مجهز به فیلتر پایین‌گذر



شکل (۱۵): مقایسه گشتاور مکانیکی مولد در دو وضعیت استفاده و عدم استفاده از فیلتر پایین گذر



شکل (۱۶): شکل موج گشتاور مکانیکی برای (الف) مقادیر اولیه، (ب) مقادیر پیشنهادی پارامترهای کنترل‌کننده به ازای مقادیر مختلف f_f



شکل (۱۷): شکل موج گشتاور مکانیکی برای (الف) مقادیر اولیه، (ب) مقادیر پیشنهادی پارامترهای کنترل‌کننده در مواجهه با سیگنال جریان اندازه‌گیری شده

۵-۳- عملکرد مولد سنکرون در مواجهه با کوره قوس الکتریکی با فرکانس نوسانات متغیر

تمامی شبیه‌سازی‌هایی که تا کنون انجام گرفت، با فرض آن بود که پارامتر f_f برابر با مقدار ثابتی باشد و با زمان تغییر پیدا نکند. لیکن بهنگام فرآیند ذوب مقدار پارامتر f_f با زمان تغییر می‌نماید. لذا در این بخش عملکرد مولد در دو سناریوی زیر که پارامتر f_f در آنها متغیر است، بررسی می‌شود.

۵-۳-۱- سیگنال‌مدل‌سازی شده

برای مدل‌سازی مقاومت قوس با فرکانس نوسانات متغیر، پارامتر f_f در رابطه (۱) در هر ثانیه تغییر داده می‌شود. شکل‌های(۱۶-الف) و (۱۶-ب) نوسانات گشتاور مکانیکی T_m را به ازای پارامترهای اولیه، K_I=۱ و K_P=۰/۵۵، و پارامترهای پیشنهادی، K_I=۴ و K_P=۰/۱، نشان می‌دهد. با مقایسه این اشکال مشاهده می‌شود که با تنظیم پارامترهای بهینه مقدار نوسانات گشتاور مکانیکی به ازای مقادیر مختلف f_f به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.

۵-۳-۲- تزریق سیگنال جریان اندازه‌گیری شده

در این قسمت سیگنال جریان واقعی اندازه‌گیری شده که شامل نویز با پهنای فرکانسی وسیعی می‌باشد، به عنوان جریان کوره قوس الکتریکی به سیستم تزریق می‌گردد. در این سناریو نیز گشتاور مکانیکی به ازای پارامترهای اولیه، K_I=۱ و K_P=۰/۵۵، و پارامترهای پیشنهادی، K_I=۴ و K_P=۰/۱، به ترتیب در شکل‌های(۱۷-الف) و (۱۷-ب) نشان داده شده است. با مقایسه این دو شکل دریافت می‌شود که نوسانات مکانیکی با استفاده از پارامترهای پیشنهادی به طور موثری کاهش یافته است.

۶- نتیجه‌گیری

مشکل مورد بررسی در این مقاله،یک چالش صنعتی واقعی می‌باشد، که در برخی از صنایع فولاد کشور اتفاق افتاده است. تحلیل ریاضی و مطالعات شبیه‌سازی انجام شده در این مقاله نشان می‌دهند، نوسان توان مصرفی کوره قوس الکتریکی باعث بوجود آوردن نوسان توان در مولد سنکرون شده و در نتیجه گشتاور مکانیکی مولد را نیز نوسانی می‌کند. این نوسانات باعث وارد شدن تنش مکانیکی شدید به مولد سنکرون و محرک اولیه آن در حالت کار کوره قوس الکتریکی می‌شود.

مساله مورد نظر در این مقاله بصورت ریاضی مدل شده و برای آن راه کار اجرایی ارایه شده است. در این مقاله با مدل‌سازی یک شبکه واقعی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC، که شامل مولد سنکرون مقیاس کوچک و بار غیرخطی کوره قوس الکتریکی است، به بررسی این موضوع پرداخته شد. در ادامه تاثیر پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه بر مولد سنکرون مقیاس کوچک در شرایط مختلف و با

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]

استفاده از شاخص‌هایی بررسی شد و با استفاده از آن مقدار مناسب این پارامترها تعیین گردید. بررسی‌های انجام شده در این مقاله به نتایج زیر منجر شد:

(۱) مقدار گین عامل تناسبی (K_P) باید برابر با کمترین مقدار ممکن انتخاب شود تا مقدار نوسانات مکانیکی کاهش یابد. در حالیکه مقدار گین عامل انتگرالگیر (K_I) تاثیر چندانی بر مقدار این نوسانات ندارد.

(۲) مقدار گین عامل انتگرالگیر (K_I) باید برابر با بیشترین مقدار ممکن انتخاب شود تا عملکرد دینامیکی مولد در مواجهه با حالت‌های گذرا از جمله تغییرات مرجع گاورنر، بهبود یابد.

(۳) مقدار گین عامل تناسبی (K_P) باید برابر با کمترین مقدار ممکن انتخاب شود تا مقدار CCT در مواجهه با خطای اتصال کوتاه افزایش یابد. در صورتیکه پارامتر K_Iتاثیر کمی بر مقدار این شاخص دارد.

با توجه به نتایج فوق مقدار مناسب پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه در شبکه مورد مطالعه برابر با K_I=۴ و K_P=۰/۱ تنظیم گردید و همچنین عملکرد مولد در حالت‌های مختلفی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت.

در این مقاله به منظور بهره‌برداری مولد سنکرون در مجاورت بار کوره قوس الکتریکی و بهبود نوسانات مکانیکی حاصل از آن، دو روش زیر پیشنهاد شده است:

(۱) انتخاب مناسب پارامترهای کنترل‌کننده‌های مولد با استفاده از استراتژی پیشنهادی در مقاله،

(۲) استفاده از فیلتر پایین‌گذر به همراه کنترل‌کننده PI.

نکته قابل توجه این است که هر دو راهکار پیشنهادی، امکان پیاده سازی در کنترل کننده های دیجیتال مولد را دارند. از نقاط قوت این روشها، می‌توان به سادگی، قابل اجرا بودن،کم هزینه بودن و موثر بودنآنها اشاره نمود.

جدول (۱): پارامترهای مولد سنکرون مقیاس کوچک

پارامتر	مقدار
D-Axis synchronous reactance (Xd)	۱/۹۱۹ p.u.
D-Axis transient reactance (X′d)	۰/۲۸۳ p.u.
D-Axis sub-transient reactance (X″d)	۰/۱۸۳ p.u.
Q-Axis synchronous reactance (Xq)	۰/۹۸۸ p.u.
Q-Axis sub-transient reactance (X″q)	۰/۱۸۴ p.u.
Potier reactance at rated load (Xp)	۰/۱۶۶ p.u.
Stator winding dc resistance (Ra)	۰/۰۰۵۱ p.u.
OC transient field time constant (T'_{do})	۴/۱۴ sec
SC transient field time constant (T′d)	۰/۶۱۲ sec
D-Axis OC sub-transient time constant (T″do)	۰/۰۴۸ sec
D-Axis SC sub-transient time constant (T″d)	۰/۰۳۱ sec
Q-Axis OC sub-transient time constant (T″qo)	۰/۲۲۳ sec
Q-Axis SC sub-transient time constant (T″q)	۰/۰۴۲ sec
Rotor inertia constant	۰/۵۷ sec

مراجع

[1] Zheng, T., Makram, E.B., "An adaptive arc furnace model", IEEE Trans. Power Del., Vol. 15, No. 3, pp. 931-939, 2000.

[2] Gercek, C.O., Ermis, M., Ertas, A., et al., "Design, implementation, and operation of a new C-type 2nd harmonic filter for electric arc and ladle furnaces", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 47, No. 4, pp. 1545-1557, 2011.

[3] Chang, G.W., Shih, M.F., Chen, Y.Y. and Liang, Y.J., "A hybrid wavelet transform and neural-network-based approach for modelling dynamic voltage-current characteristics of electric arc furnace", IEEE Trans. Power Del., Vol. 29, No. 2, pp. 815-824, 2014.

[4] Surgevil, T., Akpnar, E., "Effects of electric arc furnace loads on synchronous generators and asynchronous motors", Int. Conf. Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, pp. 49-53, 2009.

[5] Tsao, T.P., Tsai, J.I., "Torsional interactions between an electrical arc furnace load and a turbine-generator set", Conf. Electrical Utility Deregulation, Hong Kong, pp. 627-632, 2004.

[6] Lin, W.M., Tsai, C.C., Lin, C.H., et al., "Alleviating shaft torsional vibrations caused by electric arc furnaces for a low capacity turbine generator by using a flywheel coupler", Int. Conf. Industrial Engineering and Engineering Management, Macao. pp. 1771-1775, 2010.

[7] Morello, S., Dionise, T.J. and Mank, T.L., "Comprehensive analysis to specify a static var compensator for an Electric Arc Furnace upgrade", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 51, No. 6, pp. 4840-4852, 2015.

[8] Morati, M., Girod, D., et al."Industrial 100-MVA EAF Voltage Flicker Mitigation Using VSC-Based STATCOM With Improved Performance", IEEE Trans. Power Del., Vol. 31, No. 6, pp. 2494-2501, 2016.

[9] Pires, I. A., Cardoso, M. M. G., and Cardoso Filho, B. J., "An Active Series Reactor for an Electric Arc Furnace: A Flexible Alternative for Power-Flow Control", IEEE Industry Applications Mag., Vol. 22, No. 5, pp.53-62, 2016.

[۱۰] محمد فرشاد، محمد حسین جاویدی دشت بیاض، جواد ساده، "ارائه قانون تشویقی تولیدات پراکنده در سیستمی با قانون تسویه تمایزی و پیشنهاد الگوریتم جایابی و تعیین ظرفیت بهینه"،نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال نهم، شماره دوم، پائیز و زمستان ۱۳۹۱.

[11] Baldwin, M.W., "Electric arc furnace impact on generator torque", Conf.Power system and Exposition, pp.776-780, 2004.

[12] Golkar, M.A., Tavakoli Bina, M., Meschi, S., "A novel method of electrical arc furnace modeling for flicker study", Renewable Energies and Power Quality, 2007, Vol. 126, pp. 620-626, 2007.

[13] Montanari, G.C., Loggini, M., Cavallini, et al., "Arc-furnace model for the study of flicker compensation in electrical networks", IEEE Trans. Power Del., 1994,Vol.9, No. 4, pp. 2026-2036, 1994.

[14] Puttgen, H.B., MacGregor, P.R., Lambert, F.C., "Distributed generation: semantic hype or the dawn of a new era?", IEEE Power and Energy Mag., 2003, Vol. 1, No. 1, pp. 22-29, 2003.

[15] Paquette, A.D., Reno, M.J., Harley, R.G., et al., "Transient load sharing between inverters and synchronous generators in islanded microgrids", Conf. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Raleigh, pp. 2735-2742, 2012.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

[16] Theubou, T., Wamkeue, R., Kamwa, I., "Dynamic model of diesel generator set for hybrid wind-diesel small grids applications", Int. Conf. Electrical & Computer Engineering (CCECE), Montreal, pp.1-4, 2012.
[17] Vargas-Martínez, A., Minchala Avila, L.I., Zhang, Y., et al., "Hybrid adaptive fault-tolerant control algorithms for voltage and frequency regulation of an islanded microgrid", Int. Trans. Electrical Energy Systems, Vol. 25, No. 5, pp. 827-844, 2014.
[۱۸] علی اصغر خدادوست آرانی، گئورگ قره‌پتیان، بهروز ذاکر، "مدل‌سازی و شبیه‌سازی ذخیره‌ساز چرخ طیار به عنوان مرجع ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه منفصل"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره سوم، پائیز ۱۳۹۵.
[19] Mehrizi-Sani, A., Iravani, R., "Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 25, No. 4, pp. 1883-1891, 2010.
[20] Sharaf, A.M., Abdin, E.S., "A digital simulation model for wind-diesel conversion scheme". Twenty-First Southeastern Symposium on System Theory,Tallahassee, pp. 160-166, 1989.
[21] Roy, S., Malik, O.P., Hope, G.S., "A k-step predictive scheme for speed control of diesel driven power plants", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 29, No. 2, pp. 389–396, 1993.
[22] IEEE Std 421.5-2005: "'IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", 2006.
[23] Hu, J., Zhu, J., G. Dorrell, D., "Model predictive control of inverters for both islanded and grid-connected operations in renewable power generations", IET Renew. Power Gener.,Vol. 8, No. 3, pp. 240-248, 2013.
[۲۴] صادق جمالی، حسین رضایی فرشه، نوید رضا رفیع، "هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن پایداری گذرای منابع تولید پراکنده سنکرون"،نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۶.
[25] Syed, M.H., Zeineldin, H.H., El Moursi, M.S., "Hybrid micro-grid operation characterisation based on stability and adherence to grid codes", IET Gener. Transm. Distrib, Vol. 8, No. 3, pp. 563-572, 2014.

زیرنویس‌ها

[1]Static VAR Compensator
[2]Static Synchronous Compensator
[3]Active Series Reactor
[4]Proportional Integral
[5]Settling Time
[6]Rise Time
[7]Percent Overshoot
[8]Fault Clearing Time

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.1.3]