

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

رضا بخردیان<sup>۱</sup> مهدی داورپناه<sup>۲</sup> یاشار کر<sup>۳</sup> مجید صنایع پسند<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

[r.bekhradian@ut.ac.ir](mailto:r.bekhradian@ut.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

[m.davarpanah@ut.ac.ir](mailto:m.davarpanah@ut.ac.ir)

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

[yashar.kor@ut.ac.ir](mailto:yashar.kor@ut.ac.ir)

۴- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

[msanaye@ut.ac.ir](mailto: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:** کوره قوس الکتریکی، ژنراتور سنکرون مقیاس کوچک، تغییر گشتاور ژنراتور، کنترل ریزشبه

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

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 تاثیر 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) استفاده شده است. تحلیل ریاضی و مطالعات شبیه‌سازی انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که تنظیمات مناسب برای کنترل کننده 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

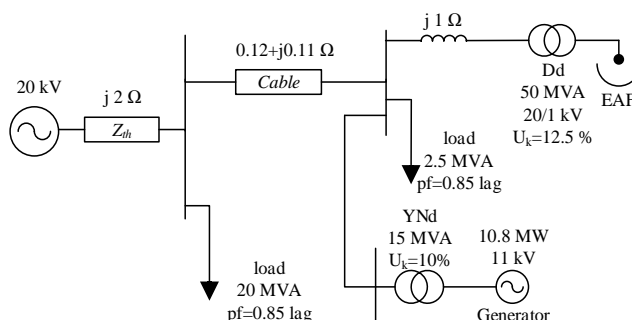
یکی از مهمترین راه‌های تولید فولاد در ابعاد بزرگ، استفاده از کوره‌های قوس الکتریکی است. به همین دلیل بکارگیری کوره‌های قوس الکتریکی در صنایع آهن و فولاد هم در ابعاد بزرگ (با توان مصرفی بیش از صد مگاوات) و هم در ابعاد متوسط (توان مصرفی در حد مگاوات) رشد روزافزونی داشته است. در این کوره‌ها ایجاد قوس الکتریکی 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 شاخص‌ترین 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 راه‌حلهایی نیز در مقالات متعدد ارائه شده است. استفاده از جبران‌کننده‌های توان راکتیو (SVC) [۷]، جبران‌کننده‌های استاتیک سنکرون (STATCOM) [۸]، راکتورهای اکتیو سری (ASR) [۹] و ذخیره‌کننده‌های انرژی از جمله مهمترین روش‌های ارائه 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

استراتژی پیشنهادی در این مقاله پارامترهای کنترل کننده محرک اولیه به نحوی تعیین می شوند 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 پایین گذر به همراه کنترل کننده PI استفاده می شود تا نوسانات مکانیکی به طور موثرتری کاهش یابند. بعلاوه عملکرد مولد در مقابل کوره قوس الکتریکی با فرکانس نوسانات متغیر و همچنین داده های واقعی اندازه گیری شده سنجیده می شود. از جمله دستاوردها و نوآوری های مقاله می توان 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 کنترل کننده دیجیتال مولد سنکرون بر نوسانات مکانیکی ناشی از کوره قوس الکتریکی با استفاده از تحلیل ریاضی و همچنین بر مبنای مطالعات شبیه سازی
- (۳) انتخاب و تنظیم مناسب پارامترهای کنترل کننده های 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 پایین گذر به همراه کنترل کننده PI مولد به منظور کاهش نوسانات ناشی از کوره
- (۵) بررسی تاثیر روش های پیشنهادی بر میزان نوسانات مکانیکی بر مبنای مطالعات شبیه سازی در حالت های مختلف

شایان ذکر است، چالش مطرح شده در این مقاله، یکی از مشکلات صنعتی اتفاق افتاده در برخی از کارخانه های تولید فولاد کشور از جمله فولاد طبرستان واقع در استان مازندران می باشد؛ که تا پیش از این راهکار عملی و موثری برای آن پیشنهاد نشده بود. در این مقاله راهکارهای ساده و کم هزینه ای 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) می باشد. 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 می شود. مولد مقیاس کوچکی که به شبکه بالادست وصل می شود یک مولد ۱۱ کیلو ولت است که دارای توان نامی ۱۰/۸ مگاوات می باشد. مشخصات این مولد در بخش ضمیمه ارائه شده است.

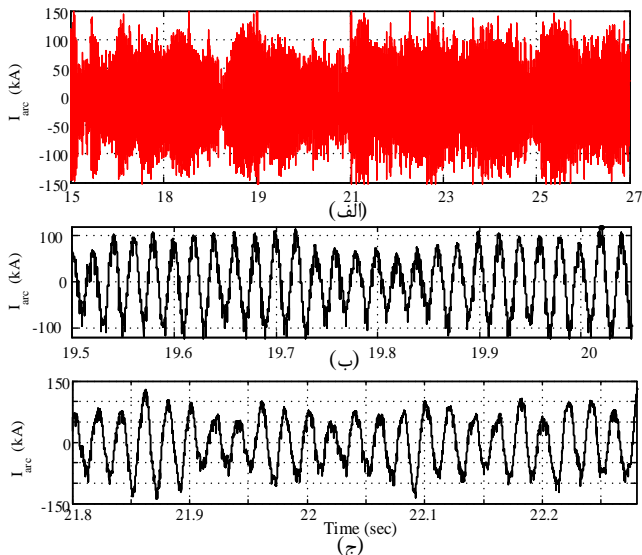
## ۲-۱- مدل سازی کوره قوس الکتریکی

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

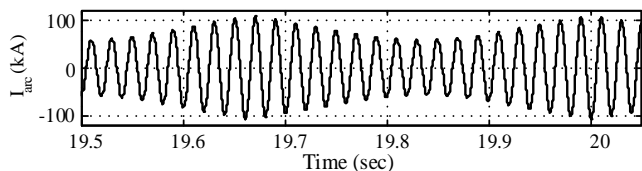
برای مدل سازی کوره قوس الکتریکی با توجه به نوع مطالعه می توان از مدل استاتیک یا دینامیک استفاده نمود [۱]. از آنجایی که در این مقاله به بررسی اثرات نوسان توان بر روی گشتاور مولد مقیاس کوچک پرداخته می شود و رفتار فرکانس پایین کوره اهمیت زیادی دارد، از مدل دینامیکی کوره قوس الکتریکی استفاده شده است. در این مقاله مقاومت دینامیکی قوس الکتریکی ( $R_a$ ) در مرحله ذوب، بر اساس روش ارائه شده در [۱] محاسبه می شود. به منظور مدل سازی نوسانات فرکانس پایین حاصل از کوره قوس الکتریکی، مقاومت قوس با استفاده از مدولاسیون سینوسی و بصورت زیر مدل می شود [۱۲]:

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

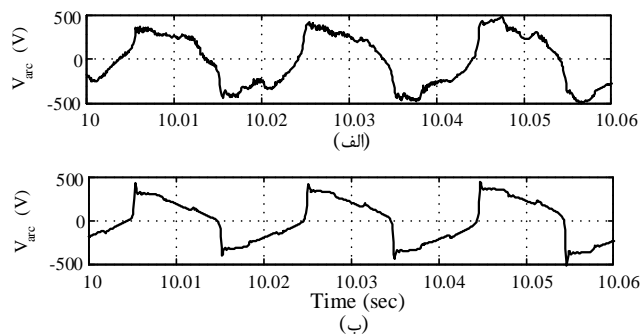
در رابطه فوق پارامتر  $f_f$  فرکانس نوسانات کوره است که مقدار متداول آن در کوره های مختلف بین ۰/۵ تا ۲۵ هرتز می باشد [۱۲، ۱۳].



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

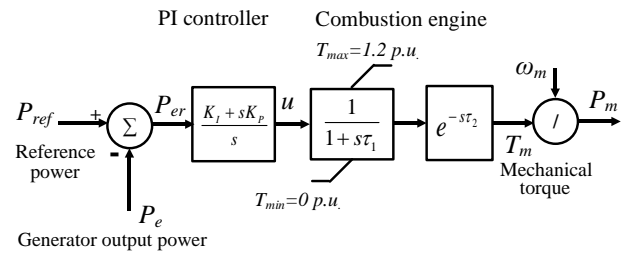


شکل (۴): جریان شبیه‌سازی شده کوره قوس الکتریکی



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

شکل تقریباً 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 می‌باشد. 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-



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

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

## ۲-۲- مدل‌سازی مجموعه دیزل ژنراتور

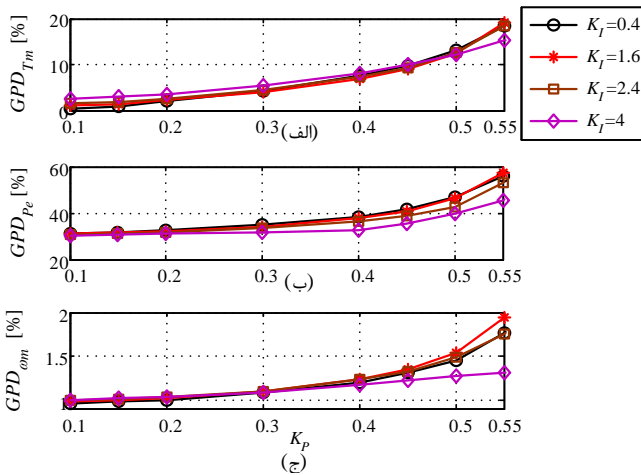
مولد مقیاس کوچک مورد مطالعه یک ژنراتور سنکرون است که مطابق اغلب طرح‌های اجرا شده در کشور، به محرک اولیه از نوع موتور گازسوز با احتراق داخلی متصل شده است [۱۴]-[۱۷]. برای کنترل سوخت ورودی این موتور از یک کنترل‌کننده PI که در حالت اتصال به شبکه، توان حقیقی خروجی مولد را کنترل می‌کند استفاده شده است [۱۸، 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  $\tau_1$  و یک عامل تاخیر با ثابت زمانی  $\tau_2$  استفاده شده است [۲۰، ۲۱]. پارامترهای  $K_P$  و  $K_I$  به ترتیب نشان‌دهنده گین عامل انتگرال‌گیر و عامل تناسبی می‌باشند. مقدار پارامترهای  $\tau_1$  و  $\tau_2$  به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۵۲ میلی ثانیه انتخاب شده‌اند.

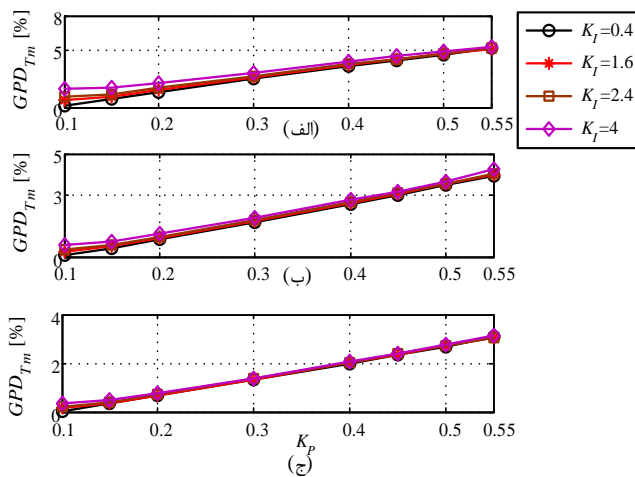
سیستم تحریک ژنراتور مورد مطالعه از نوع ژنراتور القایی سه فاز است که مجهز به یکسوساز دیودی چرخان است. این ژنراتور توسط یک ژنراتور آهنربای دائم تغذیه شده و در نتیجه مولد مورد مطالعه، قابلیت استفاده به عنوان مولد خودتامین را نیز دارد. برای مدل‌سازی این سیستم تحریک از مدل AC5A استاندارد IEEE استفاده شده است [۲۲]. ضمناً 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- صحت‌سنجی 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



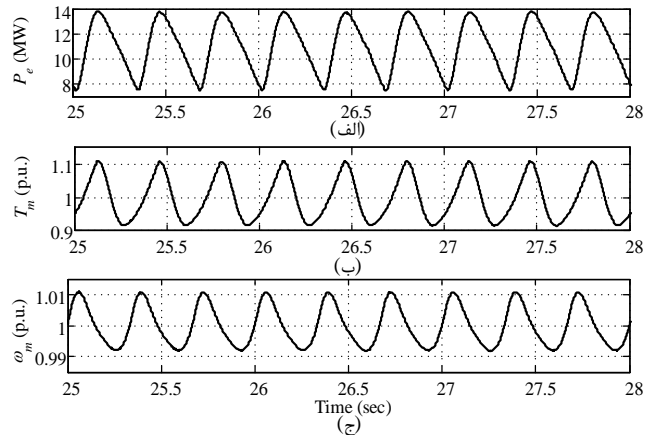
شکل (۷): مقادیر شاخص  $GPD$  برای (الف) گشتاور مکانیکی، (ب) توان اکتیو خروجی، (ج) سرعت محور مولد به ازای مقادیر مختلف  $K_I$  و  $K_P$



شکل (۸): مقادیر شاخص  $GPD_{Tm}$  برای (الف)  $f=5\text{Hz}$ ، (ب)  $f=7\text{Hz}$ ، (ج)  $f=9\text{Hz}$  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  $K_I=1$  و  $K_P=0.55$  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  $0.12$  پریونیت می‌باشد. 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.

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

از منظر تاثیر بر بخش‌های 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 اندازه‌گیری شده، دارد. لازم به ذکر است که نوسانات فرکانس بالای ولتاژ و جریان از یک سو 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 اندازه‌گیری می‌باشد و عملاً 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، کنترل کننده 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

### ۳-۱- بررسی تاثیر پارامترهای کنترل کننده محرک اولیه بر نوسانات مکانیکی بر مبنای روش تحلیلی

شکل (۲)، بلوک دیاگرام کنترل کننده محرک اولیه و همچنین مدل محرک اولیه را نشان می‌دهد. به منظور خطی 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 سیگنال  $P_{er}$ ، 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  $\phi_n$  به ترتیب 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:

$$G_n = \quad (۷)$$

$$D_n = \frac{K_I \cos(\phi_n)}{n\omega_f} + \frac{2\tau_2 e^{-2t/\tau_2} (2K_p - K_I \tau_2) [2\sin(\phi_n) - n\omega_f \tau_2 \cos(\phi_n)]}{(2\tau_1 - \tau_2)(\tau_2^2 n^2 \omega_f^2 + 4)} - \frac{e^{-t/\tau_1} (K_p - K_I \tau_1) (2\tau_1 + \tau_2) [\sin(\phi_n) - n\omega_f \tau_1 \cos(\phi_n)]}{(2\tau_1 - \tau_2)(\tau_1^2 n^2 \omega_f^2 + 1)} \quad (۸)$$

$$F_n = \frac{K_p \tau_1 \tau_2^2 n^4 \omega_f^4 - (4K_p \tau_1 + 4K_p \tau_2 - K_I \tau_2^2 - 4K_I \tau_1 \tau_2) n^2 \omega_f^2 - 4K_I}{n\omega_f (\tau_2^2 n^2 \omega_f^2 + 4)(\tau_1^2 n^2 \omega_f^2 + 1)} \quad (۹)$$

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

به طوریکه  $\omega_f = 2\pi f_f$ .

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

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

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 تناسی در کنترل کننده محرک اولیه کاهش یابند. همچنین همانطور که از رابطه (۱۰) مشاهده می‌شود، پارامتر  $K_p$  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 مقدار  $M_n$  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 پارامتر  $K_p$  ناچیز می‌باشد.

تغییر پارامترهای کنترل کننده 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 شبیه سازی تاثیر پارامترهای کنترل کننده محرک اولیه بر نوسانات مکانیکی بررسی می‌شود.

### ۳-۲- بررسی تاثیر پارامترهای کنترل کننده محرک اولیه بر مقدار نوسانات مکانیکی با استفاده از نتایج شبیه سازی

برای بررسی تاثیر پارامترهای کنترل کننده محرک اولیه بر نوسانات مکانیکی با استفاده از شبیه سازی 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 ( $\omega_m$ ) باشد. مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط پارامتر  $X$  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

محرك اوليه به حداقل خواهد رسيد و مقدار ميرايي اين نوسانات افزايش خواهد يافت.

شاخص  $GPD$  براي پارامترهاي  $P_e$ ,  $T_m$  و  $\omega_m$  با استفاده از شبیه‌سازی زمانی شبکه مورد مطالعه به ازای مقادير مختلف  $K_I$  و  $K_P$  در حالي 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  $0.1 \leq K_P \leq 0.5$  و  $0.4 \leq K_I \leq 4$  پایدار می‌ماند و در غیر اینصورت ناپایدار خواهد بود. بنابراین شاخص  $GPD$  به ازای بازه‌های مذکور محاسبه شده است. حساسیت شاخص  $GPD_{T_m}$  به پارامترهاي  $K_I$  و  $K_P$  به ازای مقادير مختلف  $f_f$  نیز در شکل (۸) نشان داده شده است.

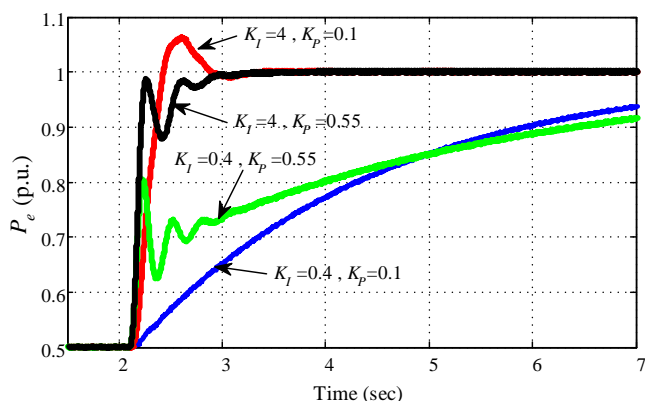
با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که با کاهش پارامتر  $K_P$  مقدار اندیس  $GPD_{T_m}$  به طور موثری کاهش می‌یابد؛ در حالیکه حساسیت شاخص مذکور نسبت به پارامتر  $K_I$  کوچک می‌باشد. در نتیجه برای بهبود نوسانات مکانیکی و افزایش میرایی آنها، بایستی مقدار پارامتر  $K_P$  برابر با حداقل مقدار ممکن انتخاب شود، به طوری که 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 پارامترهاي کنترل کننده محرك اوليه 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 پارامترهاي کنترل کننده محرك اوليه بر پاسخ دینامیکی مولد پرداخته می‌شود.

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

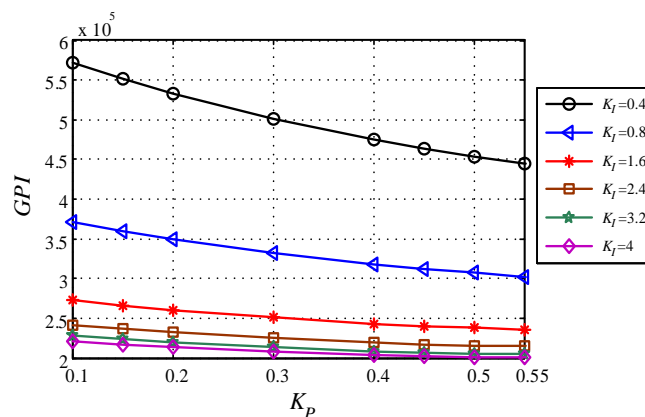
##### ۴-۱- معرفی شاخص پاسخ دینامیکی مولد

برای تنظیم مناسب پارامترهاي کنترل کننده محرك اوليه 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 پارامترهاي زمان نشست<sup>۵</sup>، زمان صعود<sup>۶</sup> و درصد بالازدگی<sup>۷</sup> حاصل خواهد شد. شکل (۹) توان الکتریکی خروجی مولد سنکرون ( $P_e$ ) را به ازای مقادير مختلف پارامترهاي  $K_I$  و  $K_P$  در حالي 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 مقادير مختلف پارامترهاي 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 بیان کننده‌ی نوسانات حالت ماندگار می‌باشد) نداشته و بالعکس تاثیر زیادی بر پاسخ دینامیکی دارد.



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



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

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

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

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

$$GPI = \int_{t_0}^{\infty} [(P_{ref} - P_e)^2 + K_u \times u^2] \quad (12)$$

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

فاز بدون مقاومت در پایانه مولد بدون آنکه ناپایداری گذرا اتفاق بیفتد، در نظر گرفته می‌شود [۲۵].

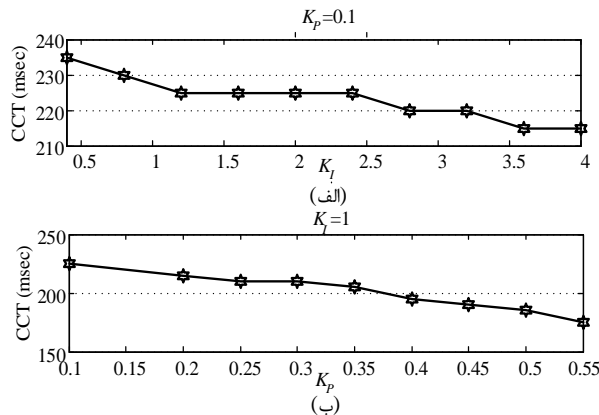
در هنگام بروز اتصال کوتاه در شبکه، توان اکتیو خروجی مولد کاهش می‌یابد و در نتیجه اختلاف توان مکانیکی ورودی و توان الکتریکی خروجی ( $P_{er}$  در شکل ۲) زیاد می‌شود. مقدار مثبت  $P_{er}$  در این شرایط باعث افزایش خروجی کنترلر  $u$  می‌شود و در نتیجه مقدار سوخت بیشتری وارد محرک اولیه خواهد شد. در نتیجه 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  $K_p$  و  $K_I$  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  $K_p=0.1$  و  $K_I=4$ ، 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 از رفع 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.

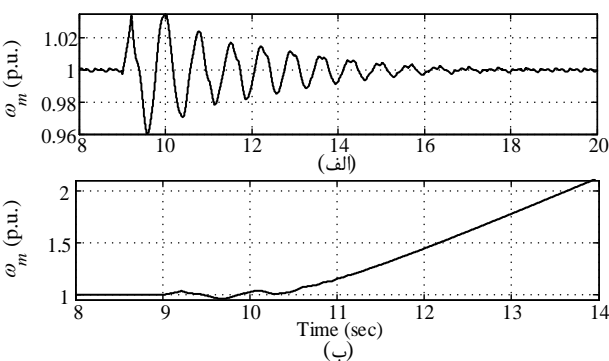
## ۵- بحث و بررسی

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

شاخص GPI به ازای مقادیر مختلف  $K_p$  و  $K_I$  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  $K_p$  (ب)،  $K_I$  (الف)



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]. معمولاً مقدار پارامترهای سیستم کنترلی ژنراتور در زمان بروز اتصال کوتاه در ریزش شبکه تغییر نمی‌کند و مقدار آنها بر پایداری حالت گذرای مولد تأثیر گذار می‌باشد؛ لذا مناسب است تا تأثیر پارامترهای  $K_p$  و  $K_I$  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

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 پایین‌گذر به‌همراه 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  $f$  با زمان متغیر است.

(۲) زمانی که سیگنال واقعی اندازه‌گیری شده که در شکل (۳-الف) نشان داده شده است بعنوان جریان کوره قوس الکتریکی بکار برده 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 پارامتر  $K_P$  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  $GPD_{om}$  و  $GPD_{pe}$  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 پارامترهای  $K_P$  و  $K_I$  مقدار شاخص CCT را بهبود می‌بخشد، لیکن تأثیر  $K_I$  بسیار اندک می‌باشد. بنابراین مناسب است که پارامتر  $K_P$  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 تأثیر قابل توجهی در بهبود شاخص  $GPI$  دارد. بنابراین مناسب است که پارامتر  $K_I$  بر اساس شاخص  $GPI$  تعیین شود.

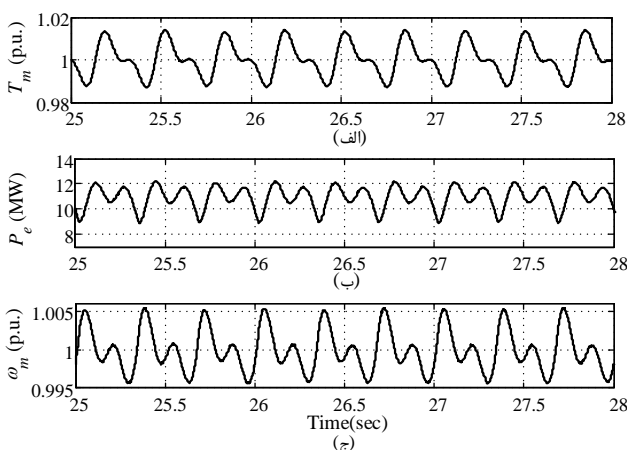
(۳) با توجه به آنالیز حساسیت شکل (۱۰)، با تنظیم مناسب پارامتر  $K_I$  می‌توان به پاسخ دینامیکی مطلوب رسید و پارامتر  $K_P$  تأثیر اندکی بر مقدار شاخص  $GPI$  دارد. با افزایش  $K_I$  مقدار شاخص  $GPI$  بهبود می‌یابد. لذا مقدار  $K_I$  باید در حداکثر مقدار ممکن تنظیم گردد که در شبکه مورد مطالعه برابر با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

با توجه به نکات ذکر شده، مقدار مناسب پارامترهای  $K_P$  و  $K_I$  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  $K_I=4$  و  $K_P=0/1$ ، 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  $10^5 \times 2/8$  به  $10^5 \times 2/2$  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 کنترل‌کننده  $PI$  ( $P_{er}$ )، 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 پایین‌گذر 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

### 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- سیگنال مدل‌سازی شده

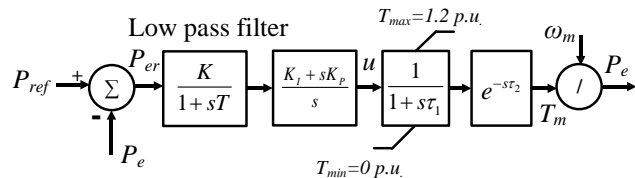
برای مدل‌سازی مقاومت قوس با فرکانس نوسانات متغیر، پارامتر  $f_f$  در رابطه (۱) در هر ثانیه تغییر داده می‌شود. شکل‌های (۱۶-الف) و (۱۶-ب) نوسانات گشتاور مکانیکی  $T_m$  را به ازای پارامترهای اولیه،  $K_I=1$  و  $K_P=0.1/55$ ، و پارامترهای پیشنهادی،  $K_I=4$  و  $K_P=0.1$ ، نشان می‌دهد. با مقایسه این اشکال 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،  $K_I=1$  و  $K_P=0.1/55$ ، و پارامترهای پیشنهادی،  $K_I=4$  و  $K_P=0.1$ ، 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.

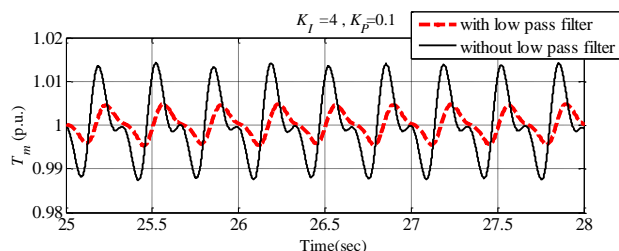
#### ۶- نتیجه‌گیری

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 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 ارائه 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



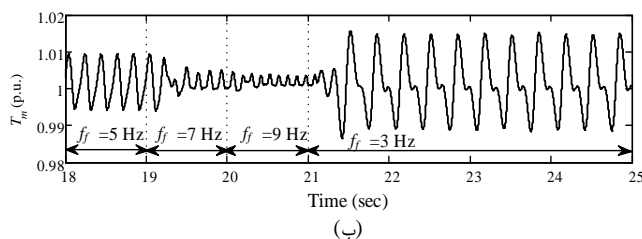
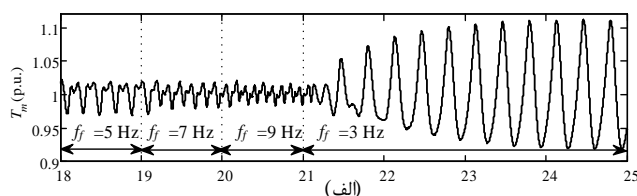
شکل (۱۴): بلوک دیاگرام محرک اولیه به همراه کنترل‌کننده PI مجهز

به فیلتر پایین‌گذر



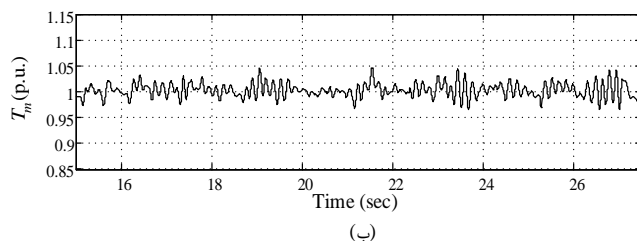
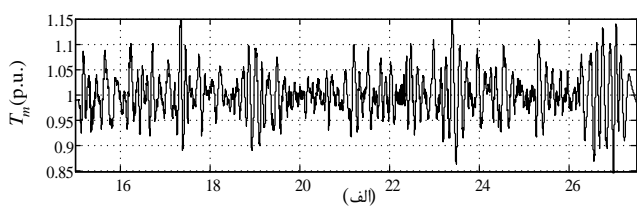
شکل (۱۵): مقایسه گشتاور مکانیکی مولد در دو وضعیت استفاده و

عدم استفاده از فیلتر پایین‌گذر



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

## 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., Akpnr, 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.
- [10] 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.

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  $K_I$  تاثیر کمی بر مقدار این شاخص دارد.
- با توجه به نتایج فوق مقدار مناسب پارامترهای کنترل‌کننده محرک اولیه در شبکه مورد مطالعه برابر با  $K_P=0.1$  و  $K_I=4$  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 کنترل‌کننده‌های دیجیتال مولد را دارند. از نقاط قوت این روشها، می‌توان به سادگی، قابل اجرا بودن، کم هزینه بودن و موثر بودن آنها اشاره نمود.

جدول (۱): پارامترهای مولد سنکرون مقیاس کوچک

پارامتر	مقدار
D-Axis synchronous reactance ( $X_d$ )	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 ( $X_q$ )	۰/۹۸۸ p.u.
Q-Axis sub-transient reactance ( $X''_q$ )	۰/۱۸۴ p.u.
Potier reactance at rated load ( $X_p$ )	۰/۱۶۶ p.u.
Stator winding dc resistance ( $R_a$ )	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

- [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.L., 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.

## زیر نویس‌ها

- <sup>1</sup>Static VAR Compensator
- <sup>2</sup>Static Synchronous Compensator
- <sup>3</sup>Active Series Reactor
- <sup>4</sup>Proportional Integral
- <sup>5</sup>Settling Time
- <sup>6</sup>Rise Time
- <sup>7</sup>Percent Overshoot
- <sup>8</sup>Fault Clearing Time

