# روشی نو در طراحی و ساخت سنکرونایزر الکترونیکی بر اساس قفل کردن فاز جهت موازی کردن سریع دیزل ژنراتورها

مصطفی پرنیانی و رضا باقری

**چکیده: دراین مقاله طراحی، ساخت و نتایج حاصل از آزمون عملی یک سنکرونایزر[1] الکترونیکی جهت موازی کردن دیزل ژنراتورها با یکدیگر یا با شبکه سراسری شرح داده می‌شود. علی‌رغم آنکه ژنراتورهای موازی از مدتها پیش درنیروگاه‌های ایران به کار گرفته شده‌اند، اما دیزل ژنراتورهای موازی، علی‌رغم مزایای بسیار زیاد آنها، کمتر در صنعت ایران به کارگرفته شده‌اند. یک علت مهم برای این امر، نداشتن تجهیزات لازم برای سنکرون نمودن دیزل ژنراتورها بوده است. دستگاه سنکرونایزر ساخته شده با ارسال فرمانهای مناسب به سیستم کنترل سرعت دیزل ژنراتور، شرایط را طوری فراهم می‌کند که در اختلاف فاز صفر، فرمان موازی کردن صادر شود. مزیت مهم این نوع سنکرونایزر در مقایسه با انواع دیگر سنکرونایزرها، حفظ سنکرون بودن، پس از رسیدن به شرایط آن می‌باشد، به ترتیبی که با به کارگرفتن روش قفل کردن فاز[2] (PLL) ، این شرایط حفظ شده و دیگر نیازی به در نظر گرفتن زمان بسته شدن کلید برای ارسال فرمان موازی شدن نیست. این نمونه سنکرونایزر علاوه بر قابلیت اعتماد بیشتر به جهت نوع کارکرد آن، سنکرون نمودن را در سرعت بسیار بالاتری نسبت به سنکرونایزرهای کلاسیک انجام می‌دهد.**

*کلید واژه:* **حلقه قفل فاز، دیزل ژنراتور، سنکرونایزر، موازی کردن.**

## ۱- مقدمه

در ایران استفاده از دیزل ژنراتورهای موازی چندان جا افتاده نمی‌باشد. اغلب به جهت صدمات سنگینی که ممکن است در اثر موازی شدن غیر صحیح به دیزل ژنراتور وارد شود و نیز موجود نبودن یا جا نیفتادن استفاده از وسایلی مانند سنکرونایزر و رله‌های کنترل سنکرون، از تمام مزایای موازی کردن چشم پوشیده و راه‌حل محافظه‌کارانه انتخاب یک دیزل ژنراتور توان بالا ترجیح داده می‌شود، حال آنکه مزایایی مانند:

- قیمت پایین‌تر چند دیزل ژنراتور موازی شده توان پائین در مقایسه با یک دیزل ژنراتور توان بالا
- بازدهی بالاتر سیستم موازی شده به جهت کارکرد دیزل ژنراتورها در نزدیکی توان نامی خود
- کاهش هزینه‌های سرویس و تعمیرات به جهت عام‌تر بودن نوع دیزل ژنراتور
- افزایش اعتمادپذیری سیستم به جهت قابلیت خارج کردن موقت یک دیزل ژنراتور جهت انجام تعمیرات بدون از کار افتادن کل سیستم
- قابلیت مدیریت مصرف از طریق توزیع بار اقتصادی بین دیزل ژنراتورها
- پایداری بیشتر دیزل ژنراتورهای موازی در مقایسه با یک دیزل ژنراتور

مزایایی هستند که قابل چشم‌پوشی نمی‌باشند. برای کارکرد موازی دیزل ژنراتورها رسیدن به حالت سنکرون، الزامی است. سنکرونیزاسیون حالتی از موازی کردن را بیان می‌کند که در آن هیچ نوع جریان ضربه‌ای و یا شوک مکانیکی قابل ملاحظه‌ای که باعث آسیب دیدگی شبکه و یا به ویژه دیزل ژنراتور تازه وارد گردد ایجاد نشود. برای به وجود آوردن چنین حالتی برقراری چهار شرط زیر ضروری است:

۱ـ یکسان بودن توالی فازها در دو سوی کلید اتصال
۲ـ برابری سطح ولتاژ فازها
۳ـ برابری فرکانسها
۴ـ برابری فاز ولتاژهای همنام در لحظه اتصال

سنکرونایزر دستگاهی است که شرایط همزمانی را بین دو دیزل ژنراتور یا یک دیزل ژنراتور و شبکه با ارسال فرمان اتوماتیک به سیستم‌های کنترل سرعت و کنترل ولتاژ فراهم می‌آورد. این دستگاه جایگزین سنکرون نمودن دستی می‌شود که در آن یک اپراتور با نگاه به صفحه سنکروسکوپ دستوری که باید اجرا کند را دریافته و تغییرات لازم را می‌دهد. پس از تصحیح فرکانسها و ولتاژها، سنکروسکوپ اختلاف فاز دو دستگاه را نمایش می‌دهد که باز اپراتور باید با رسیدن به اختلاف فاز مورد نظر فرمان موازی شدن دو دستگاه را صادر کند. مشخص است که اینجا تمام عوامل فرمان به دست اپراتور می‌باشد که در صورت اشتباه وی خسارت جبران‌ناپذیری به دستگاه وارد می‌آید.

## ۲- مقایسه با سنکرونایزرهای کلاسیک

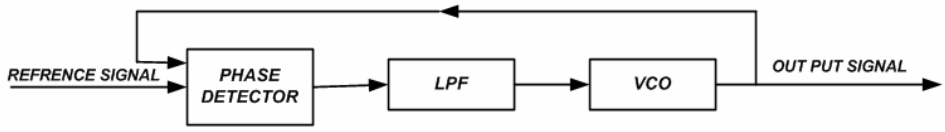
در دستگاه‌های سنکرونایزر کلاسیک، کاربر یک اختلاف فرکانس و اختلاف فاز و اختلاف ولتاژ قابل قبول تنظیم کرده و سنکرونایزر، فرکانس و ولتاژ را به اختلاف قابل قبول رسانده و برای رسیدن به اختلاف فاز قابل قبول صبر می‌کند. پس از رسیدن اختلاف فاز به میزان قابل قبول، با در نظر گرفتن زمان بسته شدن کلید، فرمان سنکرون شدن صادر می‌شود [۱] تا [۳]. البته در مورد دیزل ژنراتورها چون با یکبار تنظیم دستی سیستم تحریک، ولتاژ ثابت باقی می‌ماند و معمولاً سیستم دیگری بر روی سیستم تحریک اثر نمی‌گذارد، سنکرون نمودن تنها با تصحیح فاز و فرکانس دیزل ژنراتور صورت می‌گیرد. تنها نمونه ساخته شده از دستگاه سنکرونایزر در ایران، یک دستگاه سنکرونایزر میکروپروسسوری است که در مرکز تحقیقات نیرو به صورت آزمایشگاهی ساخته شده است [۱]. نتایج اندازه‌گیری زمان لازم برای سنکرون نمودن توسط این نمونه بر حسب حداکثر اختلاف ولتاژ، لغزش فرکانس و اختلاف فاز دو طرف در جدول ۱ آمده است.

این مقاله در تاریخ ۲۱ مهر ماه ۱۳۸۱ دریافت و در تاریخ ۳۰ دی ۱۳۸۲ بازنگری شد.

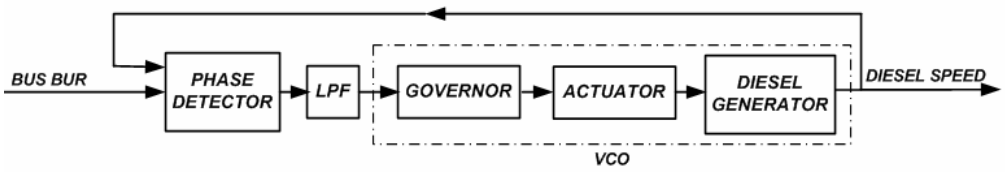
مصطفی پرنیانی، استادیاردانشکده برق دانشگاه صنعتی شریف (email: parniani@sharif.edu)
رضا باقری، دانشجوی دکترای دانشگاه صنعتی امیرکبیر (email: reza_baghery@yahoo.com)

1. Synchronizer
2. Phase Locked Loop

Archive of SID
www.SID.ir




شکل ۱: بلوک دیاگرام تراشه PLL.




شکل ۲: بلوک دیاگرام سنکرونایزر برای دیزل ژنراتور.

جدول ۱: نتایج عملکرد سنکرونایزر نیمه خودکار میکروپروسسوری.

| *Set Parameter* | *Case 1* | *Case 2* | *Case 3* | *Case 4* |
|---|---|---|---|---|
| $\Delta V$ % | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ |
| S % | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ |
| $\Delta \theta^{\circ}$ | ۰ | ۱ | ۲ | ۳ |
| *Tsync* | ۱۶ min | ۱/۶ min | ۱/۴۳ min | ۰/۸۲ min |

همانطور که مشاهده می‌شود اشکال عمده این دستگاه آن است که به هنگام افزایش دقت مورد نیاز و کم شدن اختلاف فرکانس مطلوب، مدت زمانی که طول می‌کشد تا دو ژنراتور در اختلاف فاز دلخواه قرار گیرند، بسیار به طول می‌انجامد. و همچنین طور زمان اتصال کلید نیز دارای اهمیت می‌باشد.

در ادامه این مقاله روشی جدید برای طرح سنکرونایزر خودکار بیان شده و نتایج آزمایش نمونه ساخته شده ارائه می‌گردد. تفاوت عمده این طرح با سنکرونایزرهای معمول آن است که علاوه بر تصحیح فرکانسی، تصحیح فاز را نیز انجام داده و اختلاف فاز دو طرف در صفر قفل می‌نماید. لذا نیازی به یافتن لحظه همفازی برای سنکرون نمودن نبوده و این عمل با سرعت و قابلیت اطمینان بیشتری صورت می‌گیرد. روش قفل‌فاز پیش از این در بسیاری از کاربردهای مخابراتی به کار رفته و دارای کاربرد فراوان در تشخیص سیگنال‌های FM و کاربردهای دیگر می‌باشد [۵] و [۶]. این روش همچنین در تشخیص فاز فرکانس اصلی برای تعیین فاز زوایای آتش در مبدلهای الکترونیک قدرت به کار می‌رود [۷] و [۸]. اما در مورد سنکرونایزر اغلب تحقیقات انجام گرفته در سالهای اخیر بر روی ملاحظات ولتاژ و جریانی در لحظهٔ موازی کردن بوده [۹] و کاربرد PLL در طراحی آن تاکنون گزارش نشده است.

## ۳- روش قفل شدن فاز

روش قفل شدن فاز یک روش کنترلی می‌باشد که در آن فرکانس و فاز به طور همزمان تصحیح می‌شوند. استفاده از این روش به عنوان روش کنترلی سنکرونایزر این مزیت را دارد که علاوه بر تصحیح فرکانس، تصحیح فاز نیز امکان‌پذیر می‌گردد. در انواع معمول سنکرونایزر، از آنجا که سنکرونایزر به انتظار نشسته و در خطای قابل قبول برای اختلاف فاز، فرمان موازی شدن را صادر می‌کند اگر اختلاف فرکانس دو سیگنال ناچیز باشد، مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن به اختلاف فاز مطلوب طولانی خواهد بود. نتایج عملی جدول ۱ نیز صحت این مسأله را تائید می‌کند. در صورتی که در روش قفل کردن فاز، فاز نیز همزمان با فرکانس تصحیح شده و صفر شدن خطای فاز و فرکانس در یک زمان روی می‌دهد. بنابراین زمان لازم برای تصحیح فرکانس و فاز از حالتی که در بالا ذکر شد، کمتر است. اشکال دیگری که در نحوه عملکرد سنکرونایزرهای معمولی به چشم می‌خورد، آن است که این سنکرونایزرها چون روی اختلاف فازکنترلی ندارند، باید زمان لازم برای بسته شدن کلید موازی‌کننده را در نظر بگیرند. و با در نظر گرفتن این زمان، پیش از صفر شدن اختلاف فاز، فرمان موازی شدن را به کلید بدهند تا در لحظه موازی شدن، اختلاف فاز صفر باشد. مشخص است که در نظر گرفتن انواع کلیدها و زمان‌های لازم برای اتصال آنها، در این سنکرونایزرها الزامی است. در حالی که در سنکرونایزرهایی با فاز قفل شوند، چون اساساً مسأله انتظار برای هم‌فازی معنا نداشته و این سنکرونایزرها کاملاً اختلاف فاز را صفر می‌کنند، لذا از پیچیدگی آنها در مقایسه با سنکرونایزرهای معمولی کاسته شده و نیازی به در نظر گرفتن زمان اتصال کلیدهای مختلف نداشته و بر قابلیت اعتماد آنها نیز افزوده می‌شود.

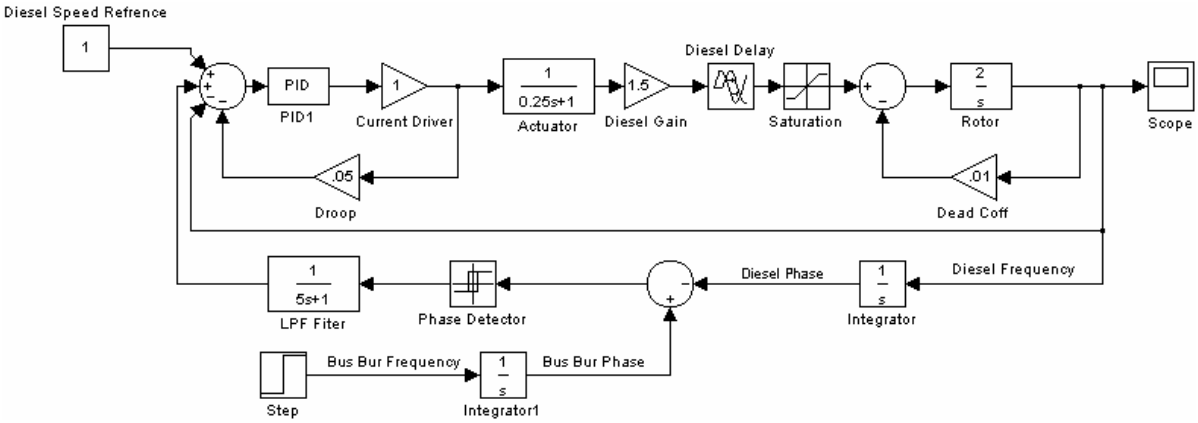
ایده روش کنترلی قفل‌فاز همانند حلقه قفل‌فاز (PLL) می‌باشد که یک تراشه بسیار پرکاربرد در مخابرات و الکترونیک است که اغلب برای آشکارسازی سیگنالهای مخابراتی به کار می‌رود. در شکل ۱ بلوک دیاگرام این تراشه را می‌بینیم.

اولین بخش این بلوک دیاگرام تشخیص‌دهنده اختلاف فاز است که میزان اختلاف فاز سیگنال ایجاد شده با سیگنال مرجع را مشخص می‌کند. دیگری یک فیلتر پائین‌گذر است که متناسب با خروجی تشخیص‌دهنده اختلاف فاز، یک ولتاژ DC ایجاد می‌کند. VCO نیز یک نوسان‌ساز تنظیم شده با ولتاژ می‌باشد که فرکانس سیگنال خروجی آن با ولتاژ ورودی رابطه خطی دارد. نحوه عملکرد PLL به این صورت است که با مقایسه فاز سیگنال ایجاد شده توسط VCO با فاز سیگنال مرجع، در صورت پس‌فاز بودن سیگنال، ورودی VCO افزایش یافته و فرکانس سیگنال خروجی آن افزایش می‌یابد و در صورت پیش‌فاز بودن سیگنال، ورودی VCO کاهش یافته و فرکانس سیگنال خروجی آن کاهش می‌یابد، تا در نهایت دو سیگنال هم‌فاز شوند و چون هم‌فاز هستند هم‌فرکانس هم خواهند بود.

برای گسترش این ایده به سنکرونایزر، بلوک دیاگرام شکل ۲ را در نظر

Archive of SID

www.SID.ir




شکل ۳: مدل دینامیکی مجموعه سنکرونایزر و گاورنر.

می‌گیریم. یک بلوک اختلاف فاز سیگنال ولتاژ خط اصلی را با سیگنال ولتاژ دیزل ژنراتور مشخص کرده و یک فیلتر پائین‌گذر، متناسب با این اختلاف فاز یک ولتاژ DC ایجاد می‌کند. این ولتاژ با فرمان به گاورنر، که عامل تغییر سرعت و فرکانس دیزل ژنراتور از طریق تغییر سوخت ورودی می‌باشد، ورودی سوخت را تنظیم کرده و سرعت دیزل ژنراتور را تغییر می‌دهد. در حقیقت مجموعه دیزل ژنراتور، محرک دریچه سوخت[1] و گاورنر همانند VCO عمل می‌کنند، یعنی خروجی سرعت متناسب با ولتاژ ورودی تغییر می‌کند. همانطور که در مورد PLL توضیح داده شد، این امر آنقدر تکرار می‌شود که سیگنال ولتاژ دیزل ژنراتور دقیقاً مشابه سیگنال خط یعنی هم‌فاز و هم‌فرکانس با آن شود.

## ۴- تحلیل دینامیکی عملکرد سنکرونایزر

### ۴-۱ مدل دینامیکی تشخیص‌دهنده اختلاف فاز

تنها موردی که در ساختمان انواع قفل‌کننده‌های فاز، موجب تفاوت آنها می‌شود، نوع تشخیص‌دهنده اختلاف فاز می‌باشد که موجب می‌شود پس از قفل شدن فاز دو سیگنال ورودی و خروجی، اختلاف فاز این دو سیگنال مقادیر متفاوتی باشد. اینکه تشخیص‌دهنده اختلاف فاز به ازای اختلاف فاز ورودی چه ولتاژی در خروجی داشته باشد و برای رسیدن به فرکانس مورد نظر، چه ولتاژی باید در ورودی VCO اعمال شود، مشخص می‌کند که اختلاف فاز نهایی دو سیگنال به چه میزان خواهد بود. البته این تفاوت برای حالت سیگنال بزرگ می‌باشد و در حالت سیگنال کوچک، تشخیص‌دهنده‌های اختلاف فاز خصوصیات مشابهی دارند. به این ترتیب که برای یک تشخیص‌دهنده اختلاف فاز که در نهایت در اختلاف فاز خاصی قفل می‌کند، با افزایش اختلاف فاز از آن مقدار نهایی، خروجی یک شده و با کاهش از آن مقدار، خروجی تغییر وضعیت داده و صفر می‌شود. به طور کلی چون تشخیص‌دهنده‌های اختلاف فاز همگی به صورت تراشه‌های دیجیتالی تحقق پیدا می‌کنند که خروجی آنها با کاهش یا افزایش اختلاف فاز از اختلاف فاز نهایی به صورت دیجیتالی تغییر می‌کند، مدل سیگنال کوچک آنها می‌تواند یک کنترل‌کننده ON-OFF باشد که فیلتر پائین‌گذری که پس از آن قرار می‌گیرد لبه‌های آن را نرم‌تر می‌کند. در این جا برای طراحی سنکرونایزر از تشخیص‌دهنده اختلاف فازِ تراشه ۴۰۴۶ استفاده شده است، که پس از قفل کردن فاز، اختلاف فاز صفر درجه را می‌دهد.

### ۴-۲ مدل دینامیکی مجموعه سنکرونایزر و گاورنر

برای مدلسازی و بررسی عملکرد دینامیکی سنکرونایزر، به جهت آنکه فرمان تغییر فرکانس خود را از طریق گاورنر اعمال می‌کند باید مدل دینامیکی ترکیب شده‌ای از گاورنر، سنکرونایزر و دیزل ژنراتور را به کار ببریم. برای تشکیل حلقه تصحیح فازکه توسط روش کنترلی PLL انجام می‌شود، فازها را از انتگرال سرعت استخراج کرده و با هم مقایسه می‌کنیم. به این ترتیب با در نظر گرفتن مدل سیستم کنترل سرعت که در [۹] آمده است، مدل مجموعه به صورت شکل ۳ به دست می‌آید.

همانطور که در مدل شکل ۳ مشخص است، مدل سیگنال کوچکی که برای روش کنترلی PLL در نظر گرفته‌ایم، شامل مقایسه فاز ولتاژ دیزل ژنراتور با فاز باس خروجی و بدست آوردن خطای آن می‌باشد که پس از عبور از یک کنترل کننده ON-OFF و یک فیلتر پائین‌گذر، به مرجع سرعت اعمال می‌شود. در اینجا سرعت دیزل ژنراتور ابتدا در نقطه‌ای ثابت شده و کنترل‌کننده‌های سیستم کنترل سرعت در مقادیر مناسب تنظیم شده‌اند. پس از مدتی سنکرونایزر وارد سیستم شده و شروع به فرمان به سیستم کنترل سرعت می‌نماید که در اینجا به صورت یک تابع پله مدل شده است. چون خود فرکانس در تنظیم به روش PLL دخالتی ندارد، از انتگرال آن که فاز سیگنال مرجع می‌باشد، برای کنترل به روش PLL استفاده خواهد شد. فاز سیگنال دیزل ژنراتور نیز از انتگرال گرفتن از فرکانس آن به دست می‌آید. در حالت ماندگار و صفر شدن خطای فاز، فرکانس‌های سیگنال دیزل ژنراتور و سیگنال مرجع نیز یکسان خواهند بود، یعنی تصحیح فاز به تصحیح فرکانس می‌انجامد.

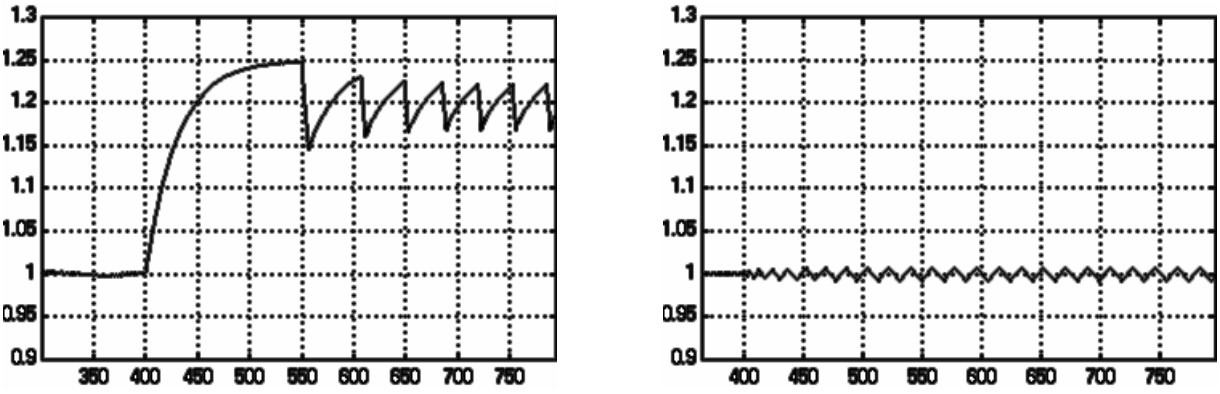
### ۴-۳ محدودیت دینامیکی استفاده از روش کنترلی PLL

با اینکه در مدل سیگنال کوچک، مانعی برای عملکرد روش کنترلی PLL مشاهده نمی‌شود اما باید توجه داشت که در محیط واقعی تضمینی وجود ندارد که اختلاف فرکانس خط اصلی و دیزل ژنراتور مقدار ناچیزی باشد تا مدل سیگنال کوچک از نظر عملی نیز درست به نظر بیاید. در عمل میزان اختلاف فاز دو سیگنال هر پریود یک بار مقدار تازه و جدید را به خود می‌گیرد. همچنین طبق روابط زیر سرعت تغییرات اختلاف فاز بستگی به میزان اختلاف فرکانس دو سیگنال دارد.

$$\Delta\theta = 2\pi(f_1 - f_2).t + (\theta_1 - \theta_2)$$
$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = 2\pi(f_1 - f_2) \qquad (1)$$
$$V_{out} = k.\Delta\theta + c$$

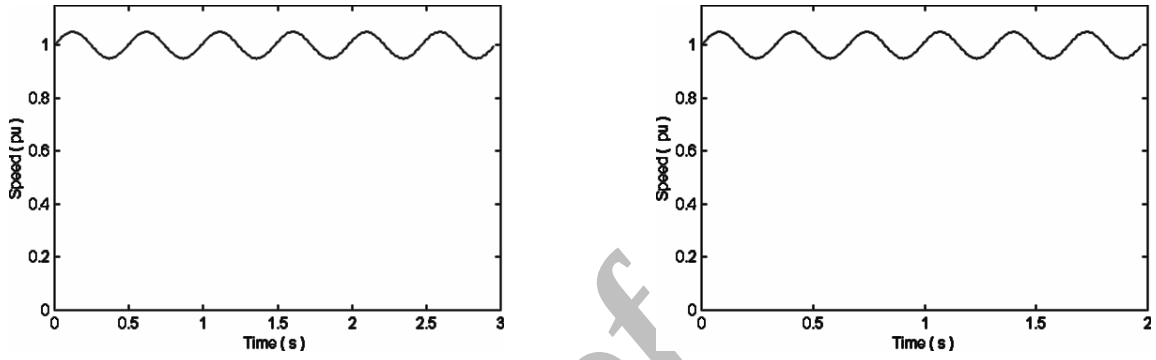
1. Actuator

Archive of SID
www.SID.ir



(الف) (ب)

شکل ۴: تغییرات سرعت دیزل ژنراتور در لحظه سنکرون شدن؛ (الف) فرکانسهای مرجع دیزل و خط اصلی مساوی هم، (ب) فرکانسهای مرجع دیزل و خط اصلی متفاوت (اختلاف ۲ هرتز).




شکل ۵: ناپایداری ایجاد شده توسط سنکرونایزر در اختلاف فرکانس ۳ هرتز. شکل ۶: ناپایداری ایجاد شده توسط سنکرونایزر در اختلاف فرکانس ۲ هرتز.

اگر اختلاف فرکانس دو سیگنال در حدود ۲ الی ۴ هرتز باشد در این صورت ثابت زمانی تغییرات فرمان PLL در حدود ۰/۰۵ الی ۰/۲۵ ثانیه خواهد بود. این زمان از ثابت زمانی‌های سیستم و تاخیرهایی که در سیستم وجود دارد، کمتر است بنابراین کنترل‌کننده از نظر سرعت پاسخ در مقایسه با سرعت پاسخ بخشهای دیگر سیستم رفتار کاملاً مطلوبی دارد. اما در شرایطی که اختلاف فرکانس قابل توجهی بین دو طرف وجود داشته باشد، ممکن است سیگنال خط اصلی هم اکنون پیش‌فاز باشد و فرمان کاهش فرکانس داده شود اما این فرمان با توجه به ثابت زمانی‌های سیستم زمانی در خروجی ظاهر شود که به جهت گذشتن یک پریود و مقایسه با پریود بعد حالا همان سیگنال به وسیله تشخیص‌دهنده اختلاف فاز، پس‌فاز تشخیص داده شود. یعنی به خاطر نوع عملکرد تشخیص‌دهنده‌های اختلاف فاز و خطا در اندازه‌گیری پیش‌فاز و پس‌فاز بودن، حلقه کنترلی موجب نوسان سرعت شود. به عنوان مثال XOR که یک تشخیص‌دهنده اختلاف فاز ساده می‌باشد، حداکثر اختلاف فازی که می‌تواند نشان دهد اختلاف فاز ۱۸۰ درجه می‌باشد. اگراختلاف فاز از این مقدار بیشتر شود، خروجی XOR به صفر تبدیل می‌شود. بنابراین اگر سرعت تغییرات اختلاف فاز کم باشد یعنی اختلاف فرکانس دو سیگنال کم باشد و مسأله صفر شدن تشخیص‌دهنده اختلاف فاز پیش از تصحیح فاز پیش نیاید، در یک پریود لغزش عمل تصحیح فاز به خوبی صورت می‌گیرد. اما در اختلاف فرکانس‌های بالا، چون سرعت تغییر اختلاف فاز بالا است، پیش از اینکه حلقه تصحیح فاز، فاز دو سیگنال را بر هم منطبق کند، خروجی تشخیص‌دهنده اختلاف فاز صفر شده و مقدار نادرست به خود می‌گیرد که همین موجب نوسان دیزل ژنراتور می‌شود.

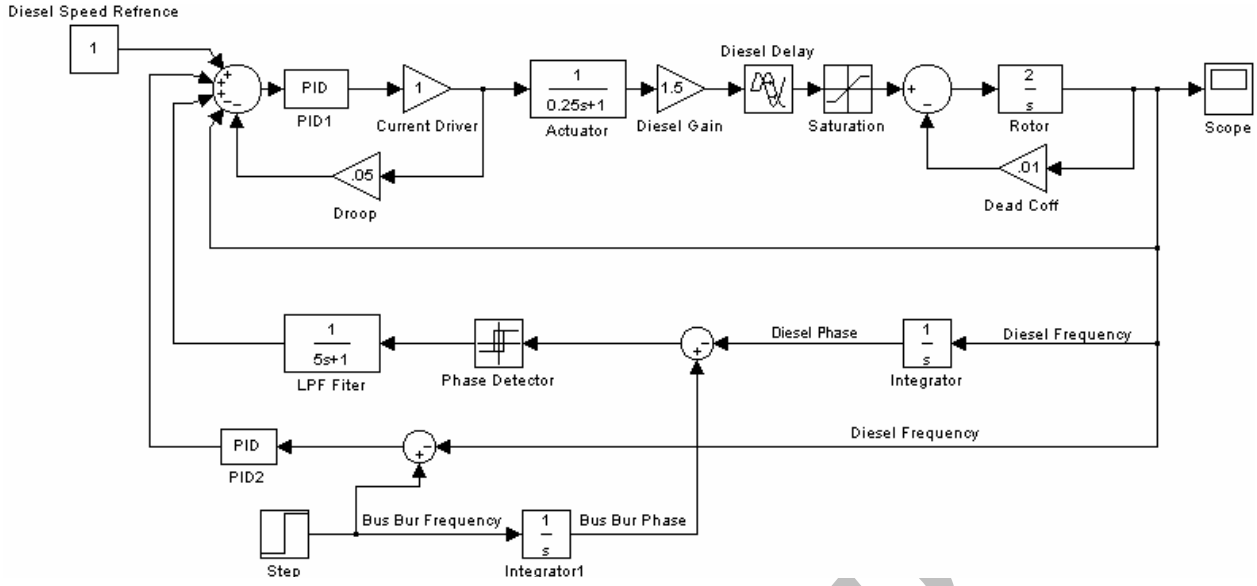
علاوه بر آن چون حلقه کنترل فاز براساس روش کنترلی ON-OFF عمل می‌کند خود به خود باعث نوسان در خروجی سرعت خواهد شد اما اینکه دامنه نوسان به چه میزان باشد بستگی به دامنه کنترل‌کننده ON-OFF دارد که هر چه بیشتر باشد، نوسان خروجی سرعت و فاز بیشتر خواهد بود. برای آنکه سنکرونایزر بتواند وظیفه سنکرون نمودن را انجام دهد شرط لازمی بر روی بهره کنترل‌کننده ON-OFF وجود دارد. قفل‌کننده فاز باید به صورتی عمل کند که نوسان اختلاف فاز در یک ناحیه قابل قبول ار اختلاف فاز باشد مثلاً نوسان بین مثبت ۱۰ درجه تا منفی ۱۰ درجه باشد که اتصال کلید در این ناحیه به دیزل ژنراتور ضربه‌ای وارد نمی‌کند. اگر دامنه کنترل‌کننده ON-OFF را $a$ درنظر بگیریم و فرکانس مرجعی که گاورنر در ابتدا برای آن تنظیم شده است را $f_0$ و فرکانس خط اصلی را $f_1$ بنامیم، کنترل‌کننده حلقه تصحیح فاز باید به صورتی عمل کند که با افزایش اختلاف فاز دو سیگنال از صفر، فرکانس دیزل را به فرکانسی کمتر از فرکانس خط اصلی رسانده و با کاهش اختلاف فاز دو سیگنال از صفر، فرکانس دیزل را به فرکانسی بیشتری از فرکانس خط اصلی برساند تا امکان تصحیح فاز فراهم شود. یعنی روابط زیر را خواهیم داشت.

$$\left.\begin{array}{l}\Delta\theta < 0 \Rightarrow f_0 + a > f_1 \\ \Delta\theta > 0 \Rightarrow f_0 - a < f_1\end{array}\right\} \Rightarrow a > |f_1 - f_0| \qquad (۲)$$

طبق روابط بالا اگر دامنه کنترل‌کننده ON-OFF از تفاضل فرکانس خط اصلی و فرکانس مرجع دیزل ژنراتور بیشتر نباشد، عملکرد قفل‌کننده فاز موجب قفل کردن دو فاز به هم نخواهد شد و مشخص است که هر چه این اختلاف بیشتر باشد دامنه کنترل‌کننده ON-OFF هم بیشتر بوده و در نتیجه دامنه نوسانات خروجی سرعت نیز بیشتر خواهد بود. در شکل ۴ شبیه‌سازی خروجی سرعت دیزل ژنراتور در لحظه سنکرون شدن، یک بار برای زمانی که فرکانس مرجع دیزل ژنراتور و فرکانس خط اصلی

Archive of

www.SID.ir




شکل ۷: مدل دینامیکی تصحیح شده.

یکی می‌باشد و بار دیگر برای زمانی که این دو ۲ هرتز اختلاف دارند را مشاهده می‌کنیم. در هر دو حالت ضریب کنترل‌کننده ON-OFF در کمترین مقداری که قفل کردن فاز را تأمین کند تنظیم شده است. همانطور که مشخص است با افزایش اختلاف فرکانس، دامنه نوسان خروجی سرعت و فاز افزایش می‌یابد.

برای اطمینان بیشتر یک مدار مقدماتی طبق مدل سیگنال کوچک طراحی و بر روی دیزل ژنراتور آزمایش شد. در عمل و با آزمایش عملی موارد ذکر شده کاملاً تأیید شدند، در شکل ۵ پاسخ خروجی سرعت دیزل ژنراتور به مدار طراحی شده وقتی که دو سیگنال ۳ هرتز اختلاف فرکانس دارند، مشاهده می‌کنیم. همانطور که می‌بینیم خروجی سرعت نوساناتی دارد و فرکانس این نوسانات ۳ هرتز است که همان اختلاف فرکانس دو سیگنال می‌باشد. مشخص است که چون تشخیص‌دهنده‌های اختلاف فاز در پایان یک پریود لغزش، صفر شده و کمترین مقدار خود را اختیار می‌کنند نوساناتی با فرکانس لغزش یعنی ۳ هرتز داریم.

برای اطمینان از اینکه این نوسانات، به جهت ناپایداری دینامیکی به وجود نیامده و مشخصه‌ای است که از سیستم ما به سیستم کنترل سرعت اعمال می‌شود، اختلاف فرکانس دیزل ژنراتور با خط اصلی را به ۲ هرتز می‌رسانیم، این بار نوساناتی با فرکانس ۲ هرتز داریم که در شکل ۶ مشاهده می‌کنیم.

اما در مواردی که اختلاف فرکانس دو سیستم از ۱هرتز کمتر بود، روش کنترلی PLL به تصحیح فاز و فرکانس پرداخته و شرایط برای سنکرون نمودن آماده می‌شود. با توجه به این نتایج لازم بود با تغییراتی در این روش کنترلی، این روش را برای اختلاف فرکانس‌های چند هرتزی نیز کارآمد سازیم.

## ۵- اصلاح سیستم کنترل با افزودن حلقه تصحیح فرکانس

برای حل مشکلی که در بالا به آن اشاره شد می‌توان یک حلقه کنترلی دیگر به سیستم اضافه نمود که در آن فرکانس دیزل ژنراتور مستقل از فاز آن تصحیح می‌گردد. بنابراین با رسیدن با اختلاف فرکانس قابل قبول، روش کنترلی PLL به خوبی عمل کرده و کار تصحیح فرکانس و فاز را انجام می‌دهد. در شکل ۷ مدل دینامیکی جدید این سیستم را مشاهده می‌کنیم.

## ۶- طراحی کنترل‌کننده های مکمل

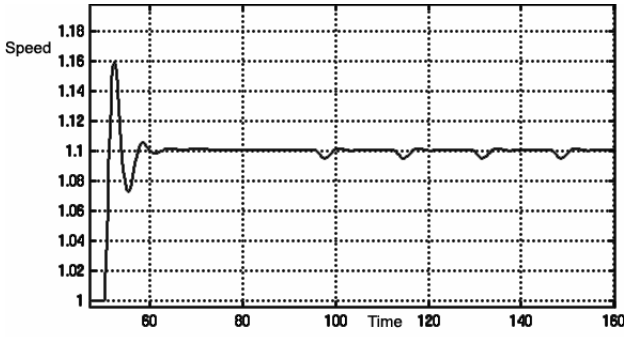
در مورد سنکرونایزری که برای دیزل ژنراتور به کار گرفته می‌شود، آنچه به عنوان ناپایداری دینامیکی به شمار می‌رود، نوسانات سرعت دیزل ژنراتور حول نقطه کار دائم، با دامنه‌ای به میزان ۲ الی ۵ درصد دامنه نقطه کاردائم و پریودی در حدود ثانیه است. نه بالازدگی در لحظه شروع و نه سرعت پاسخ یا کندی آن از اهمیت چندانی برخوردار نیستند. بنابراین باید کنترل‌کننده‌های مکمل در حلقه‌های تنظیم فاز و فرکانس به صورتی تنظیم شوند که ناپایداری دینامیکی به وجود نیاید. می‌توان برای کنترل حلقه تصحیح فرکانس از یک کنترل‌کننده PI استفاده کرد تا خطای ماندگار فرکانس صفر شود. زیرا همانطور که در بالا اشاره شد هر چه دو فرکانس به یکدیگر نزدیکتر باشند دامنه مورد نیاز برای کنترل‌کننده ON-OFF جهت قفل کردن فاز کمتر بوده و نوسان خروجی سرعت کمتر می‌باشد. از طرف دیگر حلقه تصحیح فاز دارای یک فیلتر پائین‌گذر می‌باشد که دامنه و ثابت زمانی آن قابل تغییر است. اگر ثابت زمانی حلقه تصحیح فاز خیلی پائین باشد، حلقه تصحیح فاز و فرکانس با هم عمل کرده و ممکن است در کار هم تداخل نمایند. بنابراین برای آنکه پس از نزدیک شدن دو فرکانس به یکدیگر، حلقه تصحیح فاز وارد عمل شده و به تصحیح فاز بپردازد، ثابت زمانی تصحیح فاز بیش از ثابت زمانی تصحیح فرکانس انتخاب می‌گردد.

## ۷- الگوریتم طراحی کنترل‌کننده‌های مکمل

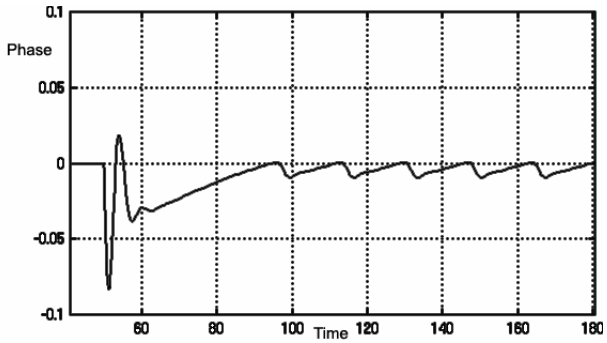
به جهت تنوع انواع مختلف دیزل ژنراتور، و یکسان نبودن ضرایب دینامیکی آنها، باید یک الگوریتم تنظیم ضرایب کنترل‌کننده تهیه کرد که کاربر بتواند براساس آن به تنظیم ضرایب کنترل‌کننده‌های حلقه تصحیح فرکانس و فاز پرداخته و مانع از به وجود آمدن ناپایداری دینامیکی شود. شرط لازم برای این الگوریتم آن است که کاربر بدون استفاده از وسایل آزمایشگاهی و تنها با استفاده از تجهیزات ساده اندازه‌گیری بتواند به تنظیم ضرایب بپردازد.

از آنجا که قرار است کنترل‌کننده‌های حلقه‌های تصحیح فرکانس و فاز به تناوب وارد عمل شده و در کار هم تداخل نداشته باشند، می‌توان ضرایب آنها را مستقلاً تنظیم نمود. برای پیدا نمودن ضرایب مناسب برای کنترل‌کننده حلقه تصحیح فرکانس، کافی است که از روش

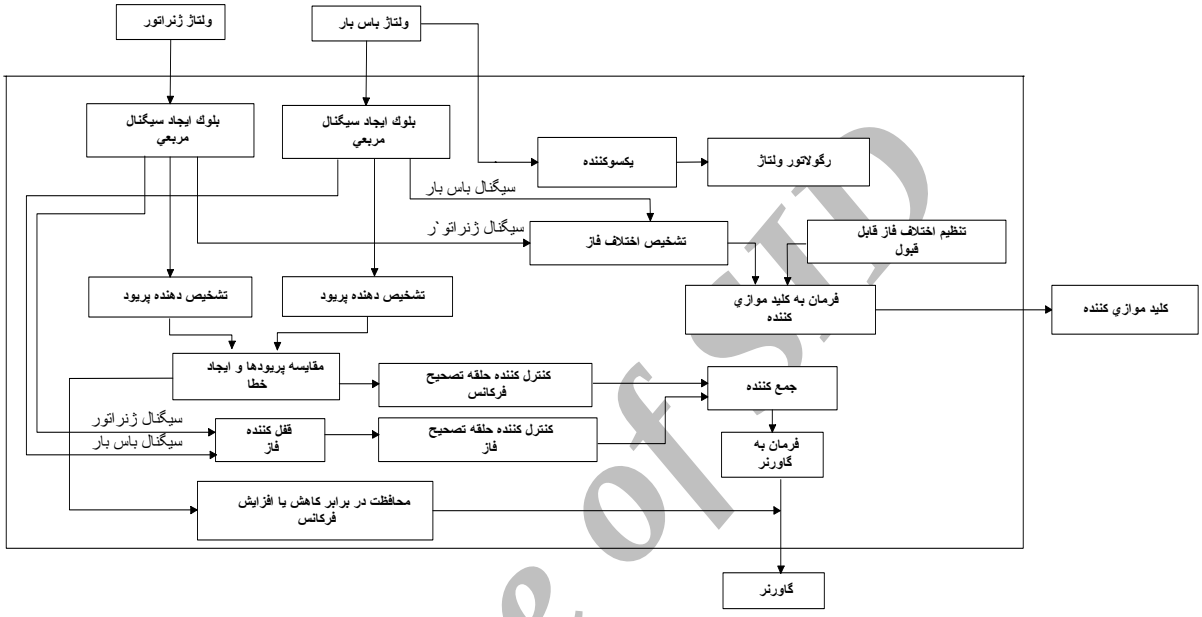
Archive of SID
www.SID.ir




شکل ۸: خروجی شبیه سازی از سرعت.




شکل ۹: منحنی اختلاف فاز دیزل ژنراتور با باس مرجع از زمان عملکرد سنکرونایزر.




شکل ۱۰: نمودار بلوکی سنکرونایزر ساخته شده.

Nichols–Ziegler فرکانسی استفاده کنیم. علت انتخاب این روش به جهت سادگی و قابلیت اندازه‌گیری پارامترها به وسیله دستگاه‌های ساده اندازه‌گیری است. با افزایش ضریب کنترل‌کننده متناسب تا جایی که نوسانات محسوس داشته باشیم، ضرایب کنترل‌کننده PI از روی معیار Ziegler-Nichols فرکانسی به دست می‌آید که پارامترهای محاسبه، پریود نوسان و ضریبی که باعث نوسان شده، می‌باشد. برای تنظیم ضریب کنترل‌کننده حلقه تصحیح فرکانس، حلقه کنترلی PLL را از طریق صفر کردن ضرایب کنترل‌کننده آن از دینامیک سیستم جدا می‌کنیم. پس از تنظیم مناسب ضرایب کنترل‌کننده حلقه تصحیح فرکانس، ثابت زمانی کنترل‌کننده حلقه تصحیح فاز یا همان ثابت زمانی فیلتر پائین‌گذر را به صورتی تنظیم می‌کنیم که با عملکرد حلقه تصحیح فرکانس و تصحیح تقریبی فرکانس، حلقه تصحیح فاز وارد عمل شود. ضریب کنترل‌کننده ON-OFF را از صفر تا اندازه‌ای که عمل قفل شدن فاز در آن به وقوع بپیوندد افزایش می‌دهیم. حال ضرایب سنکرونایزر درمقادیر صحیح خود تنظیم شده‌اند و با هر بار وارد شدن سنکرونایزر، عمل سنکرون نمودن با سرعت قابل توجه به وقوع می‌پیوندد. در شکل‌های ۸ و ۹ خروجی شبیه‌سازی را مشاهده می‌کنیم.

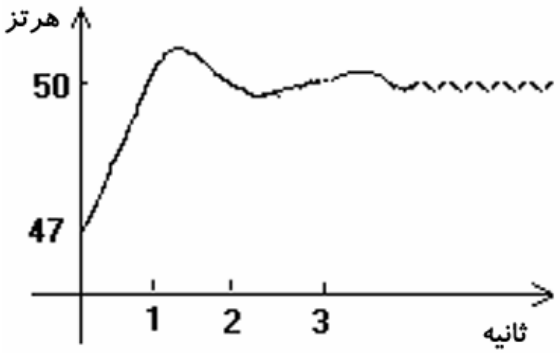
## ۸- بلوک دیاگرام و ویژگیهای جانبی سنکرونایزر

براساس روش‌های گفته شده، یک دستگاه سنکرونایزر ساخته شد که در شکل ۱۰ نمودار بلوکی سنکرونایزر ساخته شده و اجزای مختلف آن را می‌بینیم. در این طرح برای اندازه‌گیری و مقایسه فرکانس از شمارنده‌های ۱۲ بیتی استفاده شده که یک سیگنال فرکانس بالا، در طول یک پریود از سیگنال ژنراتور و باس بار، این سیگنال‌ها را شمارش کرده و عدد شمارش شده را ثبت می‌کند. سپس ۴ بیت ارزش بالا از ۱۲ بیت شمارش شده را دو به دو با هم مقایسه کرده و در صورت یکسان نبودن حتی یکی از آنها، سنکرونایزر را از مدار خارج نگه می‌داریم. به این ترتیب سنکرونایزر طراحی شده در دامنه‌ای در حدود ۴۸ الی ۵۲ هرتز به عمل سنکرونیزاسیون می‌پردازد و در بقیه فرکانسها خارج باقی می‌ماند. به این ترتیب به دو مزیت دست می‌یابیم. اول آنکه در لحظات راه‌اندازی دیزل ژنراتور که اختلاف فرکانس آن با فرکانس مرجع زیاد می‌باشد، این خطای زیاد در حلقه کنترل فرکانس وارد نمی‌شود وتنها زمانی که دیزل ژنراتور به فرکانسی در نزدیکی فرکانس مرجع رسید، عملکرد سنکرونایزر آغاز می‌شود. دوم آنکه اگر به هر علتی از جمله ایجاد اشکال در مدارات سنکرونایزر، سنکرونایزر سرعت دیزل ژنراتور را بیش از حد افزایش دهد، این محافظ مانع از افزایش بیش از اندازه سرعت خواهد شد و سنکرونایزر را از مدار خارج می‌کند.

## ۹- نتایج عملی

در نهایت سنکرونایزر ساخته شده به روش بالا بر روی دیزل ژنراتور با موفقیت آزمایش شده و در زمانی در حدود ۳ الی ۴ ثانیه عمل سنکرون نمودن کامل گردید. درشکل ۱۱ نمودار رفتار خروجی سرعت دیزل ژنراتوری که حدود سه هرتز با فرکانس مرجع اختلاف فرکانس داشت، را مشاهده می‌کنیم.

Archive of SID
www.SID.ir




شکل ۱۱: تغییر خروجی سرعت دیزل ژنراتور از زمان آغاز کار سنکرونایزر.

همانطور که در شکل می‌بینیم در ۲ الی ۳ ثانیه اول فرکانس دیزل ژنراتور تصحیح شده و پس از آن نوسانات کوچک فرکانس با دامنه‌ای در حدود یک دهم هرتز حول فرکانس ۵۰ هرتز خواهیم داشت که نشان‌دهنده کارکرد حلقه تصحیح فاز می‌باشد. دراین شرایط موقعیت برای اتصال کلید موازی‌کننده فراهم است چرا که اختلاف فاز دو سیگنال نیز با دامنه‌ای در حدود ۷ الی ۱۰ درجه حول اختلاف فاز صفر، نوسان می‌کند.

## ۱۰- نتیجه گیری

روش قفل فاز یک روش کارآمد برای به کارگیری در سنکرونایزرها می‌باشد که با افزودن یک حلقه تصحیح فرکانس به خوبی عمل سنکرون نمودن را انجام می‌دهد. نتایج آزمون عملی بر روی دیزل ژنراتور نیز این مورد را تائید می‌کند. با به کارگیری الگوریتم پیشنهادی و صنعتی شدن طرح، امید می‌رود دامنه استفاده از دیزل ژنراتورهای موازی با وجود مزایای بسیار زیادی که دارند توسعه یافته و عمل سنکرون نمودن با سرعت و قابلیت اعتماد بیشتری صورت بگیرد.

## سپاسگزاری

در خاتمه از زحمات فراوان و همکاریهای بی‌شائبه آقایان مهندس قنبرنژاد و مهندس فخفوری که محیط و شرایط مناسب جهت عملی شدن این روش سنکرون نمودن را در شرکت لایبید فراهم نموده و از هیچ‌گونه همکاری جهت ساخت و آزمایش این دستگاه دریغ نفرمودند تشکر می‌نمائیم.

## مراجع

[۱] فاطمه میرراشد، محمد طایفه حسینلو، و سید محمد تقی بطحائی، "بررسی طراحی و ساخت سنکرونایزر میکروپروسسوری در نیروگاهها، "*دهمین کنفرانس بین‌المللی برق*، صفحات ۳۰۳ الی ۳۱۴، اردیبهشت ۱۳۸۰.

[2] A. K. Ghai, H. K. Verma, and P. Mukhopadyay, "A new synchronizer for small power houses," in *Proc. Conf. Computer Application in Large Scale Power System*, IFAC, vol. 3, pp. 165-171, 1979.

[3] Y. H. Yang, G. C. Shang, and Y. J. Fang, "A fast following synchronizer of generators," *IEEE Trans on Energy Conversion*, vol. 3, no. 4, pp. 765-770, Dec. 1988.

[4] W. A. David and K. S. P. Kumar, "A method for self-tuning a PID controller for control of small to medium sized diesel engines," in *Proc. IEEE Conf.*, 1991.

[5] A. J. Payne, A. Thanachayanont, and E. Drakakis, "Translinear phase-lock loops," *IEE Colloquium on Phase Lock Loops: Theory and Practice (Ref. No. 1999/102)*, pp. 9/1-9/9, May 1999.

[6] S. N. Bikkenin, D. G. M. Cruickshank, and P. M. Grant, "Fractional-N phase locked loop for frequency synthesis," *IEE Colloquium on Phase Lock Loops: Theory and Practice*, pp. 3/1-3/6, May 1999.

[7] P. Verdelho and G. D. Marques, "Four wire active power filter control circuit with phase locked loop phase angle determination," in *Proc. Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*, pp. 34-39, Sep. 1998.

[8] N. Hingorani and L. Gyugui, *Understanding FACTS*, IEEE Press, 2000.

[9] J. J. Rodriguez-Andina, J. Farina, A. A. Nogueiras-Melendez, and A. Lago, "A digital integrated circuit for switching of parallel connected converters,". in *Proc. ISIE '98. IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics,* vol. 2, pp. 363-366, 7-10 Jul. 1998.

**مصطفی پرنیانی** دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق–قدرت را به ترتیب در دانشگاه‌های صنعتی امیرکبیر و صنعتی شریف گذرانده و دکترای مهندسی برق را در سال ۱۹۹۵ از دانشگاه تورنتو دریافت کرد. وی از سال ۱۳۷۴ عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف می‌باشد. همچنین پیش از آن با مهندسین مشاور قدس نیرو و مرکز تحقیقات نیرو همکاری نموده است. زمینه‌های فعالیت ایشان کنترل و دینامیک سیستم‌های قدرت و کاربرد الکترونیک قدرت در سیستم‌های قدرت می‌باشد .

**رضا باقری** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی برق–کنترل و کارشناسی ارشد مهندسی برق–قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۰ در دانشگاه صنعتی شریف به پایان رسانده و اکنون دانشجوی دکترای مهندسی برق–قدرت در دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. زمینه‌های فعالیت ایشان الکترونیک و الکترونیک قدرت، کیفیت برق و مباحث مرتبط با مدیریت تکنولوژی می‌باشد.

Archive of SID
www.SID.ir