



دانشکده فنی و مهندسی  
گروه مهندسی برق و الکترونیک

پایان نامه کارشناسی یا کارشناسی ارشد  
گرایش الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

مدلسازی، تحلیل و شبیه سازی ژنراتور القایی خود تحریک

نگارش

محمد حسین رحیمیان

استاد راهنما

دکتر اسماعیل فلاح

ماه و سال

اسفند ۱۳۹۵

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

## صفحه فرم ارزیابی و تصویب پایان نامه - فرم تأیید اعضاء کمیته دفاع

در این صفحه فرم دفاع یا تأیید و تصویب پایان نامه موسوم به فرم کمیته دفاع- موجود در پرونده آموزشی- را قرار دهید.

### نکات مهم:

- ✓ نگارش پایان نامه/رساله باید به زبان فارسی و بر اساس آخرین نسخه دستورالعمل و راهنمای تدوین پایان نامه های دانشگاه صنعتی امیرکبیر باشد.(دستورالعمل و راهنمای حاضر)
- ✓ رنگ جلد پایان نامه/رساله چاپی کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا باید به ترتیب مشکی، طوسی و سفید رنگ باشد.
- ✓ چاپ و صحافی پایان نامه/رساله بصورت پشت و رو(دورو) بلامانع است و انجام آن توصیه می شود.

به نام خدا

## تاریخ: تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب محمد حسین رحیمیان متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

امضا

## در صورت تمایل این صفحات نیز اضافه شود: (اختیاری)

- **صفحه تقدیم**

نویسنده پایان نامه، در صورت تمایل می تواند برای سپاسگزاری پایان نامه خود را به شخص یا اشخاص و یا ارگان خاصی تقدیم نماید.

- **صفحه تقدیر و تشکر**

نویسنده پایان نامه می تواند مراتب امتنان خود را نسبت به استادراهنما و استادمشاور و یا دیگر افرادی که طی انجام پایان نامه به نحوی او را یاری و یا با او همکاری نموده اند ابراز دارد.

## چکیده

امروزه با افزایش گرمایش زمین و تولید بیش از حد گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوختن سوخت‌های فسیلی، رویکرد عمده‌ای در صنعت به انرژی‌های جایگزین، مانند تولید انرژی از باد، خورشید، گرمای زمین و غیره وجود دارد. در این صنایع، یکی از پرکاربردترین ژنراتورها ژنراتور القایی خودتحریک است، که طوری طراحی می‌شود که به صورت جداگانه و مستقل عمل کند. هدف این پایان‌نامه بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی این ژنراتور در شرایط مختلف است، که با حل معادلات حاکم بر ژنراتور امکان‌پذیر می‌شود. سپس، با داشتن مدل دینامیکی سیستم، برای کنترل مستقل آن یک کنترل پیشنهاد شده است که به طور تطبیقی در شرایط کاری مستقل، پارامترهای خود را از طریق الگوریتم ژنتیک به طور بهینه تنظیم می‌کند. سپس، به بررسی رفتار این کنترل‌کننده، در شرایط کاری مختلف ژنراتور، از قبیل تغییرات ناگهانی بار و سرعت ژنراتور، و همچنین پارامترهای شبکه، پرداخته شده است.

## واژه‌های کلیدی:

ژنراتور القایی خود-تحریک، کنترل‌کننده ولتاژ، کنترل تطبیقی، بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

## فهرست مطالب

<b>1 فصل اول: مقدمه</b>	<b>1</b>
1.1 مقدمه	۲
2.1 ژنراتور القایی خودتحریک	۲
1.2.1 تحلیل عملکرد دائمی	۳
2.2.1 تحلیل عملکرد گذرا	۳
3.1 مراحل و اهداف پایان نامه	۳
<b>2 فصل دوم: روشهای مدلسازی و تحلیل ژنراتور القایی خودتحریک</b>	<b>۵</b>
1.2 مقدمه	۶
2.2 روش های مدلسازی و تحلیل ژنراتور القایی خودتحریک	۶
3.2 محاسبه ی کمترین خازن	۱۱
4.2 مدل تبدیل پارک ژنراتور القایی خودتحریک	۱۴
<b>3 فصل سوم: مدلسازی ژنراتور القایی خود تحریک</b>	<b>۱۹</b>
1.3 مقدمه	۲۰
2.3 مدل ژنراتور القایی خود تحریک	۲۰
3.3 محاسبه ی کمیت های مدار معادل تکفاز ماشین القایی	۲۲
1.3.3 آزمایش DC	۲۲
2.3.3 آزمایش روتور قفل شده	۲۲
3.3.3 آزمایش بی باری	۲۳
4.3 ارائه یک کنترلر برای تثبیت ولتاژ خروجی استاتور	۲۴
3.4.1 طراحی کنترلر	۲۶
2.4.3 کنترلر تطبیقی	۲۷
5.3 نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک	۲۸
1.5.3 عملگر های بازتولید نسل ها:	۳۰
<b>4 فصل چهارم: بررسی عملکرد و کنترل ولتاژ ماشین القایی خود-تحریک</b>	<b>۳۳</b>
4.1 مقدمه	۳۴
2.4 محاسبه ی کمیت های مدار معادل تکفاز ماشین القایی	۳۴
1.2.4 آزمایش DC	۳۴
2.2.4 آزمایش روتور قفل شده	۳۵
3.2.4 آزمایش بی باری	۳۵
3.4 محاسبه ی نمودارها برای سیستم مورد مطالعه	۳۶

۳۷	تحلیل عملکرد ژنراتور در تغییرات بار	۴.۴
۳۸	عملکرد ژنراتور در ولتاژ ثابت	۱.۴.۴
۴۰	عملکرد ژنراتور در جریان ثابت	۱.۴.۴
۴۳	بررسی عملکرد ژنراتور در حالت گذرا	۵.۴
۴۶	بررسی عملکرد استراتژی کنترل ولتاژ استاتور	۶.۴
۴۸	انتخاب مقاومت متصل به مبدل بوست	۱.۶.۴
۴۹	پاسخ کنترلر به تغییرات بار	4.6.2
۵۰	پاسخ کنترلر به تغییرات سرعت	4.6.3
۵۲	تغییرات همزمان بار و سرعت	4.6.4
۵۳	عملکرد کنترلر خود-تنظیم (تطبیقی)	4.6.5
۵۴	ساختار کنترلی ولتاژ استاتور با استفاده از ولتاژ متغیر	۷.۴
۵۵	انتخاب منبع ولتاژ متصل به مبدل بوست	۱.۷.۴
۵۶	پاسخ کنترلر به تغییرات بار	4.7.2
۵۷	پاسخ کنترلر به تغییرات سرعت	4.7.3
۵۹	تغییرات همزمان بار و سرعت	4.7.4
۶۰	عملکرد کنترلر خود-تنظیم	4.7.5
<b>۶۱</b>	<b>فصل پنجم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات</b>	<b>5</b>
۶۲	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۱.۵
۶۳	پیشنهادات	۲.۵
۶۴	بهبود مدلینگ:	5.2.1
۶۵	بهبود کنترلکننده	۲.۲.۵



## فهرست اشکال

شکل (۱-۲): مدار معادل تکفاز ژنراتور القایی خودتحریک.....	۸
شکل ۲-۲: طرح عمومی سیستم ژنراتور القایی خودتحریک راهاندازی شده با هیدروتوربین.....	۱۴
شکل (۳-۲): طرح اتصال محورهای d-q ژنراتور القایی خودتحریک.....	۱۶
شکل (۲-۴-الف): مدل دومحوری ژنراتور القایی خودتحریک در مختصات ساکن مختصات محور d.....	۱۶
شکل (۲-۴-الف): مدل دومحوری ژنراتور القایی خودتحریک در مختصات ساکن مختصات محور d.....	۱۷
شکل (۱-۳): تغییرات اندوکتانس مغناطیسکننده به ازای سه خازن تحریک مختلف [۳۷].....	۲۱
شکل (۲-۳): استراتژی کنترل ولتاژ SEIG با استفاده از یک مبدل بوست.....	۲۵
شکل ۳-۳: مدار معادل تکفاز ماشین القایی.....	۲۵
شکل ۳-۴: حلقه‌ی کنترلی برای استراتژی کنترل ولتاژ پیشنهادی.....	۲۷
شکل ۳-۵: جفت‌گیری تقاطعی تک نقطه‌ای.....	۳۰
شکل ۳-۶: جفت‌گیری تقاطعی دو نقطه‌ای.....	۳۰
شکل ۳-۷: جفت‌گیری تقاطعی یکنواخت.....	۳۱
شکل ۳-۸: عملگر جهش ژنتیکی.....	۳۱
شکل (۱-۴): تقریب اندوکتانس مغناطیس‌کننده با چندجمله‌ای مرتبه سوم.....	۳۶
شکل (۲-۴): تغییرات ولتاژ ترمینال استاتور به ازای تغییرات خازن تحریک در حالت بیباری.....	۳۷
شکل (۳-۴): تغییرات جریان خط به ازای تغییرات توان بار.....	۳۸
شکل (۴-۴): تغییرات ولتاژ خط به ازای تغییرات توان بار.....	۳۹
شکل (۵-۴): تغییرات فرکانس خط به ازای تغییرات توان بار.....	۳۹
شکل (۶-۴): تغییرات خازن تحریک برای ثابت ماندن ولتاژ خط به ازای تغییرات توان بار.....	۴۰
شکل (۷-۴): تغییرات جریان خط به ازای تغییرات توان بار.....	۴۱
شکل (۸-۴): تغییرات ولتاژ خط به ازای تغییرات توان بار.....	۴۱
شکل (۹-۴): تغییرات فرکانس خط به ازای تغییرات توان بار.....	۴۲
شکل ۴-۱۱: منحنی اشباع مغناطیسی هسته‌ی ژنراتور.....	۴۳
شکل ۴-۱۲: ولتاژ تحریک ژنراتور القایی خودتحریک در حالت بیباری با خازن ۹۰ میکروفاراد.....	۴۴
شکل ۴-۱۳: ولتاژ تحریک ژنراتور القایی خودتحریک در حالت بیباری با خازن ۵۰ میکروفاراد.....	۴۵
شکل ۴-۱۴: ولتاژ تحریک ژنراتور القایی خودتحریک در حالت بیباری با خازن ۳۰ میکروفاراد.....	۴۵
شکل ۴-۱۵: تاثیر ورود گشتاور سنگین به ژنراتور القایی خودتحریک.....	۴۶
شکل ۴-۱۶: مدل شبیه‌سازی استفاده شده در MATLAB/Simulink.....	۴۷
شکل ۴-۱۷: منحنی اشباع هسته‌ی ماشین.....	۴۸
شکل ۴-۱۸: RMS ولتاژ استاتور برای مقاومتهای مختلف.....	۴۹

- شکل ۴-۱۹: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات پله ی بار مختلف..... ۵۰
- شکل ۴-۲۰: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات پله ی سرعت ..... ۵۱
- شکل ۴-۲۱: RMS ولتاژ استاتور با مقاومت ۳۰۰ اهمی برای تغییرات پله ی سرعت ..... ۵۱
- شکل ۴-۲۲: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات همزمان پله ی سرعت و بار..... ۵۲
- شکل ۴-۲۳: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات خازنهای ولتاژساز از  $100 \mu\text{F}$  به  $110 \mu\text{F}$ ..... ۵۳
- شکل ۴-۲۴: حلقه ی کنترلی برای استراتژی کنترل ولتاژ پیشنهادی..... ۵۴
- شکل ۴-۲۵: مدل شبیهسازی استفاده شده در MATLAB/Simulink..... ۵۵
- شکل ۴-۲۶: RMS ولتاژ استاتور برای منابع ولتاژ DC مختلف..... ۵۶
- شکل ۴-۲۷: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات پله ی بار مختلف..... ۵۷
- شکل ۴-۲۸: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات پله ی سرعت..... ۵۸
- شکل ۴-۲۹: RMS ولتاژ استاتور با منبع ولتاژ DC ۴۰ ولتی برای تغییرات پله ی سرعت..... ۵۸
- شکل ۴-۳۰: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات همزمان پله ی سرعت و بار..... ۵۹
- شکل ۴-۳۱: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات خازنهای ولتاژساز از  $100 \mu\text{F}$  به  $110 \mu\text{F}$ ..... ۶۰

صفحه

## فهرست جداول

جدول ۱=۴ پارامترهای مدار معادل به دست آمده از آزمایش روتور قفل شده.....	۳۴
جدول ۲=۴ پارامترهای مدار معادل به دست آمده از آزمایش روتور قفل شده.....	۳۵
جدول ۳-۴ مشخصات ژنراتور.....	۴۳
جدول ۴-۴ مشخصات سیستم.....	۴۷
جدول ۵-۴ پارامترهای مدار معادل ماشین.....	۴۷
جدول ۵-۴: عملکرد کلی استراتژی کنترلی پیشنهادی.....	۵۲
جدول ۷-۴: عملکرد کلی استراتژی کنترلی پیشنهادی.....	۵۹

## ۱ فصل اول: مقدمه

## ۱.۱ مقدمه

امروزه با افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو زمین، و افزایش دمای آن (Global Warming) و خطرات ناشی از آن برای زمین، رویکرد کلی در تولید انرژی روی آوردن به انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر، از قبیل انرژی باد، انرژی خورشیدی، انرژی گرمایی زمین، و غیره، می‌باشد. در این میان، انرژی باد به علت ظرفیت بالای تولید انرژی، و همچنین تکنولوژی ساده‌تر نسبت به سایر انواع انرژی‌های پاک، اهمیت بالایی را به خود اختصاص داده است. به همین دلیل، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی بهبود تولید انرژی قابل انتقال از انرژی باد، همواره توجه محققین بسیاری را به خود جلب کرده است.

یکی از معمول‌ترین ژنراتورها در نیروگاه‌های بادی، ژنراتور القایی است، که از نظر ساختاری بین انواع ماشین‌ها ساده‌ترین شکل را دارد، و از نظر هزینه‌های ساخت و تعمیر و نگهداری بسیار بهینه است. همچنین، این نوع ژنراتورها در جاهای دیگری نظیر نیروگاه‌های کوچک حرارتی و آبی و غیره استفاده‌های بسیاری دارند.

در این میان، نوع ژنراتورهای القایی خود تحریک (SEIG یا Self-Excited Induction Generator) از مزایای ویژه‌ای برخوردارند که در این پایان‌نامه قصد بر این است که این نوع ژنراتورها رو مورد تحلیل و بررسی قرار داده و در شرایط مختلف کاری مورد بررسی قرار دهیم، و همچنین، در انتها روشی برای کنترل ولتاژ استاتور این نوع ژنراتور با استفاده از یک مقاومت کنترل شده در استاتور، ارائه شده است.

## ۲.۱ ژنراتور القایی خود تحریک

با توجه به خصوصیات خوب ژنراتور القایی نظیر استحکام مکانیکی، نیاز به تعمیر و نگهداری کم، هزینه پایین و قابلیت ذاتی برای کار در سرعت‌های مختلف، استفاده از آن در تبدیل انرژی بادی به انرژی الکتریکی مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱-۴]. ژنراتور القایی خود تحریک، نوعی از ژنراتورهای القایی است که می‌تواند، در نقاط دور دست که قدرتی برای تامین توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور القایی به وسیله‌ی شبکه وجود ندارد، به صورت خود تحریک کار می‌کند. بدین ترتیب که خازن‌های موازی با استاتور، وظیفه‌ی ولتاژ سازی را برعهده دارند.

با توجه به ماهیت فرآیندها، این ژنراتور در دو حالت دائمی و گذرا تحلیل می شود. در ادامه، کمیت-های وابسته به تحلیل عملکرد گذرا و دائمی معرفی شده اند.

### ۱.۲.۱ تحلیل عملکرد دائمی

در تحلیل عملکرد دائمی ژنراتور القایی خود تحریک، شرایط کار دائمی این ژنراتور در بارها و سرعت-های مختلف تعیین می شود. برای این منظور، نمودارهای کاری ماشین، نظیر نمودار ولتاژ - توان به ازای خازن های مختلف، نمودار فرکانس - توان به ازای خازن های مختلف، نمودار جریان توان به ازای خازن-های مختلف و یا نمودار خازن - توان به ازای ولتاژهای مختلف و... تعیین می شود. همچنین، می توان با استفاده از تحلیل عملکرد دائمی ژنراتور القایی خود تحریک، مقادیر مناسب خازن به ازای بارهای مختلف و حدود مجاز بار به ازای هر خازن را تعیین کرد.

### ۲.۲.۱ تحلیل عملکرد گذرا

در تحلیل عملکرد گذرای ژنراتور القایی خود تحریک، شرایط کارگذاری این ژنراتور بررسی می شود. شرایط کارگذرای ژنراتور القایی خود تحریک، شامل فرآیند تولید ولتاژ، تغییر سرعت باد و تغییر بار هستند. عملکرد گذرای ژنراتور القایی خود تحریک، به وسیله ی تبدیل پارک با استفاده از مختصات دو محوری (d-q) قابل مدل سازی است.

### ۳.۱ مراحل و اهداف پایان نامه

در این پایان نامه، عملکرد ژنراتور القایی خود تحریک، مدل سازی می شود. پس از بررسی روش های مدل-سازی ژنراتور القایی خود تحریک در حالت دائمی، دستگاه معادلات مناسب برای تحلیل عملکرد دائمی تشکیل داده می شود و با استفاده از روش مناسب حل می شود. با استفاده از حل این معادلات حالت دائمی، نمودارهای کاری ماشین در حالت دائمی به دست خواهند آمد. به کمک این نمودارها، مقادیر مناسب خازن به ازای بارهای مختلف و محدوده ی مجاز بار به ازای خازن های مختلف، نحوه ی

عملکرد دائمی ژنراتور القایی خودتحریک در فرکانس ولتاژ و جریان ثابت و... تعیین می شود. در پایان، این نمودارها، به کمک آزمایش اعتبارسنجی خواهند شد.

در انتها، روشی برای کنترل ولتاژ ارائه می شود که در آن سیم پیچ های روتور ژنراتور را به یک مقاومت کنترل شونده متصل می کنیم، و با استفاده از کنترل مقاومت روتور، سطح ولتاژ سمت استاتور در مقدار مرجع کنترل می شود. از آنجا که ژنراتورهای القایی خودتحریک عموماً در حالت مستقل و بدون اپراتور بهره برداری می شوند، بنابراین، یک حلقه ی کنترلی تطبیقی نیز در طراحی کنترلر اضافه شده است، تا ضرایب کنترلر را به طور خودکار در مقادیر بهینه کنترل کند.

۲

## فصل دوم: روش‌های مدل‌سازی و تحلیل ژنراتور القایی خودتحریک



## ۱.۲ مقدمه

در این فصل، روش‌های مدل‌سازی و تحلیل ژنراتور القایی خودتحریک بررسی می‌شوند پس از مقایسه‌ی الزامات و اشکالات روش‌های تحلیل حالت دائمی، روش تحلیل حداقل مربعات، برای تحلیل حالت دائمی ژنراتور القایی خودتحریک معرفی می‌شود. همچنین، نحوه‌ی مدل‌سازی حالت گذرای ژنراتور القایی با استفاده از مدل دومحوری (تبدیل پارک) تشریح شده است. از این روش‌ها، برای تحلیل عملکرد ژنراتور القایی خودتحریک استفاده کرد.

## ۲.۲ روش‌های مدل‌سازی و تحلیل ژنراتور القایی خودتحریک

در این بخش، بخشی از روش‌های ارائه شده برای تحلیل و مدل‌سازی ژنراتور القایی خودتحریک در حالت‌های مختلف بررسی می‌شوند.

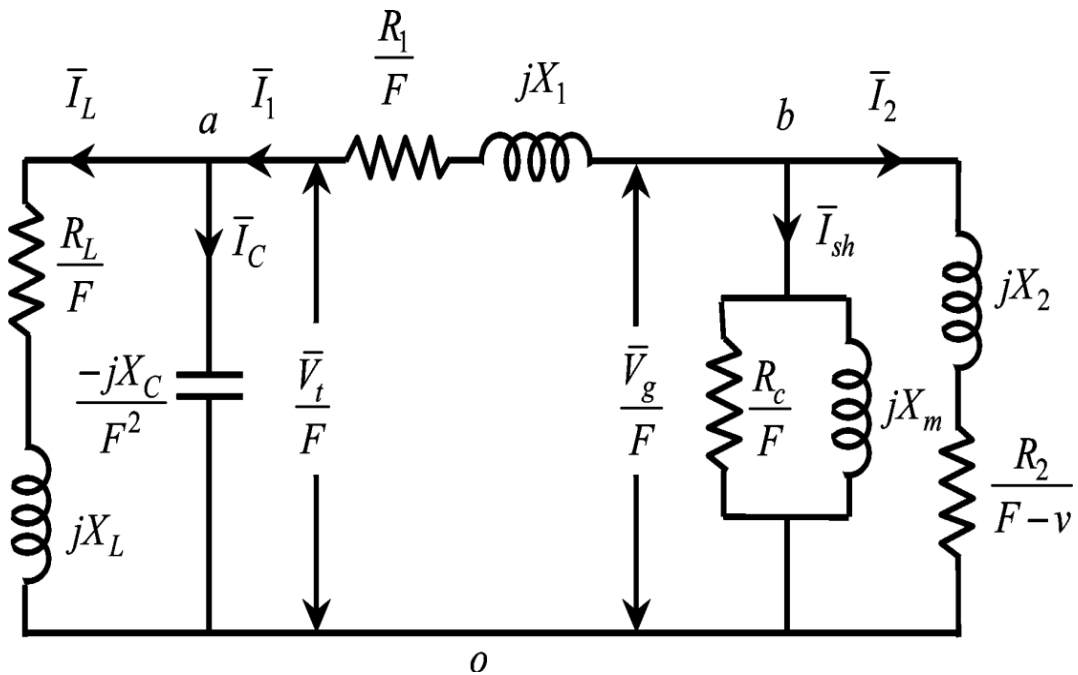
برای تحلیل عملکرد ژنراتور القایی خودتحریک در تغذیه‌ی بارهای نامتعادل، عموماً، از نظریه‌های مولفه‌ی متقارن استفاده می‌شود. در مرجع [۵]، مدار توالی مثبت و توالی منفی ژنراتور القایی خودتحریک ارائه شده است به کمک این مدار معادل، می‌توان، بارهای نامتعادل را در عملکرد ژنراتور القایی خودتحریک در نظر گرفت.

همچنین در مرجع [۶]، عملکرد ژنراتور القایی خودتحریک در تغذیه‌ی بارهای نامتعادل و بارهای تک-فاز، بررسی شده است و از مدار معادل توالی مثبت و منفی ژنراتور القایی خودتحریک و بارها، برای تحلیل عملکرد دائمی ژنراتور القایی استفاده شده است. به علاوه، در [۷] یک مدل بهبود یافته برای عملکرد دینامیکی سیستم پیشنهاد شده است که از طریق آن، رفتار یک ماشین القایی تکفاز مدل شده است. در [۸] عملکرد یک ژنراتور القایی در یک توربین بادی، با استفاده از مدل آن مورد تحلیل قرار گرفته است. به علاوه در [۹] یک مدل فضای حالت خطی شده برای ژنراتور القایی خودتحریک پیشنهاد شده است،

که به دلیل داشتن یک مدل خطی از سیستم، برای طراحی کنترلر ولتاژ بسیار کارا است. همچنین، یکی از عوامل تعیین کننده در مدل کردن ماشین القایی امپدانس مغناطیس کننده است، که در مرجع [۱۰] روشی برای مدل‌سازی این امپدانس ارائه شده است.

در مراجع [۱۱-۱۶]، روش‌هایی برای مدل‌سازی غیرخطی ژنراتور القایی خودتحریک، برای استفاده در توربین بادی، پیشنهاد شده است. مزیت این مدل‌سازی‌های غیرخطی، دقت بیشتر آنها نسبت به مدل‌های خطی شده است. همچنین، در [۱۷] با استفاده از منطق فازی، اندوکتانس مغناطیس کننده و عملکرد اشباع ژنراتور مدل شده است، و برای مدل‌سازی دقیق‌تر، اثر پوستی در ژنراتور القایی در مقاله‌ی [۱۸] به دقت مورد بررسی قرار گرفته است.

همان‌طور که در فصل اول اشاره شد، از مدل‌های حالت دائمی ژنراتور القایی خودتحریک برای بررسی عملکرد دائمی آن و بدست آوردن نمودارهای کاری آن استفاده می‌شود. برای این منظور، مدار معادل حالت دائمی تک فاز ژنراتور القایی خودتحریک استخراج می‌شود و کمیت‌های آن تعیین می‌شوند. شکل (۱-۲)، مدار معادل تک فاز ژنراتور القایی خودتحریک، که با بار سلفی - مقاومتی موازی شده است، مشاهده می‌شود. که در آن، ولتاژ شکاف هوایی و خروجی استاتور هستند و  $I_s$ ،  $I_r$  و  $I_l$ ، جریان استاتور، جریان روتور و جریان بار هستند.  $F$  و  $r$ ، فرکانس و سرعت پریونیت هستند و  $N$  سرعت نامی برحسب دور بر دقیقه است.  $R_s$ ،  $R_r$  و  $R_l$ ، مقاومت‌های استاتور، روتور و بار برحسب اهم هستند و  $X_s$ ،  $X_c$ ،  $X_m$ ،  $X_l$ ،  $X_r$ ، راکتانس‌های استاتور، روتوری، بار، مغناطیسی هستند و خازن برحسب اهم هستند.



شکل (۱-۲): مدار معادل تک‌فاز ژنراتور القایی خودتحریک

برای تحلیل عملکرد دائمی ژنراتور القایی خودتحریک، با استفاده از مدار معادل تک‌فاز معرفی شده در

شکل (۱-۲)، از تحلیل امپدانس حلقه [۱۹-۲۳] یا تحلیل ادمیتانس گره [۲۴، ۲۵]، استفاده می‌شود.

در روش امپدانس حلقه، دو معادله‌ی غیرخطی لحظه‌ای، برحسب فرکانس ( $F$ ) و راکتانس مغناطیس-کنندگی ( $X_m$ ) ژنراتور، با جداسازی قسمت‌های حقیقی و مجازی امپدانس حلقه‌ی معادل، ایجاد می‌شوند. در این دو معادله،  $X_m$  و  $F$  با فرض ثابت بودن دیگر کمیت‌ها، مجهول هستند و به روش‌های مختلف این معادلات حل می‌شوند.

همچنین، در روش ادمیتانس گره، دو معادله‌ی غیرخطی لحظه‌ای، برحسب فرکانس ( $F$ ) و راکتانس مغناطیس‌کنندگی ( $X_m$ ) ژنراتور، با جداسازی قسمت‌های حقیقی و مجازی ادمیتانس گره معادل، ایجاد می‌شوند و معادلات استخراج شده به وسیله‌ی روش‌های مناسب حل می‌شوند. با مشخص شدن مجهولات  $F$  و  $X_m$  عملکرد دائمی ژنراتور القایی خودتحریک، مدل‌سازی می‌شود.

در تحلیل حلقه‌ی مدار معادل تک‌فاز ژنراتور القایی خودتحریک معادله‌ی (۱-۲) صادق است

$$I_S Z_t = 0 \quad (1-2)$$

که در آن

$$\begin{aligned} Z_t &= Z_s + (Z_L // Z_C) + (Z_L // Z_r) \\ Z_s &= R_s / F + jX_s, \quad Z_L = R_L / F + jX_L \\ Z_C &= -jX_C / F^2, \quad Z_m = jX_m \\ Z_r &= R_r / (F - v) + jX_r \end{aligned}$$

چون  $(I_s \neq 0)$  است،  $(Z_t)$  در معادله‌ی (۲-۲) تعیین می‌شود.

$$Z_t = Z_s (Z_m + Z_r)(Z_L + Z_C) + Z_L Z_C (Z_m + Z_r) + Z_m Z_r (Z_L + Z_C) \quad (۲-۲)$$

همچنین، با انجام قانون جریان در مدار نشان داده شده در شکل (۱-۲)، می‌توان، معادلات گره آن را به دست آورد. به دلیل آن که، فرآیند خودتحریکی، مستلزم این است که ولتاژ خازن صفر نباشد، مقدار اندازه‌ی ادمیتانس معدل برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$|\bar{Y}| = 0 \quad (۳-۲)$$

که در آن،

$$\bar{Y} = \bar{Y}_{lsc} + \bar{Y}_m + \bar{Y}_r \quad (۴-۲)$$

$$\bar{Y}_m = -\frac{j}{X_m} \quad (۵-۲)$$

$$\bar{Y}_r = \frac{1}{(R_r / F - v) + jX_r} \quad (۶-۲)$$

$$\bar{Y}_C = \frac{jF^2}{X_C} \quad (۷-۲)$$

$$\bar{Y}_L = \frac{1}{(R_L / F) + jX_L} \quad (۸-۲)$$

$$\bar{Y}_s = \frac{1}{(R_s / F) + jX_s} \quad (۹-۲)$$

$$\bar{Y}_{lcs} = \frac{\bar{Y}_s \cdot (\bar{Y}_C + \bar{Y}_L)}{\bar{Y}_s + \bar{Y}_C + \bar{Y}_L} \quad (۱۰-۲)$$

$$|\bar{Y}| = \sqrt{\text{Re}(\bar{Y}) + \text{Im}(\bar{Y})} \quad (11-2)$$

برای اعمال روش نیوتن رافسون [۱۹-۲۳]، باید قسمت‌های حقیقی و مجازی معادله‌های (۲-۲) و (۲-۲) تفکیک شوند که این مساله، به دو رابطه‌ی غیرخطی برای تعیین  $F$  و  $X_m$  ختم می‌شوند.

می‌توان، به وسیله‌ی توابع ساخته شده در نرم افزار متلب، مانند (constr)، (fmincon) در نسخه‌های جدید متلب، (fsolve) یا توابع (Given) و (Find) در (MathCAD) بدون تفکیک به قسمت‌های حقیقی و موهومی، بهینه‌سازی را انجام داد. برای این منظور، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از اجرای الگوریتم (Direct)، با استفاده از تابع (constr) و الگوریتم ژنتیک در مرجع [۲۶] انجام شده است و مشاهده شده است که با اجرای الگوریتم ژنتیک، نتایج به مقادیر نزدیک‌تر شده‌اند. مشکل اصلی تابع (constr)، حساسیت زیاد به حدس اولیه‌ی مقادیر است.

بنابراین، روش‌های ارائه شده برای مدل‌سازی حالت دائمی ژنراتور القایی خودتحریک در سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند، در دسته‌ی اول مقالات [۱۹-۲۳]، جداسازی قسمت‌های حقیقی و موهومی ادمیتانس یا امپدانس، الزامی است. این روش‌ها، بسیار به حدس اولیه حساس هستند و ممکن است با انتخاب نامناسب حدس اولیه، به جواب مناسبی نرسند. همچنین، برای حل معادلات حاصل از این روش‌ها، به استخراج ماتریس جاکوبین نیاز است که بسیار به زمان شبیه‌سازی اضافه می‌کند.

دسته‌ی دوم مقالات [۲۷-۳۱]، هم به حدس اولیه‌ی دقیق نیاز دارند و همگرایی پاسخی نهایی، به انتخاب این حدس‌های اولیه بستگی شدیدی دارد. روش سکانت<sup>۱</sup>، یک نمونه از این روش‌هاست.

دسته‌ی سوم روش‌های ارائه شده [۲، ۳۲]، ادمیتانس را به عنوان یک تابع کمینه‌سازی می‌کند. یعنی، نیازی به تفکیک قسمت‌های حقیقی و موهومی آن ندارند. بنابراین، این روش‌ها نیازی به استخراج ماتریس جاکوبین و با انتخاب درست حدس‌های اولیه ندارند. روش‌های الگوریتم ژنتیک، به عنوان یک

<sup>۱</sup> - secant

روش بهینه‌سازی عمومی، نمونه‌ای از این روش‌ها است. اما، برای دستیابی به پاسخ دقیق فضای جست-وجو باید در محدوده و همسایگی پاسخ‌هایی نهایی قرار گیرد که این مساله، نیازمند آشنایی اولیه، با اصول اولیه طراحی و تحلیل ژنراتور القایی خودتحریک است. هر کدام از روش‌های مدل‌سازی بالا، دارای یک یا چند مشکل زیر است.

(۱) نیاز به جداسازی قسمت‌های حقیقی و موهومی ادمیتانس و امپدانس

(۲) نیاز به حدس اولیه مناسب

(۳) نیاز به محاسبه و استخراج ماتریس جاکوبین تابع بهینه‌سازی شده

(۴) نیاز به آشنایی با کمیت‌ها، برای انتخاب فضای اولیه جست‌وجو

همچنین یک روش دیگر برای حل این مسأله‌ی غیرخطی به نام الگوریتم DIRECT در [۳۳] پیشنهاد شده است، که یک روش بهینه‌سازی است که جست‌وجوی مقدار کمینه‌ی عمومی یک تابع با مقادیر حقیقی در بازه‌ی محدود به قید طراحی شده است. در فصل سوم این تحقیق، تحلیل دائمی ژنراتور القایی خودتحریک، به دلیل دقت بالا و سادگی و پرکاربرد بودن، با استفاده از این روش حداقل مربعات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۳.۲ محاسبه‌ی کمترین خازن

در این بخش، روابط محاسبه‌ی کمترین خازن برای تحلیل عملکرد حالت دائمی ژنراتور القایی ارائه شده‌اند. [۳۴]

الف) بی‌باری

در بی‌باری ( $Z_L = \infty$ )، پس از جایگزینی همه‌ی مقادیر امپدانس در شکل (۲-۱)، فرکانس و

کمترین مقدار خازن ژنراتور القایی خودتحریک را می‌توان از معادله‌ی (۲-۱۲) تعیین کرد.

$$Z_t = Z_S(Z_m + Z_r)(Z_L + Z_C) + Z_L Z_C(Z_m + Z_r) + Z_m Z_r(Z_L + Z_C) \quad (12-2)$$

پس از تفکیک قسمت‌های حقیقی و مجازی معادله‌ی (۱۲-۲) و صفرگذاشتن آن‌ها، کمترین مقدار خازن برای تحریک ژنراتور القایی و فرکانس عملکرد ژنراتور القایی از معادلات (۱۳-۲) و (۱۴-۲) محاسبه می‌شوند.

$$X_{Cmax} = \left( \frac{R_s}{F} + \frac{R_r}{F - \nu} \right) (X_{ls} + X_m) \frac{F^2 (F - \nu)}{R_r} \quad (13-2)$$

$$(2X_{ls}X_m + X_{ls}^2)F^3 - \nu(2X_{ls}X_m + X_{ls}^2)F^2 - (X_c(X_m + X_{ls}) + R_s R_r)F + \nu X_c(X_m + X_{ls}) = 0 \quad (14-2)$$

در حالت بی‌باری ژنراتور القایی خودتحریک، لغزش ماشین تقریباً صفر است و فرکانس پرینت ولتاژ ساخته شده، بسیار نزدیک به سرعت پرینت روتور است. بنابراین، با جایگزینی  $(F \approx \nu)$  و  $(F - \nu \approx 0)$  در معادله‌ی (۱۳-۲)، مقدار کمینه‌ی خازن استفاده شده برای خودتحریکی با استفاده از معادله‌ی (۱۵-۲) محاسبه می‌شود.

$$X_{Cmax} \approx (X_{ls} + X_m)\nu^2 \quad (15-2)$$

براساس معادله‌ی (۱۵-۲)، مقدار  $(X_{Cmax})$  یا خازن تحریک مینیمم برای خودتحریکی ژنراتور القایی خودتحریک به راکتانس نشتی، راکتانس مغناطیس‌کنندگی و سرعت روتور ژنراتور القایی خودتحریک بستگی دارد.

### ب) بار مقاومتی

در بار مقاومتی  $(Z_L = \frac{R_L}{F})$ ، پس از جایگزینی مقادیر امپدانس در معادله‌ی (۱۲-۲) و صفر قرار دادن قسمت‌های حقیقی و مجازی امپدانس، (۱۶-۲) و (۱۷-۲) استخراج می‌شوند.

$$X_{c \max} = \frac{R_L \left( \frac{R_S}{F^2} + \frac{R_r}{F(F-\nu)} \right) (X_{ls} + X_m)}{\frac{R_r R_L}{F^3(F-\nu)} + \frac{R_r R_S}{F^3(F-\nu)} - \frac{(2X_{ls}X_m + X_{ls}^2)}{F^2}} \quad (16-2)$$

$$\begin{aligned} & R_L(2X_{ls}X_m + X_{ls}^2)F^3 - \nu R_L(2X_{ls}X_m + X_{ls}^2)F^2 \\ & - (X_c(X_m + X_{ls})(R_L + R_S + R_r) + R_S R_r R_L)F \\ & \nu X_c(X_m + X_{ls})(R_L + R_S) = 0 \end{aligned} \quad (17-2)$$

براساس معادله‌ی (۱۶-۲)، مقدار ( $X_{c \max}$ ) یا کمترین خازن برای خودتحریکی در بار مقاومتی، به مقدار ( $R_L$ ) بستگی دارد.

### ج) بار سلفی - مقاومتی

در بار سلفی - مقاومتی، ( $Z_L = \frac{R_L}{F} + jX_L$ )، پس از جایگزینی همه‌ی امپدانس‌ها و مساوی صفر

قرار دادن قسمت‌های حقیقی و مجازی امپدانس معادلات (۱۸-۲) و (۱۹-۲) استخراج می‌شوند.

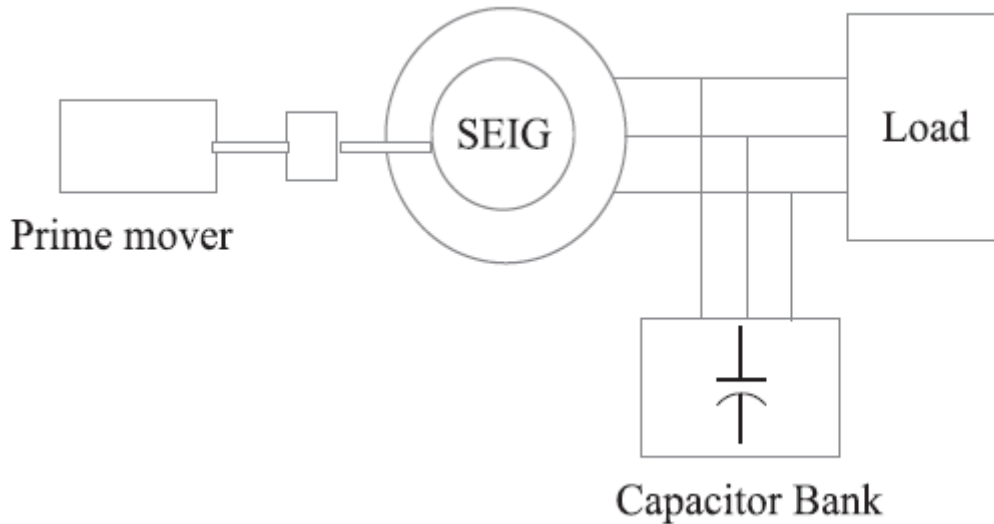
$$X_{c \min} = \frac{R_L \left( \frac{R_S}{F^2} + \frac{R_r}{F(F-\nu)} \right) (X_{ls} + X_m) - (2X_{ls}X_m + X_{ls}^2)X_L + \frac{R_S R_r X_L}{F(F-\nu)}}{\frac{R_r R_L}{F^3(F-\nu)} + \frac{R_r R_S}{F^3(F-\nu)} - \frac{(2X_{ls}X_m + X_{ls}^2)}{F^2} - \frac{X_L(X_{ls} + X_m)}{F^2}} \quad (18-2)$$

$$\begin{aligned} & (R_L(2X_{ls}X_m + X_{ls}^2) + X_L(X_m + X_{ls})(R_S + R_r))F^3 \\ & - \nu(R_L(2X_{ls}X_m + X_{ls}^2) + X_L R_S(X_m + X_{ls}))F^2 \\ & - (X_c(X_m + X_{ls})(R_L + R_S + R_r) + R_S R_r R_L + X_c R_r X_L)F \\ & + \nu X_c(X_m + X_{ls})(R_L + R_S) = 0 \end{aligned} \quad (19-2)$$

با تعریف مشخصات حالت دائمی زنراتور القایی خودتحریک، با استفاده از مدار معادل تک فاز حالت دائمی، نمی‌توان رفتار گذرای این ژنراتور را در طول فرآیندهای گذرا، همانند ساخت ولتاژ تحریک، تغییر باد و تغییر گشتاور راه‌اندازی را مدل‌سازی کرد. برای بررسی فرآیندهای گذرا از مدل دومحوری



ژنراتورالقایی خودتحریک استفاده می‌شود. طرح عمومی سیستم ژنراتورالقایی خودتحریک در شکل (۲-۲) مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۲: طرح عمومی سیستم ژنراتور القایی خودتحریک راه‌اندازی شده با هیدروتوربین

## ۴.۲ مدل تبدیل پارک ژنراتورالقایی خودتحریک

با استفاده از مختصات  $a-b-c$ ، مدل‌سازی ساختار ماشین امکان‌پذیر است. اما، برای این منظور، باید از ۶ معادله‌ی ولتاژ یا جریان استفاده کرد. اما، اگر مختصات  $d-q$  در نظر گرفته شوند، معادلات مورد نیاز، به ۴ عدد تقلیل می‌یابند.

معادلات مورد نیاز برای مدل‌سازی مدارهای معادل  $(d-q)$  در مرجع [۳۵]، ارائه شده‌اند. طرح عمومی و مدار معادل دومحوری ژنراتورالقایی خودتحریک در شکل‌های (۲-۳) و (۲-۴) نشان داده شد. با استفاده مولفه‌های  $d$  و  $q$  جریان استاتور ( $i_{sq}$  و  $i_{sd}$ ) و جریان روتور ( $i_{rq}$  و  $i_{rd}$ ) به عنوان متغیر حالت، معادلات دیفرانسیل (۲۰ تا ۲۳) از شکل (۲-۴) استخراج می‌شوند.

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{(L_S L_r - L_m^2)} \left[ -L_S R_S i_{sq} - \omega_r L_m^2 i_{sd} + L_m R_r i_{rq} - \omega_r L_m L_r i_{rd} + L_r v_{sq} \right] \quad (20-2)$$

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{(L_S L_r - L_m^2)} \left[ \omega_r L_m^2 i_{sq} - L_r R_S i_{sd} + \omega_r L_m L_r i_{rq} + L_m R_r i_{rd} + L_r v_{sd} \right] \quad (21-2)$$

$$\frac{di_{rq}}{dt} = \frac{1}{(L_S L_r - L_m^2)} \left[ L_m R_S i_{sq} + \omega_r L_m L_S i_{sd} - L_S R_r i_{rq} + \omega_r L_S L_r i_{rd} - L_m v_{sq} \right] \quad (22-2)$$

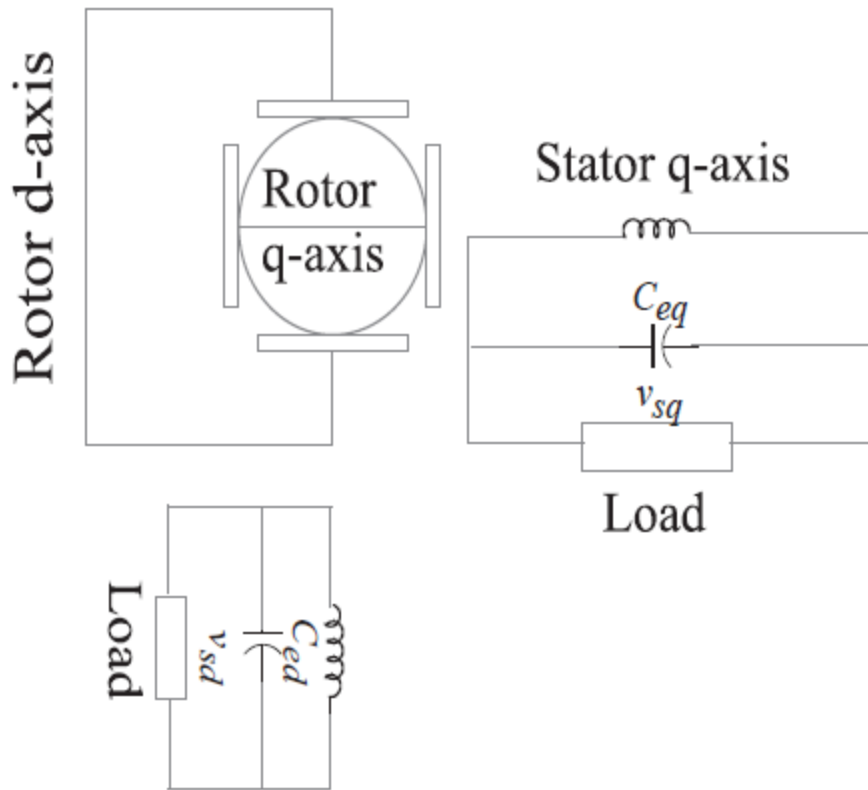
$$\frac{di_{rd}}{dt} = \frac{1}{(L_S L_r - L_m^2)} \left[ -\omega_r L_m L_S i_{sq} + L_m R_S i_{sd} - \omega_r L_S L_r i_{rq} - L_S R_r i_{rd} + L_m v_{sd} \right] \quad (23-2)$$

که در آن،

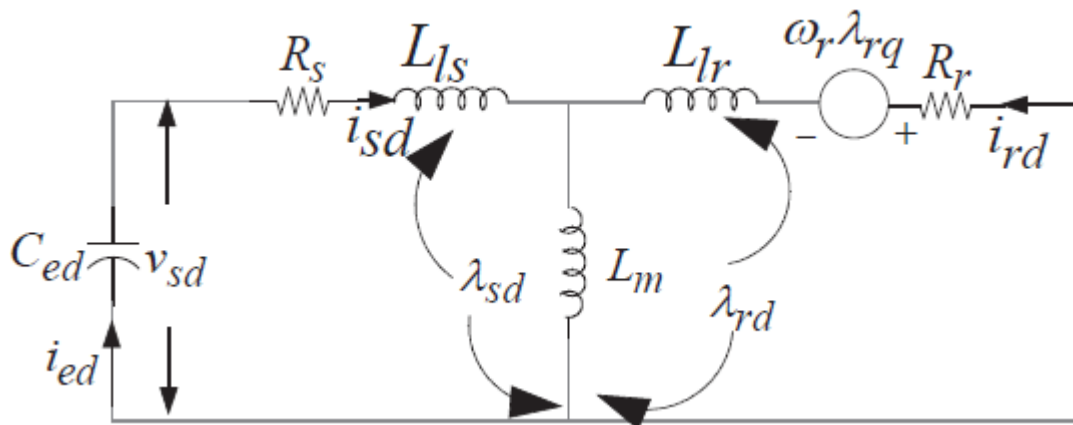
$$L_S = L_{lS} + L_m, \quad L_r = L_{lr} + L_m$$

$$\lambda_{sq} = L_S i_{sq} + L_m i_{rq}, \quad \lambda_{sd} = L_S i_{sd} + L_m i_{rd}$$

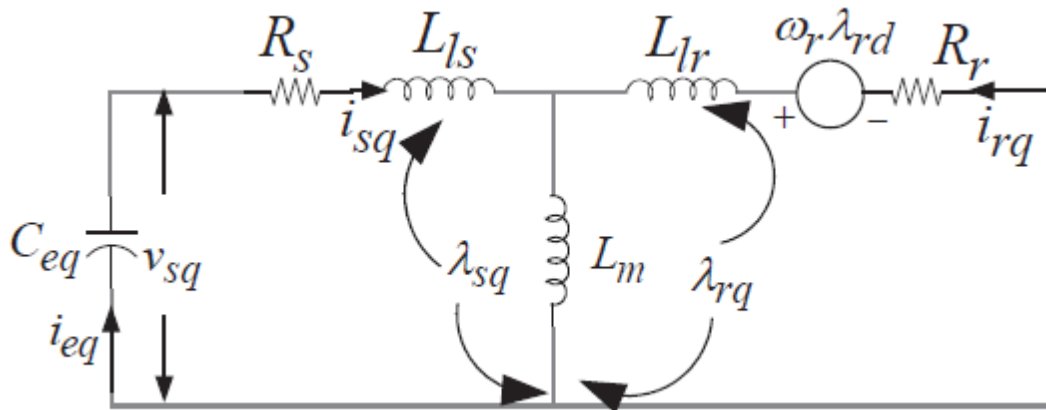
$$\lambda_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd}, \quad \lambda_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq}$$



شکل (۲-۳): طرح اتصال محوره‌های d-q ژنراتور القایی خودتحریر



شکل (۲-۴-الف): مدل دوماحوری ژنراتور القایی خودتحریر در مختصات ساکن مختصات محور d



شکل (۲-۴-الف): مدل دومحوری ژنراتورالقایی خودتحریک در مختصات ساکن مختصات محور d

که در آن، زیرنویس‌های (q) و (d) بیان‌گر محورهای (q) و (d) هستند، زیرنویس‌های (s) و (r) متغیرهای مربوط به استاتور و روتور هستند،  $I$  مربوط به مولفه‌ی نشتی،  $i_{\tau}$  مقادیر لحظه‌ای ولتاژ جریان هستند.

مشخصات مغناطیس‌کنندگی ژنراتورالقایی خودتحریک، به صورت غیرخطی است و اندوکتانس مغناطیس‌کننده‌ی هسته  $L_m$ ، مقدار ثابتی نیست و با تابعی از مقدار لحظه‌ای جریان مغناطیس‌کننده‌ی هسته مانند معادله‌ی (۲-۲۴) محاسبه می‌شود.

$$L_m = f(i_m) \quad (۲-۲۴)$$

در طول شبیه‌سازی، در هر مرحله، اندوکتانس مغناطیس‌کننده‌ی ( $L_m$ ) بر اساس ( $i_m$ ) محاسبه می‌شود. مقدار  $i_m$  از رابطه‌ی (۲-۲۵) محاسبه می‌شود [۳۶].

$$i_m = \sqrt{(i_{sd} + i_{rd})^2 + (i_{sq} + i_{rq})^2} / \sqrt{2} \quad (۲-۲۵)$$

همچنین، گشتاور الکترومغناطیسی، براساس تابعی از جریان‌های روتور و استاتور در معادله‌ی (۲-۲۶) ارائه شده است. که در آن،  $P$  تعداد قطب‌ها است و  $T_e$  گشتاور الکترومغناطیسی است.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) L_m [i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}] \quad (۲-۲۶)$$

معادله‌ی توازن گشتاور در معادله‌ی (۲-۲۷) ارائه شده است.

$$T_{shaft} = T_e + J \left( \frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_r}{dt} \quad (27-2)$$

که در آن،  $J$  ممان اینرسی ماشین القایی و  $T_{shaft}$ ، گشتاور ورودی ژنراتور القایی خودتحریک است. می‌توان معادله‌ی توازن گشتاور را به صورت رابطه‌ی (28-2) هم نوشت.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \left( \frac{P}{2J} \right) (T_{shaft} - T_e) \quad (28-2)$$

تا اینجا به برخی از روش‌های مدل‌سازی برای ژنراتور القایی اشاره شد، که در آنها معادلات غیرخطی ماشین به صورت غیرخطی حل می‌شوند. یک روش معمول برای حل این معادلات، همانطور که اشاره شد، روش حداقل مربعات غیرخطی است، که در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین، جزئیات این روش، و چگونگی حل معادلات ماشین از این طریق، در فصل سوم مورد بررسی قرار گرفته است.

۳

## فصل سوم: مدل‌سازی ژنراتور القایی خود تحریک

### ۱.۳ مقدمه

در این فصل، نحوه‌ی مدل‌سازی حالت دائمی ژنراتور القایی خود تحریک، معرفی شده است نمودارهای کاری ماشین و الزامات خودتحریکی این ماشین، با استفاده از این روش، بررسی شده است و در پایان، نتایج شبیه‌سازی مدل حالت گذرای ژنراتور القایی خودتحریک، با استفاده از مدل دوماحوری (تبدیل پارک) در نرم افزار متلب ارائه شده است و با استفاده از این مدل، پدیده‌های ساخت ولتاژ تحریک، اضافه شدن بارهای سنگین و سبک و افزایش گشتاور ورودی بررسی شده است.

### ۲.۳ مدل ژنراتور القایی خود تحریک

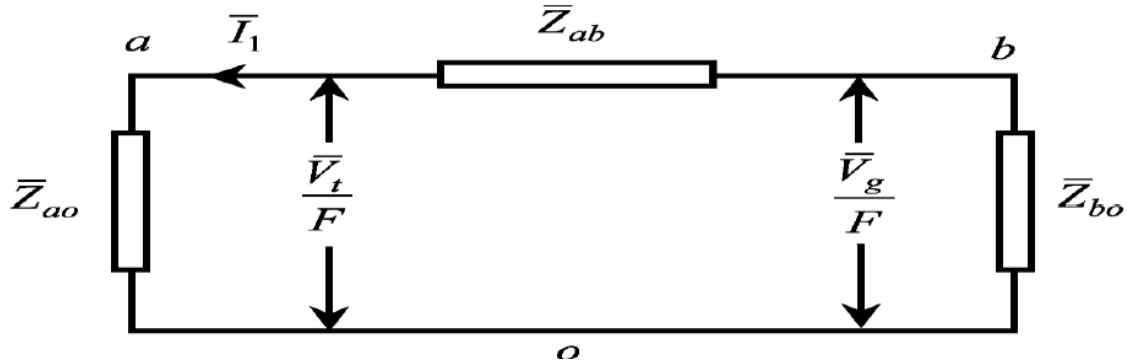
معادلات حاکم بر عملکرد ژنراتور القایی در بخش گذشته ارائه شد، که در این قسمت روش حل این معادلات با جزئیات خواهد آمد. با حل معادلات حاکم بر ژنراتور القایی می‌توان به مدلی برای شبیه‌سازی این ژنراتور، و تحلیل و پیش‌بینی عملکرد آن در شرایط مختلف کاری دست یافت.

بنابراین، ابتدا لازم است که عناصر غیرخطی موجود در معادلات را به طور جداگانه در نظر بگیریم. در ژنراتور القایی، مهم‌ترین عنصر غیرخطی موجود، هسته‌ی مغناطیسی آن است که به علت اشباع، عملکرد غیرخطی دارد. در این تحقیق فرض شده است که می‌توان از سایر عناصر غیرخطی صرف نظر کرد که فرض درستی خواهد بود. زیرا از آنجا که ماشین معمولاً در حول یک نقطه کار، عمل می‌کند، می‌توان تلفات هیستریزیس و جریان‌های گردابی را مجموعاً به صورت تلفات ثابت یا خطی در نظر گرفت، و مقدار آن نیز در مقایسه با توان کل ماشین بسیار ناچیز است.

بنابراین، تنها عنصر غیرخطی موجود در سیستم را به صورت اندوکتانس مغناطیس کننده مدل می‌کنیم، و برای آن یک رابطه‌ی غیرخطی چندجمله‌ای در نظر می‌گیریم.

$$\frac{V_g}{F} = K_1 + K_2 X_m + K_3 X_m^2 + K_4 X_m^3 \quad (1-3)$$

در این بخش، طبق روش ارائه شده در [۳۷]، معادلات حاکم بر سیستم با حضور المان غیرخطی اندوکتانس مغناطیس کننده، که با یک چندجمله‌ای از مرتبه‌ی سوم مدل شده است، حل می‌شوند.



شکل (۳-۱): تغییرات اندوکتانس مغناطیس کننده به ازای سه خازن تحریک مختلف [۳۷]

در شکل ۳-۱، روابطه امیدانس‌های موجود به صورت روابط ۳-۲ تا ۳-۴ می‌باشند.

$$\overline{Z_{ao}} = \left( \frac{1}{-\frac{jX_c}{F^2}} + \frac{1}{\frac{R_L}{F} + jX_L} \right)^{-1} \quad (۲-۳)$$

$$\overline{Z_{ab}} = \left( \frac{R_1}{F} + jX_1 \right) \quad (۳-۳)$$

$$\overline{Z_{bo}} = \left( \frac{1}{\frac{R_c}{F}} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{\frac{R_2}{(F-v)} + jX_2} \right)^{-1} \quad (۴-۳)$$

با نوشتن KVL در حلقه‌ی موجود در شکل ۳-۱، می‌توان رابطه‌ی ۳-۵ را به دست آورد.

$$\overline{I_1}(\overline{Z_{ao}} + \overline{Z_{ab}} + \overline{Z_{bo}}) = 0 \quad (۵-۳)$$

که از این رابطه، می‌توان نتیجه گرفت که رابطه‌ی ۳-۶ همواره صادق است.

$$\overline{Z_{ao}} + \overline{Z_{ab}} + \overline{Z_{bo}} = 0 \quad (۶-۳)$$



به علت مختلط بودن امپدانس‌های سیستم، رابطه‌ی ۳-۶ حاوی دو تساوی است، که با جدا کردن قسمت حقیقی و موهومی آن به دست می‌آیند.

$$\text{real}(\overline{Z_{ao}} + \overline{Z_{ab}} + \overline{Z_{bo}}) = 0 \quad (۷-۳)$$

$$\text{imag}(\overline{Z_{ao}} + \overline{Z_{ab}} + \overline{Z_{bo}}) = 0 \quad (۸-۳)$$

اکنون با در دست داشتن دو معادله‌ی غیرخطی فوق، که در آنها عنصر اندوکتانس مغناطیس‌کننده (طبق روابط ۳-۲ تا ۳-۴) وجود دارد، می‌توان با استفاده از روش‌های بسیاری عملکرد ژنراتور را به دست آورد. یکی از معروف‌ترین روش‌ها استفاده از حداقل مربعات غیرخطی است که در نرم‌افزار MATLAB با تابع fsolve نمایندگی می‌شود. در این قسمت، معادلات ماشین با استفاده از این روش، در ادامه حل شده‌اند. در ابتدا پارامترهای ماشین موجود در آزمایشگاه را از طریق آزمایش به دست می‌آوریم، و سپس معادلات فوق را با در نظر گرفتن این پارامترهای به دست آمده، حل خواهیم کرد.

### ۳.۳ محاسبه‌ی کمیت‌های مدار معادل تکفاز ماشین القایی

عموماً پارامترهای مدار معادل ماشین‌های القایی از روی سه آزمایش DC، روتور قفل شده، و بی باری به دست می‌آیند، که جزئیات آن در ادامه آمده است.

#### ۱.۳.۳ آزمایش DC

این آزمایش با اعمال ولتاژ DC به پایانه‌های استاتور، مقاومت آن را اندازه می‌گیرد. روش عملکرد این آزمایش مشابه عملکرد اهم‌متر است که در نهایت مقاومت استاتور از این طریق قابل اندازه‌گیری است.

#### ۲.۳.۳ آزمایش روتور قفل شده

در این آزمایش، روتور ماشین را قفل کرده، و سپس با اعمال ولتاژ به پایانه‌های استاتور طوری که جریان نامی از آن کشیده شود، می‌توان مقاومت روتور، و اندوکتانس‌های استاتور و روتور را محاسبه نمود. روابط مورد نیاز برای محاسبه‌ی پارامترهای ذکر شده، در رابطه‌ی ۳-۹ تا ۳-۱۳ آمده است.

$$R_{BRT} = \frac{P_{BRT}}{3I_{BRT}^2} \quad (9-3)$$

$$Z_{BRT} = \frac{V_{BRT}}{\sqrt{3}I_{BRT}} \quad (10-3)$$

$$X_{BRT} = \sqrt{Z_{BRT}^2 - R_{BRT}^2} \quad (11-3)$$

$$X_S = X_r' = \frac{X_{BRT}}{2} \quad (12-3)$$

$$R_r' = R_{BRT} - R_S \quad (13-3)$$

### ۳.۳.۳ آزمایش بی باری

همچنین از آزمایش بی باری می توان برای دستیابی به مدل تغییرات شار هسته‌ی مغناطیسی ماشین استفاده کرد. در مدار معادل ماشین القایی پارامترهای موازی مانند سلف و مقاومت مغناطیس‌کنندگی، معادل تلفات و رفتار غیرخطی هسته می باشند.

نحوه‌ی عملکرد این آزمایش به این صورت است که ماشین به صورت بی بار راه اندازی می شود و ولتاژ استاتور تا ولتاژ نامی افزایش می یابد و به ازی برخی ولتاژها نمونه برداری صورت می گیرد. روابط مورد نیاز برای محاسبه‌ی منحنی اشباع مغناطیسی هسته، در روابط ۳-۱۴ تا ۳-۲۰ آمده است.

$$S = \sqrt{3} * VI \quad (14-3)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (15-3)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (16-3)$$

$$V_g = V_1 - I_1 Z_1 \quad (17-3)$$

$$Z_1 = R_S + j X_S \quad (18-3)$$

$$X_m = \frac{3V_g^2}{(Q - 3 * I_1^2 X_1)} \quad (19-3)$$

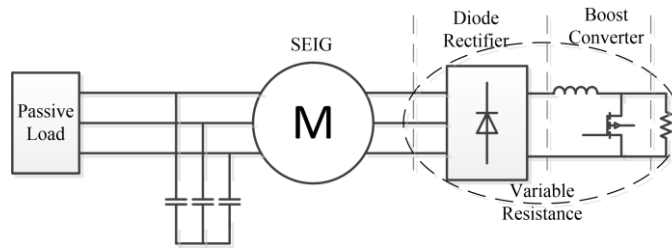
$$RC = \frac{3V_g^2}{P - 3 * I_1^2 R_1} \quad (20-3)$$

### ۴.۳ ارائه یک کنترلر برای تثبیت ولتاژ خروجی استاتور

معمولاً ژنراتورهای آسنکرون در سرعت‌ها و بارهای متفاوتی قابلیت کار کردن دارند. بنابراین لازم است برای ثابت نگه‌داشتن ولتاژ استاتور ژنراتور، که به خط سه فاز متصل می‌شود، یک استراتژی کنترلی مناسب در نظر گرفته شود. روش‌های بسیاری برای کنترل ولتاژ ژنراتور القایی خودتحریک پیشنهاد شده است که از جمله آنها می‌توان به مراجع [۱۱, ۳۸-۴۶] اشاره کرد. در این روش‌ها بر اساس مدل ماشین القایی انواع روش‌های کنترلی، از کنترل خازن تحریک [۱۱]، تا استفاده از ادوات FACTS مانند DSTATCOM [۴۲]، و با استفاده از جدول جستجو [۳۸]، یک کنترل‌کننده‌ی ولتاژ طراحی شده است، که برای موتورهای القایی قفسه‌سنجابی و روتورسیم‌پیچی شده، قابل استفاده است.

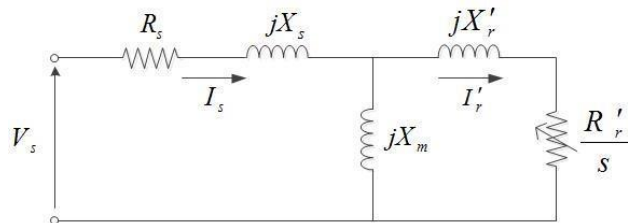
هرچند، در نوع موتورهای القایی روتورسیم‌پیچی شده، می‌توان یک مقاومت کنترل‌شونده را با سیم‌پیچ‌های روتور سری کرد، که با تغییر دادن آن مقاومت‌ها، ولتاژ استاتور را در مقدار ثابتی کنترل کرد. ایده‌ی اصلی این روش کنترلی در مقاله‌ی [۴۷] پیشنهاد شده است، و در این بخش به طور جزئی‌مورد بحث قرار گرفته است.

استراتژی کنترل ولتاژ پیشنهاد شده در شکل ۳-۲ نشان داده شده است، که در آن سیم‌پیچ‌های روتور به یک منبع ولتاژ DC کنترل شده با چاپر، از طریق یک یکسوساز سه-فاز، متصل شده است. مدل استفاده شده برای شبیه‌سازی این کنترلر ولتاژ بر اساس مدل فضای حالت خطی است که در [۹]، مورد بحث قرار گرفته است.



شکل (۳-۲): استراتژی کنترل ولتاژ SEIG با استفاده از یک مبدل بوست

مدار معادل تکفاز ماشین القایی در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. مقاومت کنترل‌شونده‌ی متصل به روتور، به سیستم یک درجه آزادی را برای کنترل ولتاژ استاتور می‌دهد.



شکل ۳-۳: مدار معادل تکفاز ماشین القایی

$$V_s = I_s \cdot Z_m = I_s \left( R_s + jX_s + \frac{\left( \frac{R'_r}{S} + jX'_r \right) (jX_m)}{\frac{R'_r}{S} + j(X'_r + X_m)} \right) \quad (۳-۲۱)$$

در استراتژی پیشنهاد شده، مقاومت روتور را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۳-۲۲) محاسبه کرد.

$$R'_{r,tot} = R'_r + R_{ext} \quad (۳-۲۲)$$

که در آن  $R_{ext}$  ولتاژ قابل‌کنترلی است که به سیم‌پیچ‌های روتور متصل شده است. در سرعت، گشتاور و بار ثابت، جریان استاتور ثابت خواهد ماند، بنابراین می‌توان ولتاژ استاتور را با استفاده از مقاومت روتور در رابطه‌ی (۳-۲۱) کنترل کرد، که در آن  $I_s$  و  $S$  ثابت هستند، و تنها پارامتر متغیر  $R'_r$  است.

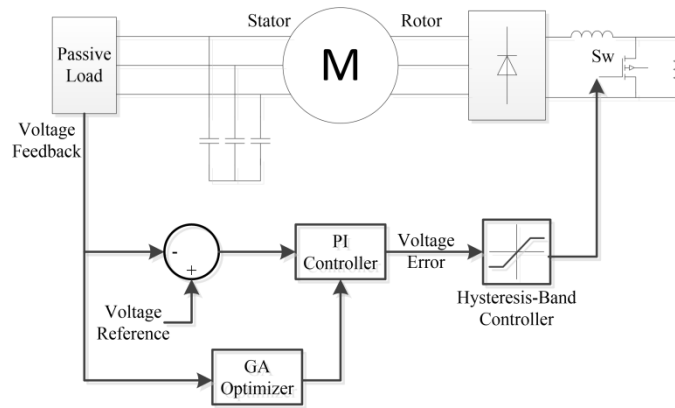
### ۱.۴.۳ طراحی کنترلر

هدف کنترلر این است که ولتاژ استاتور را در یک مقدار مرجع ثابت نگه دارد. بنابراین ولتاژ استاتور باید با استفاده از یک سنسور مناسب اندازه‌گیری شود. سپس مقدار این ولتاژ باید به عنوان فیدبک منفی به سیستم کنترلی داده شود، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است. ولتاژ استاتور با مقدار مرجع مقایسه می‌شود، و اختلاف آنها به یک کنترلر PI داده می‌شود. پالس‌های مورد نیاز گیت مبدل بوسست توسط یک کنترلر پهنای باند هیستریزس تولید می‌شوند که تابع سوئیچینگ آن به صورت رابطه (۳-۲۳) است.

$$Sw = \begin{cases} Off & e_v < -h \\ On & e_v > h \\ - & |e_v| \leq h \end{cases} \quad (۳-۲۳)$$

که در آن  $e_v$  ولتاژ خطایی است که به کنترلر باند هیستریزس داده می‌شود، و  $Sw$  حالت سوئیچینگ مبدل بوسست است،  $h$  پهنای باند هیستریزس است، و علامت (-) به معنای این است که سوئیچ حالت قبلی خود را حفظ می‌کند.

حلقه‌ی کنترلی ساده، می‌تواند شامل همین حلقه باشد که از یک مقایسه‌گر، یک کنترلر PI، و یک کنترلر پهنای باند هیستریزس تشکیل شده است. هرچند، طراحی دقیق کنترلر PI به شدت عملکرد تولید ولتاژ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. SEIG ها معمولاً طوری طراحی می‌شوند که در حالت مستقل مورد بهره‌برداری قرار گیرند، اما پارامترهای سیستم با گذشت زمان در اثر فرسودگی یا تغییرات دما و غیره تغییر می‌کنند. بنابراین، پارامترهای P و I نیز باید دوباره طراحی شوند تا عملکرد بهینه به دست آید. بنابراین، از یک کنترلر تطبیقی برای تنظیم پارامترهای P و I استفاده شده است، که در بخش بعدی مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ۳-۴: حلقه‌ی کنترلی برای استراتژی کنترل ولتاژ پیشنهادی

### ۲.۴.۳ کنترل تطبیقی

SEIG ها غالباً برای استفاده در حالت مستقل (بدون اپراتور) طراحی می‌شوند. بنابراین داشتن قابلیت تنظیم خودکار پارامترهای کنترلر، با هدف رسیدن به عملکرد بهینه برای آن حیاتی است. بنابراین، یک حلقه‌ی اضافی در طراحی کنترلر افزوده شده است، که مقادیر بهینه‌ی پارامترهای P و I را محاسبه می‌کند و به آن اعمال می‌کند، که در شکل ۳-۴، باکس بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک (GA-Optimizer) بر عهده دارد.

باکس GA-Optimizer مقدار RMS ولتاژ را دریافت می‌کند و آن را با مقدار مرجع مقایسه می‌کند. این بهینه‌ساز مقادیر مختلفی برای پارامترهای P و I به کنترلر اعمال می‌کند، و تابع هدف را به ازای هر جفت P و I محاسبه می‌کند. این تابع هدف، به صورت تابعی اسکالر از دو متغیر P و I تعریف می‌شود، که همانطور که در رابطه (۴) آمده است، RMS ریپل ولتاژ نسبت به ولتاژ مرجع است.

$$J = \langle \langle V_S \rangle - V_{ref} \rangle \quad (۳-۲۱)$$

که در آن نشان  $\langle f \rangle$  به معنای مقدار RMS برای  $f$  است. بنابراین، تابع هدف RMS اختلاف بین ولتاژ مرجع استاتور و RMS ولتاژ واقعی استاتور است؛ و هدف بهینه‌ساز GA مینیمم کردن این تابع هدف است. در نهایت، پارامترهای P و I متناظر با مینیمم تابع هدف، به عنوان ژن‌های غالب، برای عملکرد بهینه‌ی سیستم به کنترلر PI اعمال می‌شوند، و این روند در طی بهره‌برداری طولانی‌مدت سیستم به صورت زمان-واقعی تکرار می‌گردد. این به این معناست که در این حالت به ازای شرایط کاری

مختلف سیستم، کنترلر تا حد امکان ولتاژ مرجع را با کمترین ریپل دنبال می‌کند. این امر حتی برای تغییر پارامترهای سیستم (مثل امپدانس‌های ژنراتور، بار، مبدل و یکسوساز)، در اثر فرسودگی یا تغییرات دما، صدق می‌کند.

جزئیات طراحی چنین کنترلی در مقاله‌ی [۴۸] بررسی شده است، که در آن از یک کنترلر PI خود-تنظیم برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC یک جبران‌ساز کیفیت توان استفاده شده است. در اینجا پارامترهای P و I به عنوان کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده‌اند، و این الگوریتم معمولاً پس از گذشت ۴ الی ۸ نسل، به مقدار مینیمم تابع هدفش دست پیدا می‌کند. جزئیات عملکرد الگوریتم ژنتیک به اختصار در قسمت بعد توضیح داده شده است.

به علاوه، با داشتن این کنترلر تطبیقی بر اساس هوش مصنوعی، سیستم پارامترهای P و I را به طور خودکار انتخاب می‌کند، بنابراین نیازی به انتخاب این پارامترها بر اساس مدل خطی سیستم نیست، که حول نقطه کارهای بسیاری طراحی شده باشد، همانطور که در مقاله‌ی [۴۷] این طراحی بر اساس مدل خطی شده‌ی سیستم انجام گرفته است.

### ۵.۳ نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه سازی هوشمند است که برای رسیدن به پاسخ بهینه در یک تابع، از الگوی تکامل ژنتیکی در طبیعت پیروی می‌کند. ایده‌ی اولیه‌ی این روش بر اساس نظریه‌ی تکامل داروین شکل گرفته است و کارکرد آن بر اساس ژنتیک طبیعی استوار می‌باشد. ایده‌ی محاسبات تکاملی اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط رچنبرگ Rechenberg که در زمینه استراتژیهای تکاملی تحقیق می‌کرد بوجود آمد که نظریه او بعدها توسط دیگر محققان توسعه داده شد. اصول اولیه الگوریتم ژنتیک توسط هلند Holland و همکارانش در دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۶۲ ارائه شد [۴۹].

در طبیعت ژن‌های مختلف به صورت‌های مختلفی از نسلی به نسل بعد بازتولید می‌شوند. هر کروموزوم که از چندین ژن تشکیل شده است، بسته به میزان سازگاری اش با محیط طبیعی اطراف، شانس بیشتری برای بازتولید در نسل‌های بعدی را دارد. هر چند همواره عملگرهای متفاوتی در بازتولید کروموزوم‌ها در نسل‌های بعد تأثیر دارد و به طور کلی می‌توان گفت که کروموزوم‌های هر نسل تا

حدود زیادی بر اساس کروموزوم‌های موفق در نسل‌های قبل و یا به طور تصادفی در نسل جدید بازتولید می‌شوند. برای توضیح بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، باید اصطلاحات موجود در آن را تعریف کنیم.

ژن: به کوچکترین واحد در محاسبات الگوریتم ژنتیک ژن گفته می‌شود. برای مثال در مورد اعداد باینری، هر بیت نماینده‌ی یک ژن است که می‌تواند صفر یا یک باشد.

کروموزوم: رشته یا دنباله‌ای از بیتها که به عنوان شکل کد شده یک جواب ممکن (مناسب یا نامناسب) از مساله مورد نظر می‌باشد، را کروموزوم می‌گویند. در حقیقت بیتهای یک کروموزوم، نقش ژنها را در طبیعت بازی می‌کنند. هر بیت، متغیری گسسته است که از یک مجموعه عضوی  $Q$  انتخاب می‌شود. چنانچه از کدگذاری باینری استفاده شود، هر بیت یکی از دو مقدار ۰ یا ۱ را می‌پذیرد و  $Q$  برابر ۲ است. مثلاً در طراحی یک PI-Controller، اگر یک پاسخ احتمالی سیستم  $2/0$  و  $1/0$  باشد، تبدیل شده‌ی این اعداد به کد باینری یک کروموزوم است که هر بیت آن یک ژن می‌باشد.

جمعیت: مجموعه‌ای از کروموزومها را جمعیت گویند. یکی از ویژگیهای ژنتیک این است که به جای تمرکز بر روی یک نقطه از فضای جستجو یا یک کروموزوم، بر روی جمعیتی از کروموزومها کار می‌کند. بدین ترتیب در هر مرحله، الگوریتم دارای جمعیتی از کروموزومها بوده که خواص مورد نظر را بیشتر از جمعیت مرحله قبل دارا می‌باشد. هر جمعیت یا یک نسل از کروموزومها، دارای یک اندازه می‌باشد که به اندازه جمعیت  $Population Size$  معروف است.

مطلوبیت: مناسب بودن یا نبودن جواب، با معیاری که از تابع هدف بدست می‌آید، سنجیده می‌شود. هر چه که یک جواب مناسب تر باشد، مقدار برازندگی بزرگتری دارد. برای آنکه شانس بقای چنین جوابی بیشتر شود، احتمال بقای آن، متناسب با مقدار برازندگی آن در نظر گرفته می‌شود. بنابراین کروموزومی که برازنده‌ترین است با احتمال بیشتری در تولید فرزندان شرکت می‌کند و دنباله‌های بیشتری از آن به وجود می‌آید.



### ۱.۵.۳ عملگرهای باز تولید نسل‌ها:

جفت‌گیری: این عملگر بر روی یک جفت از کروموزوم‌ها عمل می‌کند و می‌تواند به صورت تک نقطه ای، چند نقطه ای و یکنواخت باشد.

عملگر تقاطعی تک نقطه ای، دو کروموزوم را به طور تصادفی از یک نقطه شکسته و بخش‌های شکسته دو کروموزوم را جابجا می‌کند. بدین ترتیب دو کروموزوم جدید بدست می‌آید. به کروموزوم‌های اولیه، کروموزوم‌های "والد" و به کروموزوم‌های حاصل شده از عمل جابجایی و عمل جهش، کروموزوم "فرزند" می‌گویند.

$$11001011 + 11011111 = 11001111$$



شکل ۳-۵ جفت‌گیری تقاطعی تک نقطه ای

تفاوت عملگر چندنقطه ای در مقایسه با عملگر تقاطعی تک نقطه ای در این است که نقطه شکست دو کروموزوم، بیش از یکی است و تقاطع در بخش‌های شکسته شده دو کروموزوم به صورت یک در میان انجام می‌گیرد. شکل زیر مثالی از عمل تقاطع دو نقطه ای را نشان می‌دهند.

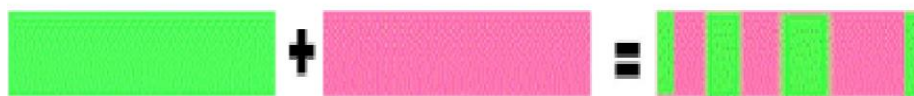
$$11011111 = 11011111 + 11001011$$



شکل ۳-۶ جفت‌گیری تقاطعی دو نقطه ای

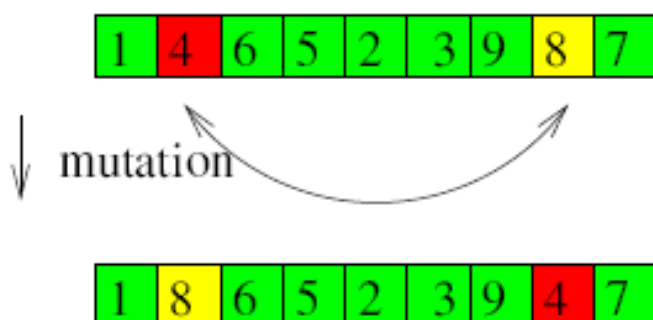
در عمل تقاطعی یکنواخت، بیتها به صورت تصادفی از والد ۱ یا والد ۲ کپی می‌شوند.

$$11011111 = 11011101 + 11001011$$



شکل ۳-۷ جفت‌گیری تقاطعی یکنواخت

جهش ژنتیکی: این عملگر روی هر یک از کروموزوم‌های حاصل از عملگر تقاطعی عمل می‌کند. بدین ترتیب که به ازای هر بیت از کروموزوم، یک عدد تصادفی تولید می‌گردد. اگر مقدار این عدد تصادفی از مقدار  $P_m$  (احتمال انجام جهش) کمتر باشد، در آن بیت عمل جهش انجام می‌شود و در غیر این صورت، در آن بیت عمل جهش انجام نمی‌گیرد. عمل جهش در هر بیت با تولید تصادفی عدد ۰ یا ۱ و جایگزینی آن بجای بیت مورد جهش انجام می‌گیرد.



شکل ۳-۸ عملگر جهش ژنتیکی

از عملگرهای دیگر در بازتولید کروموزوم‌ها در نسل‌های جدید می‌توان به عملگرهای زیر اشاره کرد:

عمل معکوس کردن (Inversion)

عمل حذف کردن (Deletion)

عمل جداسازی (Segregation)

عمل نقل مکان (Migration)

عمل بخش بندی (Sharing)

عمل غالب شدن یا تسلط (Dominance)

عمل کپی کردن (Duplication)

مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک را نیز می‌توان به صورت الگوریتم زیر توصیف کرد:

۱. انتخاب جمعیت اولیه و محاسبه تابع مطلوبیت
۲. انتخاب کروموزوم‌هایی برای ایجاد فرزندان
۳. عمل تقاطع
۴. عمل جهش
۵. ارزیابی فرزندان با محاسبه مطلوبیت هر کروموزوم
۶. جایگزین کردن کروموزوم‌های شایسته‌تر (انتخاب جمعیت جدید)
۷. آیا جوابها مناسب هستند.
- بلی: برو به مرحله ۸
- خیر: برو به مرحله ۲
۸. پایان

در این میان، طراحی الگوریتم بهینه‌سازی مناسب با هر تابع هدف، باید بر اساس مشخصات آن تابع انجام شود. برای مثال در تابع هدفی که در این تحقیق تعریف شده است، مینیمم‌های محلی بسیاری وجود دارند که برای فرار از گیر افتادن در این مینیمم‌های محلی، احتمال عملگر جهش ژنتیکی، ۰,۲ در نظر گرفته شده است که در مقایسه با احتمال جهش ژنتیکی در طبیعت احتمال بسیار بالایی است. اما با این حال، در مورد بهینه‌سازی مورد نظر در این تحقیق رسیدن به پاسخ مینیمم کلی تابع را تضمین می‌کند.

۴

## فصل چهارم: بررسی عملکرد و کنترل ولتاژ ماشین القایی خود-تحریک

## ۱.۴ مقدمه

اکنون با داشتن مدل دقیق برای حل معادلات ماشین، می‌توانیم در حالت‌های مختلفی عملکرد ژنراتور را مورد بررسی و آزمایش قرار دهیم، و روش کنترلی ارائه شده را برای تثبیت ولتاژ استاتور، پس از طراحی بهینه، در شرایط کاری مختلف، مانند تغییرات سرعت ژنراتور، تغییرات بار و غیره، مورد بررسی قرار می‌دهیم. بنابراین، در ابتدا پارامترهای ماشین را طبق روابط آزمایش‌های DC، بی‌باری و روتور قفل شده که در فصل سوم بررسی شد، به دست می‌آوریم.

## ۲.۴ محاسبه کمیتهای مدار معادل تکفاز ماشین القایی

عموماً پارامترهای مدار معادل ماشین‌های القایی از روی سه آزمایش DC، روتور قفل شده، و بی‌باری به دست می‌آیند، که جزئیات آن در ادامه آمده است.

### ۱.۲.۴ آزمایش DC

همانطور که اشاره شد، این آزمایش با اعمال ولتاژ DC به پایانه‌های استاتور، مقاومت آن را اندازه می‌گیرد که در نهایت مقاومت استاتور از این طریق قابل اندازه‌گیری است. در مورد ماشین القایی مورد مطالعه در این پایان‌نامه، مقدار این مقاومت برابر  $0.87 \Omega$  اهم، در هر فاز استاتور است.

جدول ۱=۴ پارامترهای مدار معادل به دست آمده از آزمایش روتور قفل شده

مقدار	مشخصه سیستم
$0.87 \Omega$	مقاومت استاتور
2.19 H	اندوکتانس استاتور
$0.43 \Omega$	مقاومت روتور منتقل شده
2.19 H	اندوکتانس روتور منتقل شده

### ۲.۲.۴ آزمایش روتور قفل شده

طبق روابط داده شده در ۳-۹ تا ۳-۱۳، که در فصل قبل به آنها اشاره شد، پارامترهای سری ماشین، مانند مقاومت‌ها و اندوکتانس‌های روتور و استاتور، قابل محاسبه است. با استفاده از روابط داده شده (۳-۹ تا ۳-۱۳)، این پارامترها به صورت جدول ۴-۱ به دست می‌آیند.

### ۳.۲.۴ آزمایش بی باری

همانطور که در فصل قبل گفته شد، نحوه‌ی عملکرد این آزمایش به این صورت است که ماشین به صورت بی بار راه‌اندازی می‌شود و ولتاژ استاتور تا ولتاژ نامی افزایش می‌یابد و به ازای برخی ولتاژها نمونه برداری صورت می‌گیرد. نتایج این آزمایش در جدول ۴-۲ آمده است. روابط مورد نیاز برای محاسبه‌ی منحنی اشباع مغناطیسی هسته، در روابط ۳-۱۴ تا ۳-۲۰ آمده است.

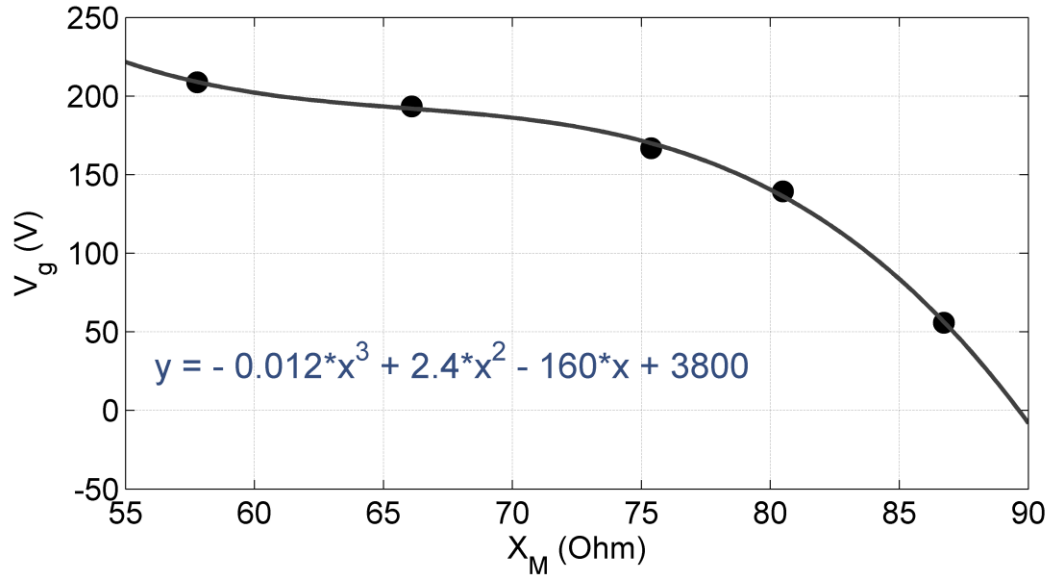
جدول ۴=۲ پارامترهای مدار معادل به دست آمده از آزمایش روتور قفل شده

ولتاژ استاتور (V)	جریان استاتور (A)	توان اکتیو (W)	توان ظاهری (VA)	ضریب توان (درجه)
۱۰۰	۰/۸۷	۱۰۰	۱۵۰/۶۹	۴۸/۴۲
۲۵۰	۲/۲	۵۸۰	۹۵۲/۶۳	۵۲/۴۹
۳۰۰	۲/۸۵	۹۲۰	۱۴۸۰/۹	۵۱/۵۹
۳۵۰	۳/۸۵	۱۴۹۰	۲۳۳۳/۹۴	۵۰/۳۳
۳۸۰	۴/۷۶	۲۰۰۰	۳۱۳۲/۹۳	۵۰/۳۳

برای تقریب رفتار اشباع در هسته‌ی ماشین از روش‌های درونیابی استفاده می‌شود، و می‌توان آن را با چندجمله‌ای‌هایی از مرتبه‌های ۱ (خطی)، دو و سه، تقریب زد. بسته به مرتبه‌ی تقریب، دقت مدل نیز افزایش خواهد یافت.

برای تقریب معادله‌ی ۳-۱، و یافتن رفتار غیرخطی اندوکتانس مغناطیس کننده از روی اطلاعات آزمایش بی‌باری جدول ۴-۲، باید از روش‌های درونیابی استفاده کرد که بر این اساس، ضرایب رابطه‌ی ۳-۱ به صورت رابطه‌ی ۴-۱ به دست خواهد آمد. این درونیابی بر اساس نقاط داده شده در جدول ۳-۲ انجام شده است که نمودار آن در شکل ۴-۱ رسم شده است.

$$\frac{V_g}{F} = 0.012x_M^3 + 2.4x_M^2 - 160x_M + 3800 \quad (1-4)$$

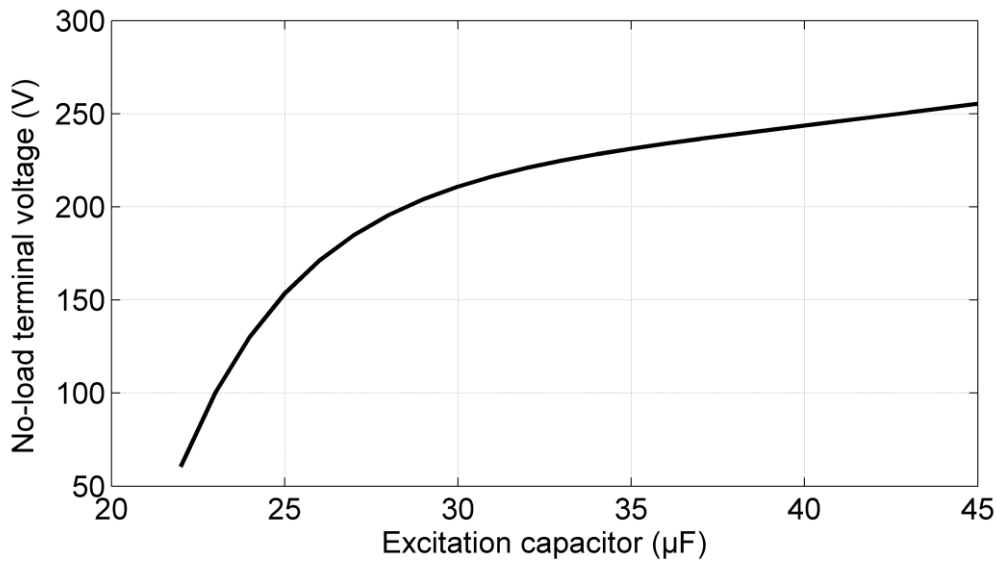


شکل (۱-۴): تقریب اندوکتانس مغناطیس کننده با چندجمله‌ای مرتبه سوم

حال با داشتن سه معادله‌ی ۳-۷، ۳-۸ و ۴-۱، می‌توان روابط ولتاژ و جریان ماشین را به ازای مقادیر مختلف پارامترهای سیستم و در شرایط مختلف کاری به دست آورد.

### ۳.۴ محاسبه‌ی نمودارها برای سیستم مورد مطالعه

اکنون طبق روش بررسی شده در مقاله‌ی [۲۵]، نمودارهای مورد نظر برای سیستم مورد مطالعه در این پایان‌نامه در این بخش رسم شده‌اند. ابتدا در حالت بی‌باری تغییرات ولتاژ ترمینال استاتور به ازای تغییرات خازن تحریک و در سرعت نامی در شکل ۴-۲ رسم شده است.



شکل (۴-۲): تغییرات ولتاژ ترمینال استاتور به ازای تغییرات خازن تحریک در حالت بی‌باری

همانطور که در شکل ۴-۲ دیده می‌شود، با افزایش خازن تحریک ولتاژ استاتور افزایش می‌یابد، و برای رسیدن به ولتاژ نامی در بی‌باری باید خازن تحریک در حدود ۳۲ میکروفاراد تنظیم شود.

#### ۴.۴ تحلیل عملکرد ژنراتور در تغییرات بار

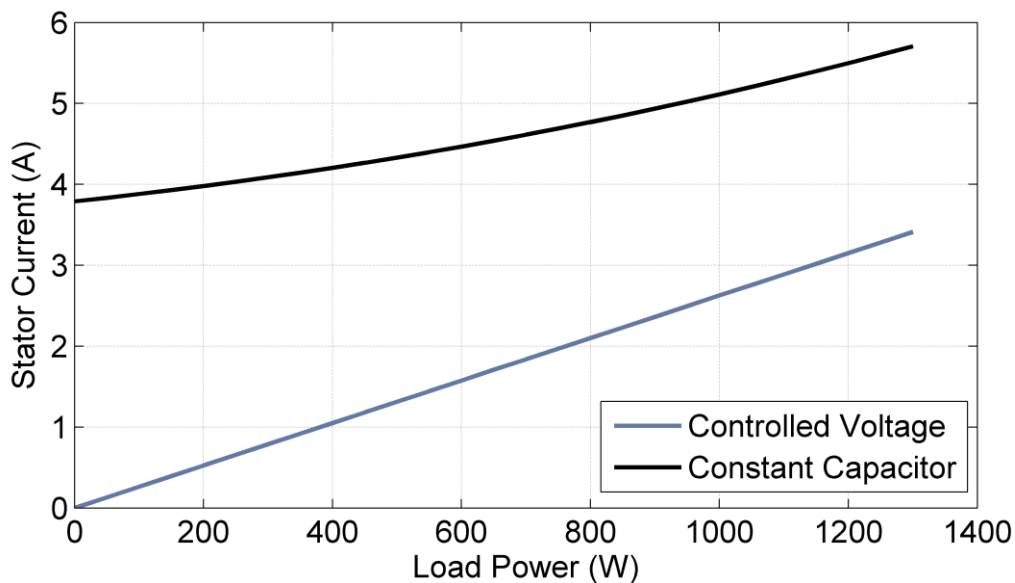
در حالت اعمال بار به ژنراتور دو حالت برای کنترل شبکه قابل تصور است، یعنی می‌توان ولتاژ شبکه را در مقدار نامی کنترل کرد، و همچنین، می‌توان جریان شبکه را در مقدار نامی کنترل کرد. با تغییرات بار، در صورت ثابت بودن المان‌های سیستم، افت ولتاژ و در نتیجه افت جریان خواهیم داشت. هرچند می‌توان با اعمال تغییراتی در خازن تحریک، ولتاژ و جریان شبکه را کنترل کرد.

با افزایش بار، برای ثابت نگه‌داشتن ولتاژ شبکه، می‌توان خازن تحریک را با استفاده از عناصری مانند جبران‌ساز استاتیکی وار (SVC) و یا خازن کنترل شده با تریستور (TSC) کنترل کرد [۲۸]. بنابراین، عملکرد ژنراتور در دو حالت ولتاژ ثابت و جریان ثابت بررسی می‌شود.



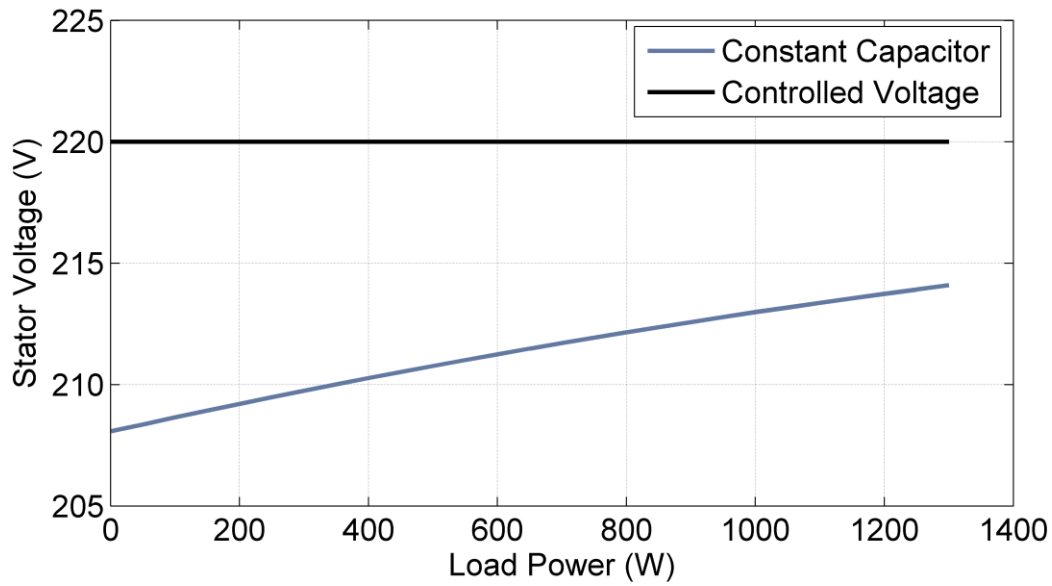
### ۱.۴.۴ عملکرد ژنراتور در ولتاژ ثابت

عموماً هدف از کنترل ژنراتور ثابت نگه داشتن ولتاژ شبکه است، زیرا بارهای متصل به آن عموماً طوری طراحی شده‌اند که در ولتاژ ثابت کار کنند. بنابراین، می‌توان با کنترل خازن تحریک ولتاژ شبکه را در مقدار نامی کنترل کرد. در این بخش به ازای تغییرات بار شکل موج‌های جریان، ولتاژ و فرکانس خط، و همینطور تغییرات خازن تحریک برای داشتن ولتاژ ثابت، در شکل ۳-۴ تا ۶-۴ رسم شده است. در شکل ۴-۳، تغییرات جریان خط را به ازای تغییرات توان خروجی می‌توان مشاهده کرد.



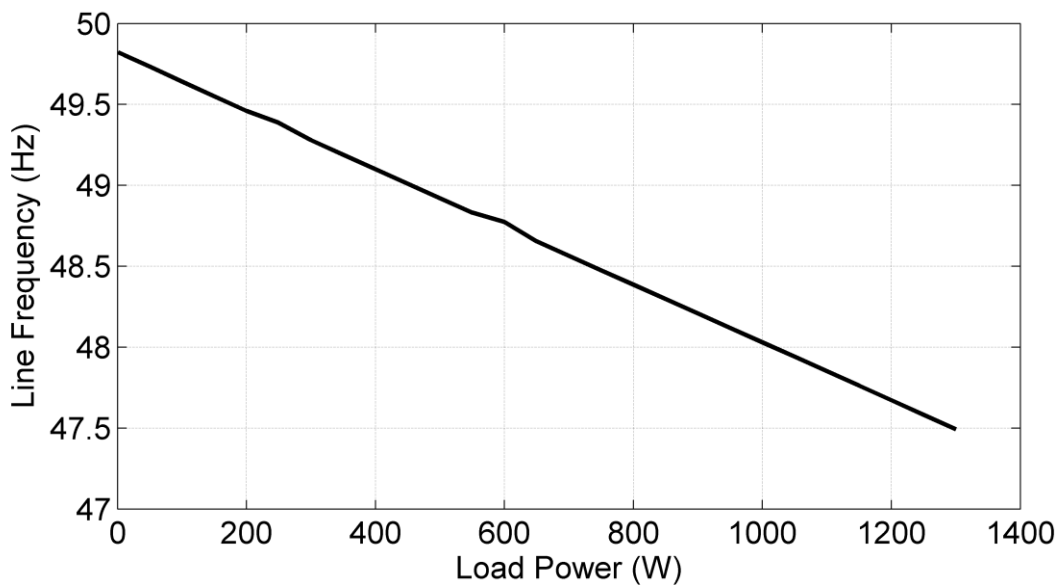
شکل (۳-۴): تغییرات جریان خط به ازای تغییرات توان بار

در شکل ۳-۴، نمودار پایینی جریان حالتی را نشان می‌دهد که در آن ولتاژ استاتور در مقدار نامی به طور ثابت از بی‌باری تا بار کامل ثابت نگه داشته می‌شود، و نمودار بالایی مربوط به حالتی است که با ثابت ماندن خازن تحریک، بار ژنراتور افزایش پیدا می‌کند. تغییرات ولتاژ خط به ازای افزایش بار، در دو حالت خازن کنترل شده و خازن ثابت، در شکل ۳-۴ رسم شده است.



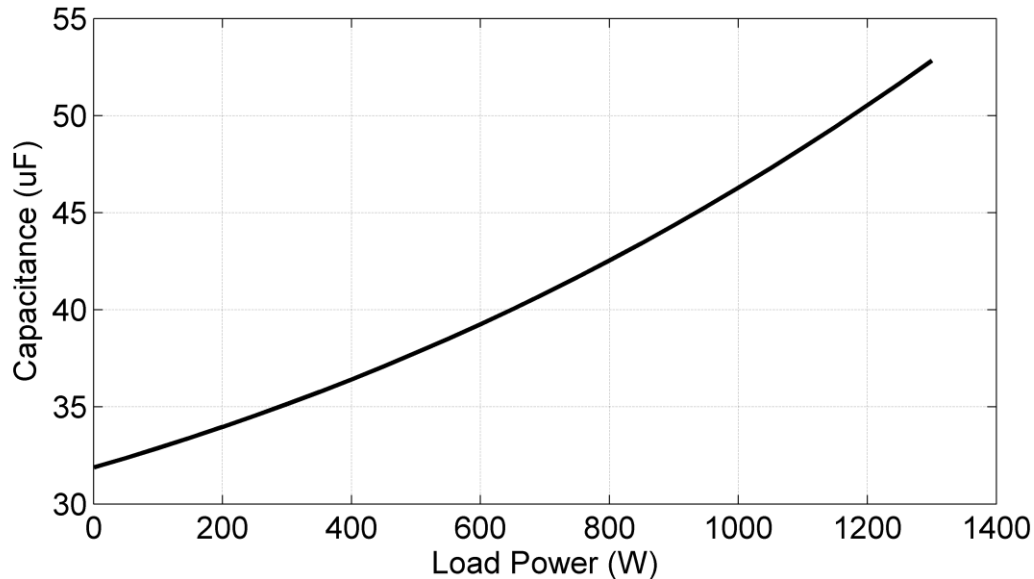
شکل (۴-۴): تغییرات ولتاژ خط به ازای تغییرات توان بار

در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود که با تغییر خازن تحریک می‌توان ولتاژ خط را ثابت نگه داشت، که نمودار بالایی نماینده‌ی این حالت است. همچنین، تغییرات فرکانس شبکه به ازای افزایش بار در شکل ۴-۵ رسم شده است، که در آن مشاهده می‌شود که با افزایش بار، فرکانس شبکه تا حدود زیادی افت پیدا می‌کند.



شکل (۴-۵): تغییرات فرکانس خط به ازای تغییرات توان بار

همانطور که اشاره شد، با افزایش بار، برای ثابت نگه داشتن ولتاژ شبکه، می توان خازن تحریک را کنترل کرد. بنابراین، با فرض ثابت ماندن ولتاژ شبکه، مقدار خازن تحریک مورد نیاز در بارهای مختلف در شکل ۶-۴ رسم شده است.

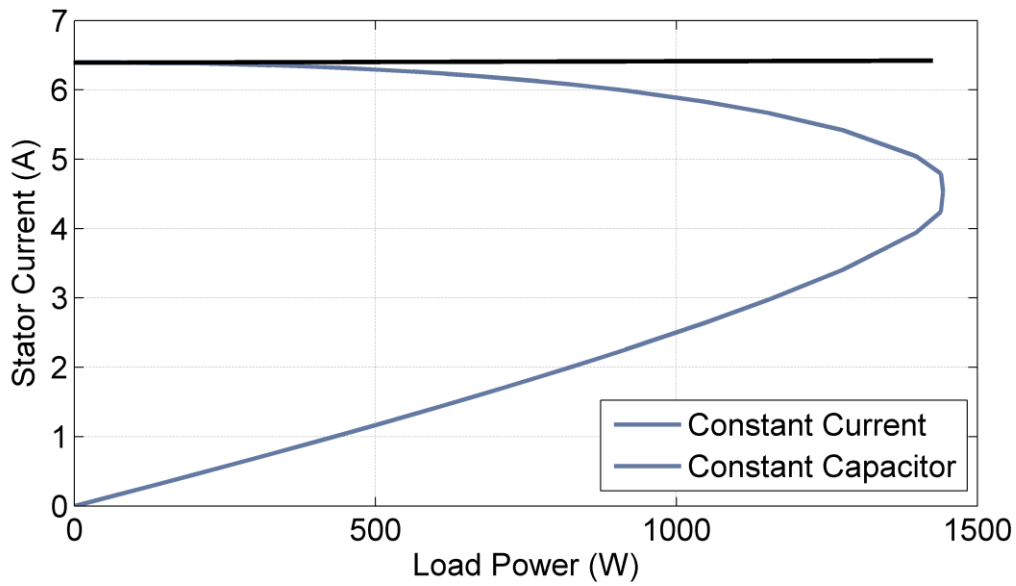


شکل (۶-۴): تغییرات خازن تحریک برای ثابت ماندن ولتاژ خط به ازای تغییرات توان بار

شکل ۶-۴ نشان می دهد که به ازای بارهای مختلف خازن تحریک باید در چه مقداری تنظیم شود تا ولتاژ خروجی استاتور در ولتاژ نامی باقی بماند. همانطور که از روی نمودار بی باری در شکل ۴-۱ به دست آمد، در حالت بی باری خازن مورد نیاز برای رسیدن به ولتاژ ۲۲۰ ولت، برابر ۳۲ میکروفاراد است.

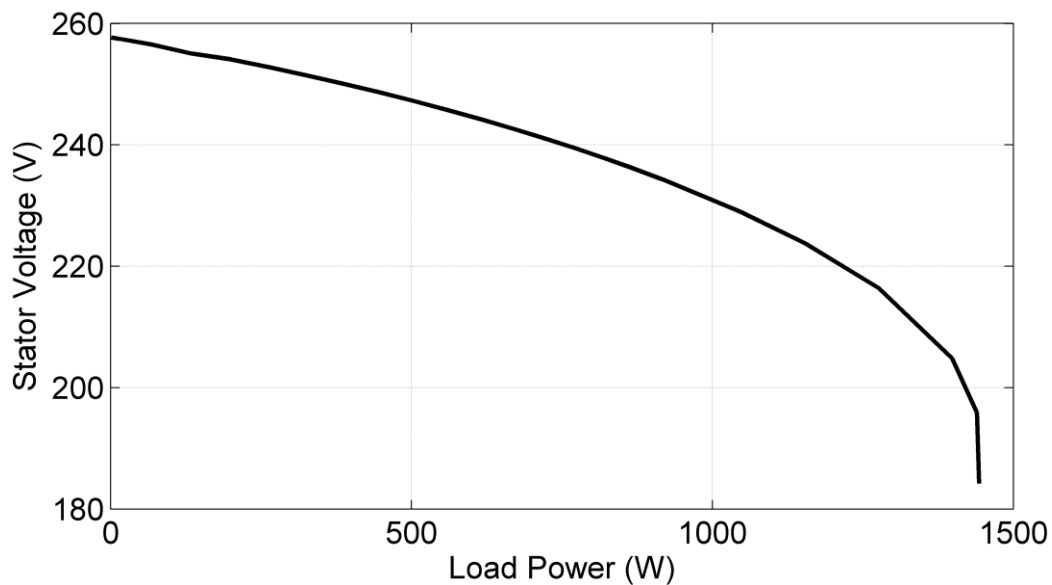
#### ۱.۴.۴ عملکرد ژنراتور در جریان ثابت

همچنین می توان جریان خروجی استاتور را با استفاده از کنترل خازن تحریک در مقدار مشخصی تنظیم کرد. در این بخش به ازای تغییرات بار شکل موج های جریان، ولتاژ و فرکانس خط، و همینطور تغییرات خازن تحریک برای داشتن جریان ثابت، در شکل ۴-۷ تا ۴-۱۰ رسم شده است. در شکل ۴-۷، تغییرات جریان خط را به ازای تغییرات توان خروجی می توان مشاهده کرد.



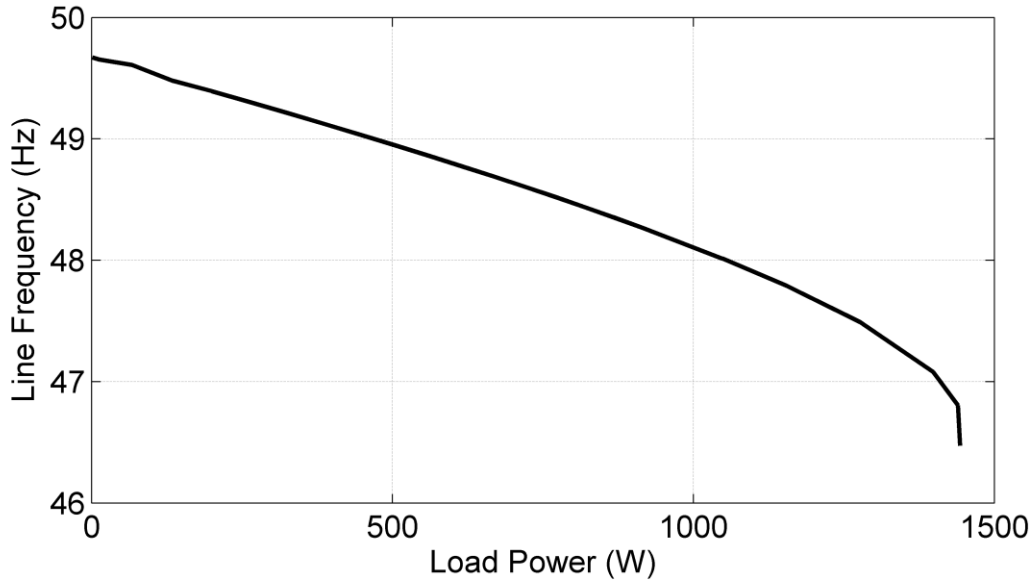
شکل (۷-۴): تغییرات جریان خط به ازای تغییرات توان بار

در شکل ۷-۴ مشاهده می‌شود که جریان استاتور می‌تواند با تغییر خازن تحریک در مقدار ثابتی کنترل شود که نمودار بالایی نماینده‌ی آن است، و با ثابت ماندن خازن تحریک، جریان و ولتاژ شبکه با افزایش بار کاهش پیدا می‌کنند، و با عبور از ۱۴۰۰ وات، دیگر ژنراتور قابلیت ساختن ولتاژ را ندارد و ناپایدار می‌شود. تغییرات ولتاژ خط به ازای افزایش بار نیز در شکل ۸-۴ رسم شده است.



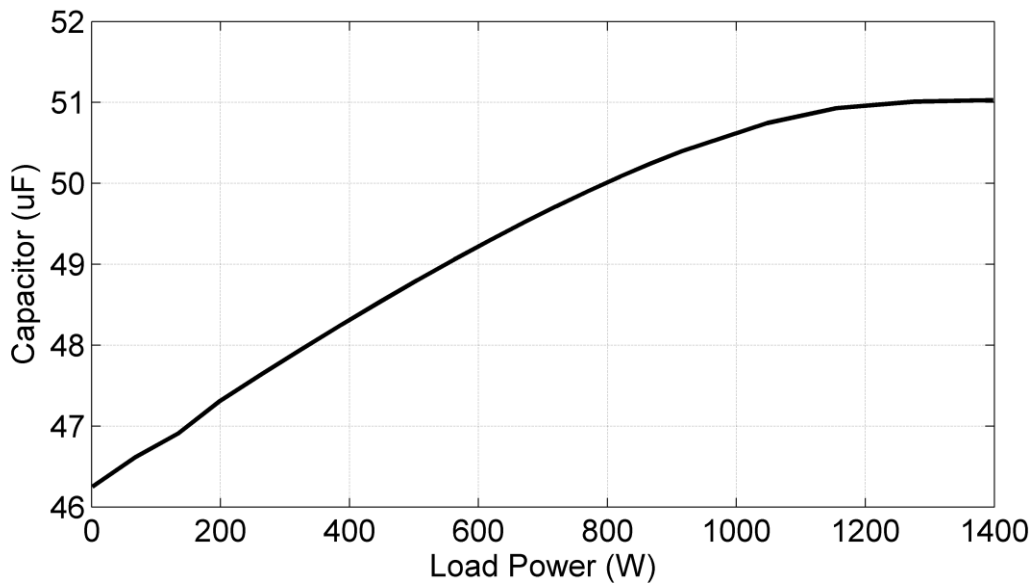
شکل (۸-۴): تغییرات ولتاژ خط به ازای تغییرات توان بار

همچنین، تغییرات فرکانس شبکه به ازای افزایش بار در شکل ۹-۴ رسم شده است، که در آن مشاهده می‌شود که با افزایش بار، فرکانس شبکه تا حدود زیادی افت پیدا می‌کند.



شکل (۹-۴): تغییرات فرکانس خط به ازای تغییرات توان بار

همانطور که اشاره شد، هدف از این بخش ثابت ماندن جریان خروجی استاتور است، بنابراین، خازن مورد نیاز برای این هدف در بارهای مختلف در شکل ۱۰-۴ رسم شده است.



شکل (۱۰-۴): تغییرات خازن تحریک برای ثابت ماندن ولتاژ خط به ازای تغییرات توان بار

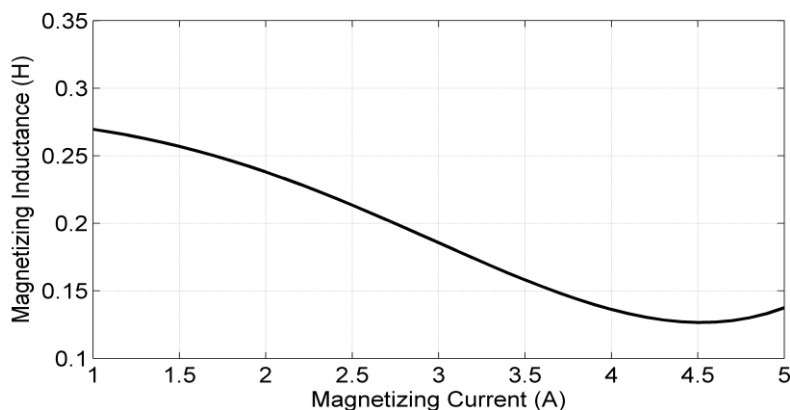
## ۵.۴ بررسی عملکرد ژنراتور در حالت گذرا

حالات گذرای ژنراتور در راه‌اندازی، برای رسیدن به طراحی مناسب و محدوده‌ی عملکرد منطقی برای ژنراتور حائز اهمیت است. بنابراین، در این قسمت فرایند ساخت ولتاژ در یک ژنراتور در حالت گذرا مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که اشاره شد، شبیه‌سازی پدیده‌های گذرا در ژنراتور القایی خودتحریک، مستلزم استفاده از مدل دو محوری (تبدیل پارک) ژنراتور القایی خودتحریک است. در ابتدا ژنراتوری را با مشخصات داده شده در جدول ۳-۴ در نظر می‌گیریم، که در آن پارامترها به صورت منتقل شده به سمت استاتور آمده است.

جدول ۳-۴ مشخصات ژنراتور

مقدار	مشخصه‌ی سیستم
1495 rpm	سرعت نامی
380 V	ولتاژ نامی
12 A	جریان نامی استاتور
0.87 $\Omega$	مقاومت استاتور
7 mH	اندوکتانس استاتور
0.43 $\Omega$	مقاومت روتور
7 mH	اندوکتانس روتور
0.437 kg.m <sup>2</sup>	ممان اینرسی ماشین

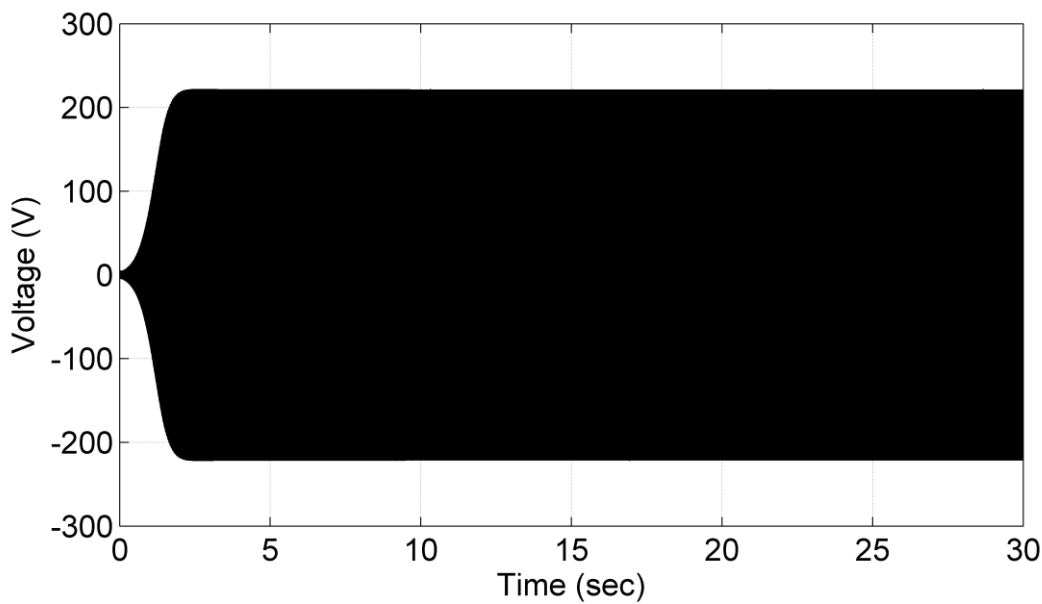
به علاوه، منحنی اشباع ژنراتور نیز به صورت شکل ۴-۱۱ در نظر گرفته شده است، که در آن از یک معادله‌ی درجه سوم برای مدل‌سازی رفتار اشباع مغناطیسی هسته‌ی روتور استفاده شده است.



شکل ۴-۱۱: منحنی اشباع مغناطیسی هسته‌ی ژنراتور

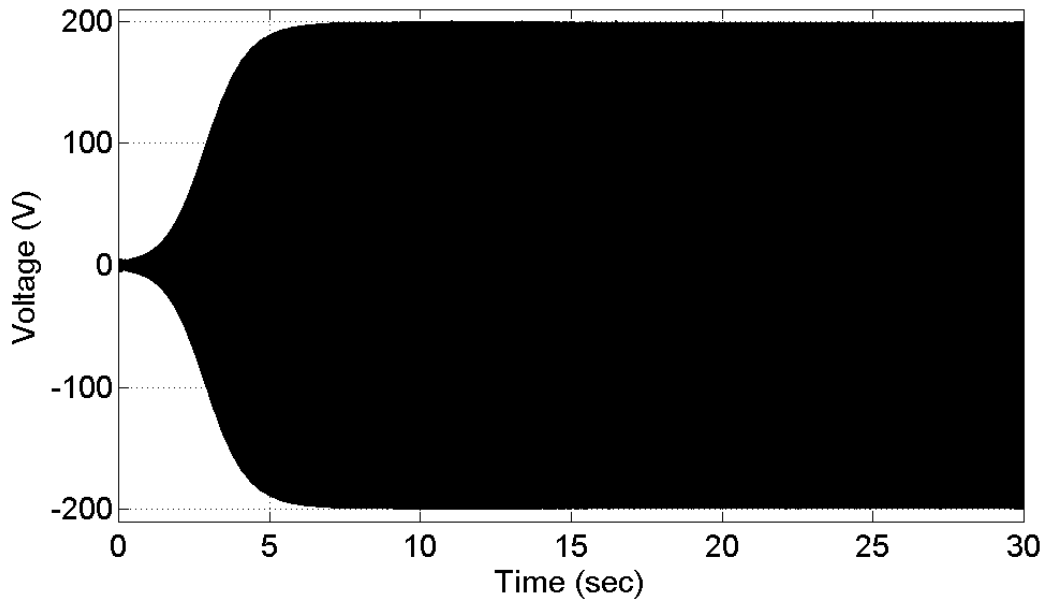
ژنراتوری با مشخصات داده شده در جدول ۳-۴ و منحنی مغناطیس‌کنندگی شکل ۴-۱۱، در حالت بی‌باری با خازن ولتاژ سازی به اندازه‌ی ۵۰ میکروفاراد راه‌اندازی می‌شود که منحنی ولتاژ آن در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود.

در شکل ۴-۱۲، ساخت ولتاژ تحریک در حالت بی‌باری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از مدت کوتاهی از شروع شبیه‌سازی، ولتاژ به مقدار ثابت و پایدار رسیده است و خودتحریکی، اتفاق افتاده است.

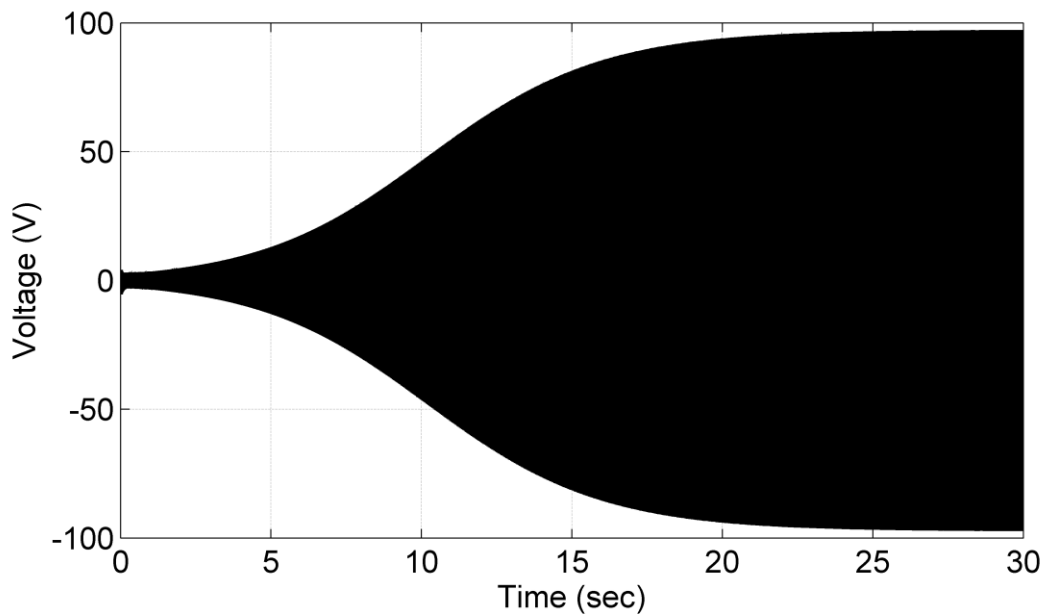


شکل ۴-۱۲: ولتاژ تحریک ژنراتور القایی خودتحریک در حالت بی‌باری با خازن ۹۰ میکروفاراد

با تغییر خازن تحریک ولتاژ خروجی به شدت تحت تأثیر قرار خواهد گرفت، که در اینجا، به ازای تغییر این خازن ولتاژ خروجی بار دیگر، در شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴ رسم شده است.



شکل ۴-۱۳: ولتاژ تحریک ژنراتور القایی خودتحریک در حالت بی‌باری با خازن ۵۰ میکروفاراد

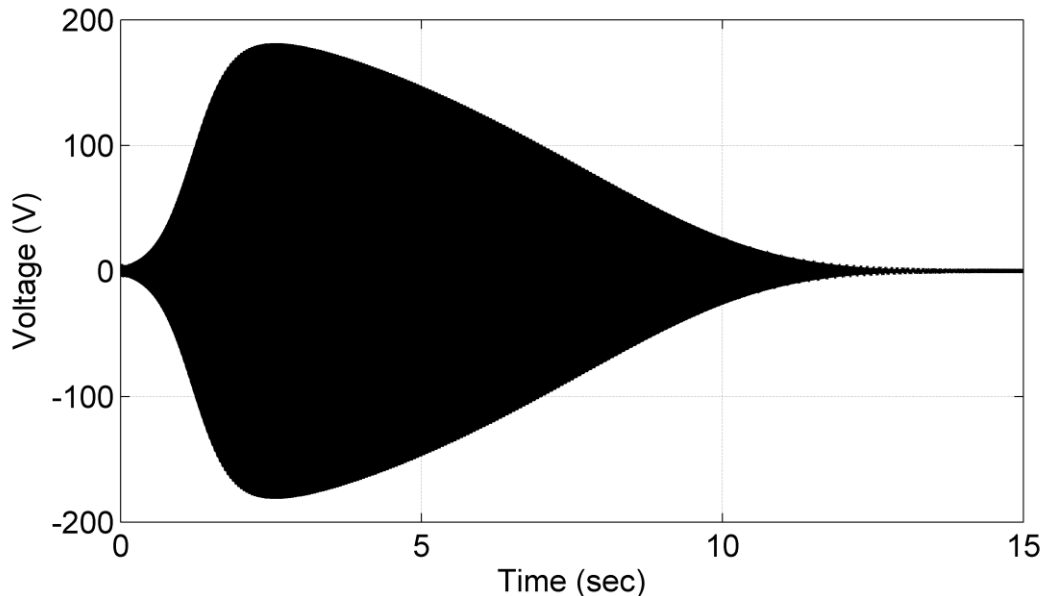


شکل ۴-۱۴: ولتاژ تحریک ژنراتور القایی خودتحریک در حالت بی‌باری با خازن ۳۰ میکروفاراد

مشاهده می‌شود که با کاهش خازن تحریک، نه تنها سرعت رسیدن به ولتاژ پایدار کاهش می‌یابد، بلکه مقدار ولتاژ نهایی در حالت ماندگار نیز به شدت افت می‌کند. بنابراین، انتخاب درست این مقدار برای خازن تحریک در طراحی سیستم بسیار حیاتی است.



همچنین در شکل ۴-۱۵، تاثیر اضافه شدن بار سنگین، به ژنراتور القایی خودتحریک بررسی شده است. برای این منظور، در ثانیه‌ی  $t = 2$  ثانیه، یک گشتاور الکترومغناطیسی برابر با ۳۰۰۰ نیوتن متر به ماشین وارد می‌شود، همان‌طور که مشاهده می‌شود. در مدت کمی پس از ورود گشتاور سنگین، ولتاژ تحریک شروع به کاهش می‌کند و صفر می‌شود. به این ترتیب، خودتحریکی در این ژنراتور، از دست می‌رود.



شکل ۴-۱۵: تاثیر ورود گشتاور سنگین به ژنراتور القایی خودتحریک

در شکل ۴-۱۵، تاثیر افزایش کم گشتاور راه‌اندازی ورودی که متناظر با افزایش سرعت باد است، بررسی شده است. برای این منظور، در  $t = 2$  ثانیه، گشتاور راه‌اندازی از صفر به مقدار ۲۰۰۰ نیوتن متر افزایش یافته است.

در ادامه، با داشتن مدل ژنراتور، عملکرد کنترل طراحی شده را برای تثبیت ولتاژ سمت استاتور در مقدار مرجع، مورد بررسی قرار می‌دهیم.

## ۶.۴ بررسی عملکرد استراتژی کنترل ولتاژ استاتور

در این قسمت یک ژنراتور معمول را که به عنوان یک ژنراتور در توربین بادی فرض شده است، در نظر می‌گیریم. مشخصات سیستم مورد بررسی، از قبیل مشخصات ماشین و شبکه در جدول ۴-۴ آمده است.

جدول ۴-۴ مشخصات سیستم

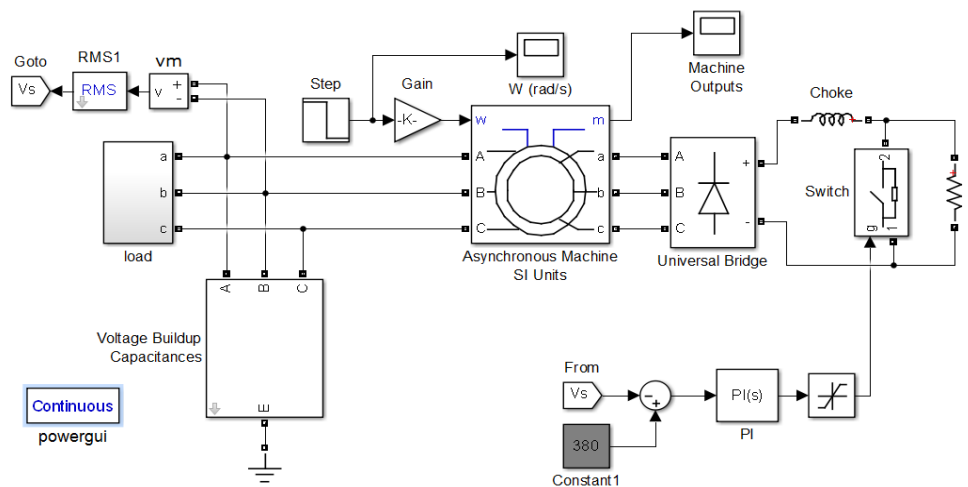
مقدار	مشخصه‌ی سیستم
8 Kw	توان نامی
380 V	ولتاژ نامی
100 $\mu$ F	خازن‌های ولتاژ-ساز
1800 rpm	سرعت نامی
۲ قطب	تعداد قطب‌های ماشین
60 Hz	فرکانس نامی خط

همچنین، مشخصات مربوط به مدار معادل ژنراتور، در جدول ۴-۵ مشخص شده‌اند.

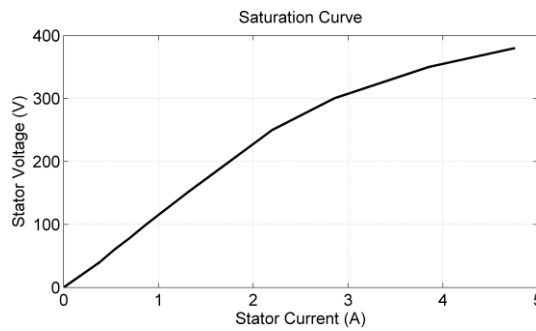
جدول ۴-۵ پارامترهای مدار معادل ماشین

مقدار	پارامترهای ماشین
262 m $\Omega$	مقاومت استاتور
3.2 mH	اندوکتانس استاتور
0.187 m $\Omega$	مقاومت روتور
3.2 mH	اندوکتانس روتور

در این قسمت، شبیه‌سازی بر اساس مدل‌های MATLAB/SIMULINK انجام شده است، که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است، و منحنی اشباع هسته‌ی این ماشین در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۶: مدل شبیه‌سازی استفاده شده در MATLAB/Simulink



شکل ۴-۱۷: منحنی اشباع هسته‌ی ماشین

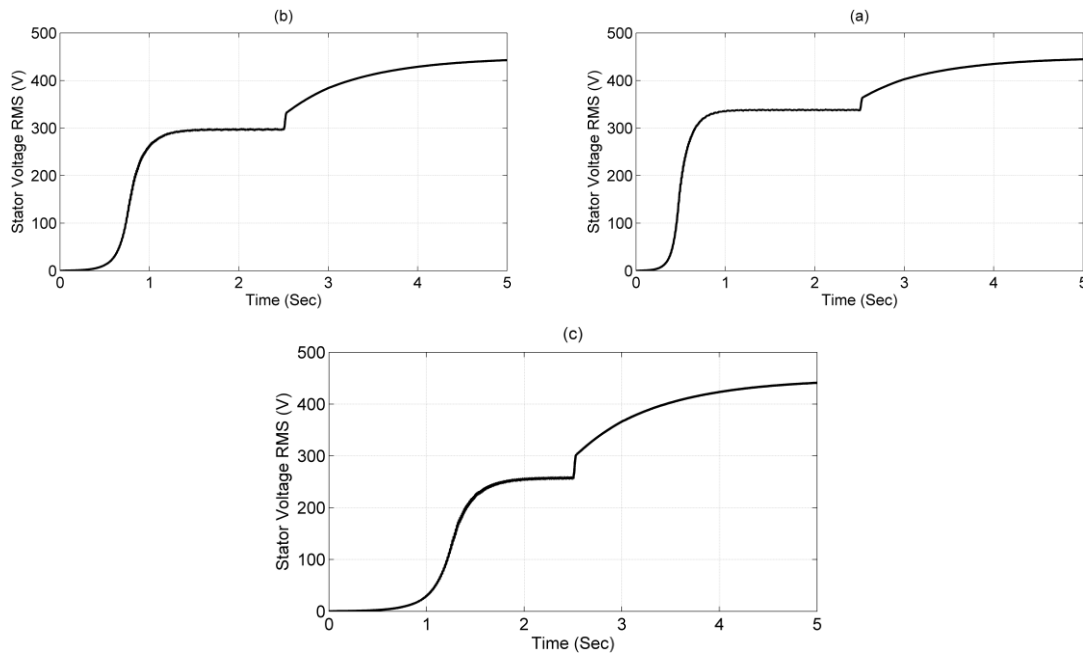
برای بررسی عملکرد این سیستم در شرایط مختلف، در موارد مختلفی شبیه‌سازی صورت گرفته است. ابتدا، برای رسیدن به یک مقاومت کنترل‌شونده‌ی مناسب متصل به مبدل بوست، ولتاژ خروجی استاتور به ازای منبع ولتاژهای DC مختلفی رسم شده است. سپس پاسخ کنترلر به تغییرات بار و تغییرات سرعت ژنراتور بررسی شده است.

#### ۱.۶.۴ انتخاب مقاومت متصل به مبدل بوست

مقدار مقاومت متصل به مبدل بوست محدوده‌ی قابل کنترل را در این سیستم مشخص می‌کند. بنابراین، سه مقدار مختلف برای این ولتاژ در نظر گرفته شده است، و RMS ولتاژ استاتور برای هر مورد در شکل ۴-۷ رسم شده است. برای فهمیدن مقدار ماکسیمم و مینیمم محدوده‌ی قابل کنترل ولتاژ استاتور به ازای هر یک از مقاومت‌های انتخاب شده، سوئیچ مبدل بوست تا زمان ۲/۵ ثانیه خاموش نگه داشته می‌شود، و سپس تا انتها روشن می‌شود. وقتی که سوئیچ خاموش است، مقاومت روتور بیشترین مقدار را خواهد داشت، و بنابراین کمترین مقدار ممکن برای ولتاژ استاتور اتفاق می‌افتد؛ و بیشترین مقدار ولتاژ استاتور وقتی اتفاق می‌افتد که سوئیچ روشن است، (یعنی خروجی یکسوساز اتصال کوتاه می‌شود).

همانطور که در شکل ۴-۱۸ دیده می‌شود، ماکسیمم ولتاژ استاتور قابل دستیابی مستقل از مقاومت متغیر است، که تقریباً برابر ۴۶۰ ولت است. می‌شد حدس زد که ماکسیمم ولتاژ استاتور تغییری نداشته باشد، زیرا ماکسیمم ولتاژ استاتور وقتی اتفاق می‌افتد که منبع ولتاژ از طریق مبدل بوست اتصال کوتاه می‌شود و مدار مستقل از مقدار آن می‌باشد. هر چند، مقادیر مینیمم به ازای مقاومت‌های ۳۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ اهم، به ترتیب ۳۳۰، ۳۰۰، و ۲۶۰ ولت است. در اینجا ولتاژ مرجع استاتور ۳۸۰ ولت در نظر گرفته شده است، بنابراین، مقاومت ۵۰۰ اهمی، می‌تواند انتخاب مناسبی باشد، که محدوده‌ی بین ۳۰۰ ولت تا

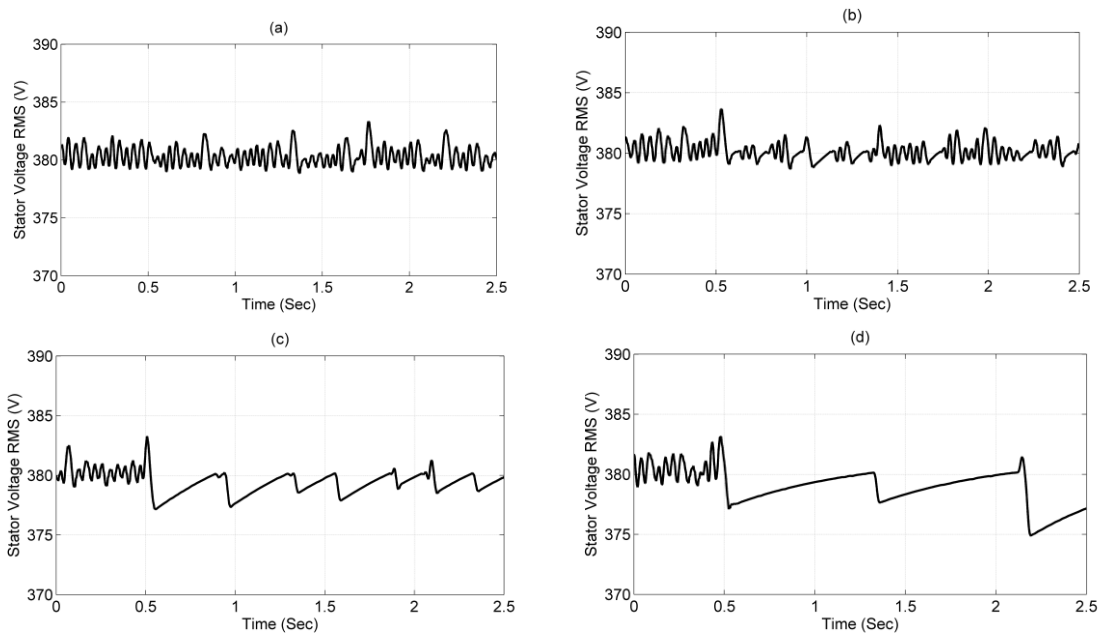
۴۶۰ ولت در حالت کار عادی سیستم است، هر چند می‌توان با انتخاب مقاومت ۸۰۰ اهمی حتی محدوده‌ی بیشتری را برای کنترل ولتاژ در اختیار گرفت. این حاشیه‌ی کنترلی بیشتر، وقتی خودش را نشان می‌دهد که سرعت ژنراتور و در نتیجه ولتاژ استاتور افزایش یابد، که در این حالت هر چه مقاومت کنترل‌شونده بیشتر باشد می‌تواند تا محدوده‌ی بیشتری از افزایش سرعت را تحمل کند.



شکل ۴-۱۸: RMS ولتاژ استاتور برای مقاومت‌های مختلف الف) ۳۰۰ اهم ب) ۵۰۰ اهم ج) ۸۰۰ اهم

#### ۲.۶.۴ پاسخ کنترلر به تغییرات بار

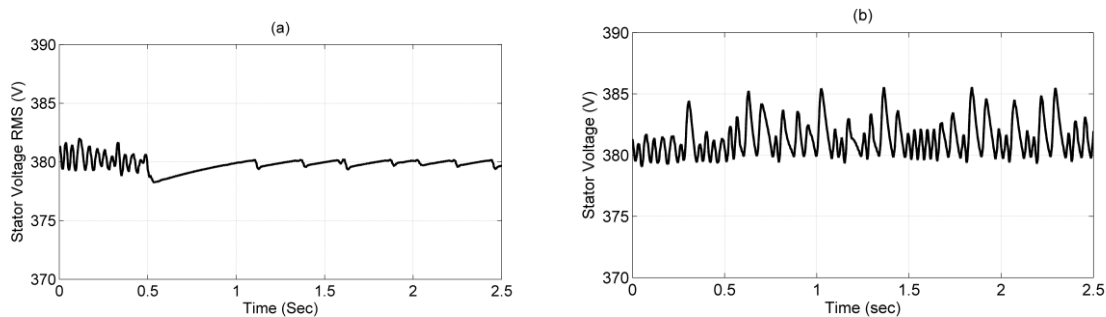
تغییرات بار معمول‌ترین اتفاق در حین بهره‌برداری عادی از سیستم تولید توان است. بنابراین، بررسی پاسخ کنترلر طراحی شده به تغییرات بار در شرایط مختلف، حیاتی است. در اینجا چهار مورد مختلف برای تغییرات بار در نظر گرفته شده است: الف) تغییر از بی‌باری به بار عادی  $40+j40$  اهم، ب) تغییر از بی‌باری به بار کامل  $14+j14$  اهم ج) تغییر از بی‌باری به بار اضافی (Overload)  $7+j7$  اهم د) تغییر از بی‌باری به حاشیه‌ی پایداری  $4+j4$  اهم. تغییرات پله‌ی بار در زمان  $0.5$  ثانیه اتفاق می‌افتند، و سیستم تا قبل از این زمان در حالت ماندگار در نظر گرفته شده است. منحنی تغییرات ولتاژ استاتور به ازای این تغییرات بار در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است.

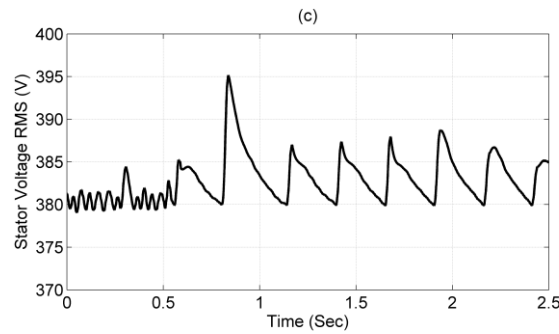


شکل ۴-۱۹: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات پله‌ای بار مختلف الف) از بی‌باری به بار عادی  $40+j40$  اهم، ب) از بی‌باری به بار کامل  $14+j14$  اهم ج) از بی‌باری به بار اضافی  $7+j7$  اهم د) از بی‌باری به حاشیه‌ی پایداری  $4+j4$  اهم

### ۳.۶.۴ پاسخ کنترلر به تغییرات سرعت

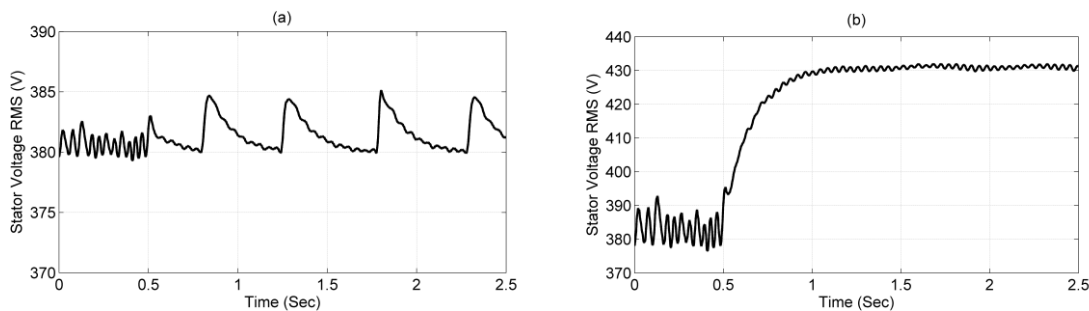
در یک توربین بادی، سرعت توربین‌ها به شدت وابسته به سرعت باد است، که قابل پیش‌بینی نیست، و به طور غیرمنظم تغییر می‌کند. بنابراین، سیستم کنترلی باید قابلیت مدیریت تغییرات سرعت را نیز، علاوه بر تغییرات بار داشته باشد. به همین دلیل، پاسخ سیستم در اینجا به افزایش و کاهش سرعت ژنراتور نیز بررسی شده است، که در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده‌اند.





شکل ۴-۲۰: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات پله‌ی سرعت از ۱۸۰۰ دور بر دقیقه به الف) ۱۷۵۰ دور بر دقیقه (ب) ۱۸۵۰ دور بر دقیقه (ج) ۱۹۰۰ دور بر دقیقه

در شکل ۴-۲۰ مقاومت کنترل‌شونده برابر ۵۰۰ اهم در نظر گرفته شده است. با نظر به بخش ۱،۳،۴، برای ارزیابی فرضیه مطرح شده، تغییرات مشابهی برای سرعت به سیستم مشابه با مقاومت ۳۰۰ اهمی اعمال شده است، و ولتاژ استاتور متناظر با آن در شکل ۴-۲۱ رسم شده است.

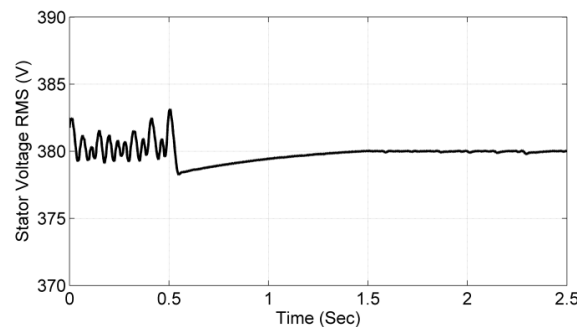


شکل ۴-۲۱: RMS ولتاژ استاتور با مقاومت ۳۰۰ اهمی برای تغییرات پله‌ی سرعت از ۱۸۰۰ دور بر دقیقه به الف) ۱۸۵۰ دور بر دقیقه (ب) ۱۹۰۰ دور بر دقیقه

همانطور که در شکل ۴-۲۱-الف دیده می‌شود، به ازای افزایش سرعت تا ۱۸۵۰، کنترلر به سختی ولتاژ استاتور را در نزدیکی ولتاژ مرجع نگه می‌دارد؛ هرچند، این کنترلر برای افزایش سرعت تا ۱۹۰۰ دور بر دقیقه شکست می‌خورد (بنگرید به شکل ۴-۲۱-ب). در این مورد، سوئیچ مبدل بوست همواره در حالت خاموش قرار می‌گیرد، و تمام ۳۰۰ اهم مقاومت به صورت سری در مدار معادل روتور قرار می‌گیرد؛ هرچند این مقدار ۳۰۰ اهم برای کاهش ولتاژ استاتور تا مقدار مرجع کافی نیست، و همانطور که دیده می‌شود، افزایش ولتاژ بسیار بیش از حد مجاز است.

### ۴.۶.۴ تغییرات همزمان بار و سرعت

در این بخش، پاسخ کنترلر به تغییرات همزمان سرعت و بار بررسی شده است، یعنی بدترین حالت مورد نظر قرار گرفته است، که در آن سرعت روتور از ۱۸۰۰ دور بر دقیقه به ۱۷۵۰ دور بر دقیقه کاهش می‌یابد و در عین حال، بار از حالت بی‌باری به بار کامل می‌رسد، که هر دو پله در لحظه‌ی ۰/۵ ثانیه به طور همزمان اتفاق می‌افتند. ولتاژ استاتور در این حالت در شکل ۴-۲۲ رسم شده است.



شکل ۴-۲۲: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات همزمان پله‌ی سرعت از ۱۸۰۰ به ۱۷۵۰ دور بر دقیقه و بار از  $40+j40 \Omega$  به  $4+j4 \Omega$

#### جدول ۴-۵: عملکرد کلی استراتژی کنترلی پیشنهادی

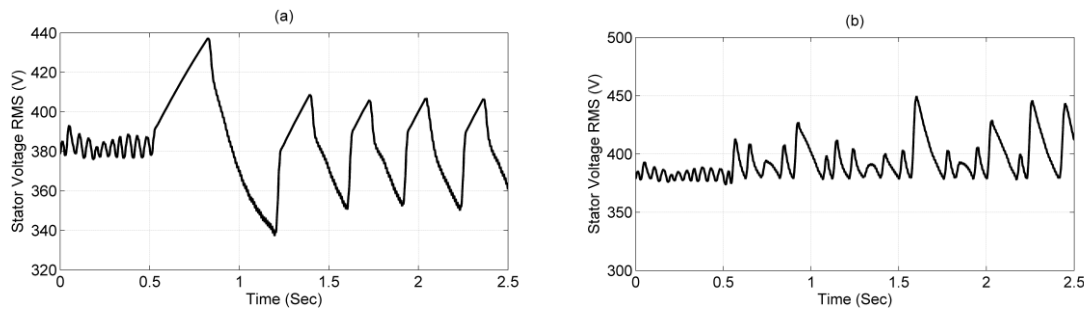
ریپل ولتاژ به ازای تغییرات بار و سرعت	مینیمم	ماکسیمم
محدوده‌ی سرعت	1750 rpm	1900 rpm
ریپل ولتاژ برای تغییرات سرعت	0.5% (2 V)	1.3% (5 V)
محدوده‌ی بار	بی‌باری	دوبرابر بار کامل
ریپل ولتاژ برای تغییرات بار	0.5% (2 V)	1.6% (6 V)

یک جمع‌بندی کلی از عملکرد کنترلر پیشنهادی در جدول ۴-۵ گزارش شده است، که در آن مشاهده می‌شود که ریپل ولتاژ به ازای محدوده‌ی وسیعی از تغییرات بار (از بی‌باری تا دوبرابر بار کامل) و تغییرات سرعت (از ۱۷۵۰ تا ۱۹۰۰ دور بر دقیقه) زیر محدوده‌ی مجاز یعنی ۲٪ قرار دارد، که این به معنای موفقیت طراحی کنترلر است.

### ۵.۶.۴ عملکرد کنترلر خود-تنظیم (تطبیقی)

پاسخ کنترلر نسبت به پارامترهای سیستم مانند مقاومت‌ها و اندوکتانس‌های روتور و استاتور، و پارامترهای سیستم حساس است، که از میان آنها نسبت به تغییرات اندازه‌ی خازن‌های ولتاژساز، بیشترین حساسیت را دارد، که تغییرات کوچک این خازن‌ها منجر به تغییرات بزرگی در نقطه‌ی کار می‌شود. بنابراین، در این بخش عملکرد سیستم در پاسخ به تغییرات کوچکی در خازن‌های ولتاژ ساز مورد بررسی قرار گرفته است، که ممکن است در اثر فرسودگی، تغییرات دما و غیره اتفاق افتاده باشد.

هرچند چنین تغییراتی در سیستم به صورت آنی نیست، و به مرور زمان اتفاق می‌افتند، با این حال تنها برای مقایسه با بخش‌های قبلی، فرض شده است که مقدار خازن‌های ولتاژساز در لحظه‌ی ۰/۵ ثانیه از  $100 \mu\text{F}$  به  $110 \mu\text{F}$  می‌رسد. عملکرد سیستم ژنراتور در شکل ۴-۲۳ برای دو حالت نشان داده شده است: الف) بدون کنترلر خودتنظیم (با مقادیر P و I ثابت) و ب) با یک کنترلر PI خودتنظیم با استفاده از بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک.



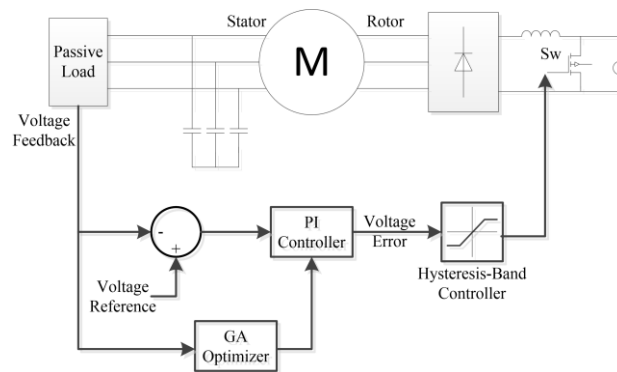
شکل ۴-۲۳: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات خازن‌های ولتاژساز از  $100 \mu\text{F}$  به  $110 \mu\text{F}$  بدون حلقه‌ی کنترل تطبیقی (ب) با حلقه‌ی کنترل تطبیقی (کنترلر PI خودتنظیم)

عملکرد سیستم به شدت به تغییرات خازن‌های ولتاژ ساز حساس است، بنابراین تغییر آنها از  $100 \mu\text{F}$  به  $110 \mu\text{F}$  تغییرات بسیار بالایی برای چنین سیستمی محسوب می‌شود. همانطور که در شکل ۴-۲۳-الف دیده می‌شود، کنترلر نمی‌تواند این تغییرات خازن را مدیریت کند و پاسخ قابل قبولی ندارد، زیرا پارامترهای P و I پس از تغییر خازن مثل حالت قبل آن ثابت می‌مانند. در حالی که با استفاده از یک کنترلر خودتنظیم، بلوک GA-Optimization پارامترهای P و I بهینه را محاسبه کرده، طوری که تابع هدف تعریف شده مینیمم شود و به سیستم اعمال می‌کند. تفاوت این دو حالت در شکل‌های ۴-۲۳-الف و ۴-۲۳-ب نشان داده شده است.



## ۷.۴ ساختار کنترلی ولتاژ استاتور با استفاده از ولتاژ متغیر

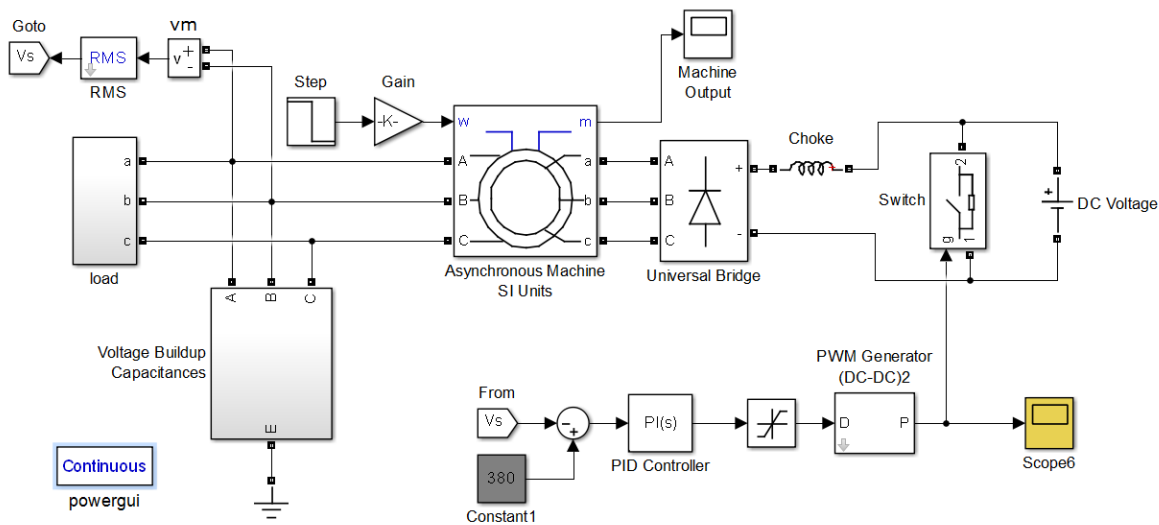
همچنین می‌توان با جایگزین کردن ولتاژ متصل به مبدل بوست در ساختار کنترلی پیشنهاد شده، با یک منبع ولتاژ، به یک منبع ولتاژ قابل کنترل دست یافت. یعنی به جای مقاومت کنترل‌شونده، یک منبع ولتاژ کنترل‌شونده را به صورت سری در مدار معادل روتور قرار دهیم. در این صورت به ساختار کنترلی دست خواهیم یافت که در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۴: حلقه‌ی کنترلی برای استراتژی کنترل ولتاژ پیشنهادی

تمامی اجزای کنترلر مانند قسمت قبل خواهد بود با این تفاوت که مقاومت متغیر با منبع ولتاژ متغیر جایگزین شده است. همچنین مدل شبیه‌سازی شده در MATLAB/Simulink در شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است.

انتظار می‌رود که این استراتژی کنترلی دارای پاسخ زمانی بهتری نسبت به حالت قبل باشد، زیرا در حالت قبل مدار معادل روتور شامل مقاومت روتور به علاوه‌ی مقاومت متغیر بود، اما در این حالت تنها مقاومت روتور در مدار وجود دارد. ثابت زمانی مدار از رابطه  $L_r/R$  پیروی می‌کند، بنابراین در حالت کنترل با مقاومت متغیر ثابت زمانی برابر خواهد بود با  $L_r/(R_{ext} + R_r)$  در حالی که در ساختار کنترلی با منبع ولتاژ متغیر، ثابت زمانی برابر خواهد بود با  $L_r/R_r$ . این یعنی در حالت کنترل با منبع ولتاژ متغیر، پاسخ بسیار سریع‌تر از حالت قبل است.



شکل ۴-۲۵: مدل شبیه‌سازی استفاده شده در MATLAB/Simulink

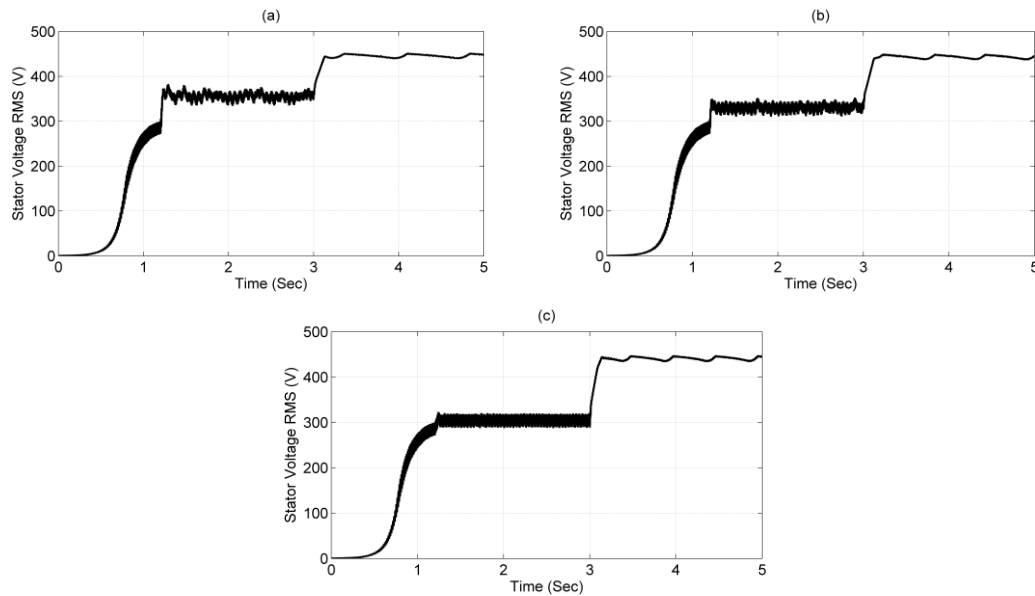
اکنون باید به بررسی عملکرد این ساختار کنترلی در شرایط مختلف پردازیم، تا مناسب بودن آن را مورد تحقیق قرار دهیم.

#### ۱.۷.۴ انتخاب منبع ولتاژ متصل به مبدل بوست

مقدار منبع ولتاژ DC متصل به مبدل بوست محدوده‌ی قابل کنترل را در این سیستم مشخص می‌کند. بنابراین، سه مقدار مختلف برای این ولتاژ در نظر گرفته شده است، و RMS ولتاژ استاتور برای هر مورد در شکل ۴-۲۶ رسم شده است. برای فهمیدن مقدار ماکسیمم و مینیمم محدوده‌ی قابل کنترل ولتاژ استاتور به ازای هر یک از منابع ولتاژ DC، سوئیچ مبدل بوست تا زمان  $\frac{2}{5}$  ثانیه خاموش نگه داشته می‌شود، و سپس تا انتها روشن می‌شود. وقتی که سوئیچ خاموش است، مقاومت روتور بیشترین مقدار را خواهد داشت، و بنابراین کمترین مقدار ممکن برای ولتاژ استاتور اتفاق می‌افتد؛ و بیشترین مقدار ولتاژ استاتور وقتی اتفاق می‌افتد که سوئیچ روشن است، (یعنی خروجی یکسوساز اتصال کوتاه می‌شود).

همانطور که در شکل ۴-۲۶ دیده می‌شود، ماکسیمم ولتاژ استاتور قابل دستیابی مستقل از منبع ولتاژ DC است، که تقریباً برابر ۴۶۰ ولت است. می‌توان حدس زد که ماکسیمم ولتاژ استاتور تغییری نداشته باشد، زیرا ماکسیمم وقتی اتفاق می‌افتد که ولتاژ استاتور وقتی اتفاق می‌افتد که منبع ولتاژ از طریق مبدل بوست اتصال کوتاه می‌شود و مدار مستقل از مقدار آن می‌باشد. هر چند، مقادیر مینیمم به ازای

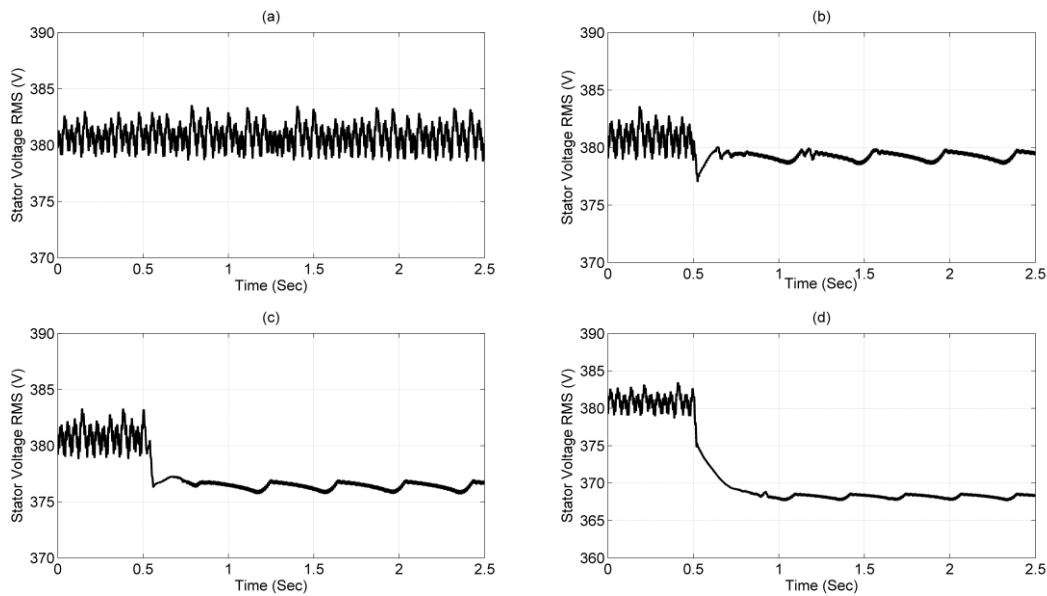
منبع ولتاژ DC ۴۰، ۵۰ و ۶۰ ولت، به ترتیب ۳۸۰، ۳۴۰، و ۳۰۰ ولت است. در اینجا ولتاژ مرجع استاتور ۳۸۰ ولت در نظر گرفته شده است، بنابراین، منبع ولتاژ ۶۰ ولت، محدوده‌ی کنترلی وسیع‌تری را برای کنترل ولتاژ استاتور در اختیار ما قرار می‌دهد، که محدوده‌ی بین ۳۰۰ ولت تا ۴۶۰ ولت در حالت کار عادی سیستم است. این حاشیه‌ی کنترلی بیشتر، وقتی خودش را بیشتر نشان می‌دهد که سرعت ژنراتور و در نتیجه ولتاژ استاتور افزایش یابد، که در این حالت هر چه ولتاژ منبع DC بیشتر باشد می‌تواند تا محدوده‌ی بیشتری از افزایش سرعت را تحمل کند.



شکل ۴-۲۶: RMS ولتاژ استاتور برای منابع ولتاژ DC مختلف (الف) ۴۰ ولت (ب) ۵۰ ولت (ج) ۶۰ ولت

#### ۲.۷.۴ پاسخ کنترلر به تغییرات بار

تغییرات بار معمول‌ترین اتفاق در حین بهره‌برداری عادی از سیستم تولید توان است. بنابراین، بررسی پاسخ کنترلر طراحی شده به تغییرات بار در شرایط مختلف، حیاتی است. در اینجا چهار مورد مختلف برای تغییرات بار در نظر گرفته شده است: الف) تغییر از بی‌باری به بار عادی  $40+j40$  اهم، ب) تغییر از بی‌باری به بار کامل  $14+j14$  اهم (ج) تغییر از بی‌باری به بار اضافی (Overload)  $7+j7$  اهم (د) تغییر از بی‌باری به حاشیه‌ی پایداری  $4+j4$  اهم. تغییرات پله‌ی بار در زمان  $0.5$  ثانیه اتفاق می‌افتند، و سیستم تا قبل از این زمان در حالت ماندگار در نظر گرفته شده است. منحنی تغییرات ولتاژ استاتور به ازای این تغییرات بار در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است.

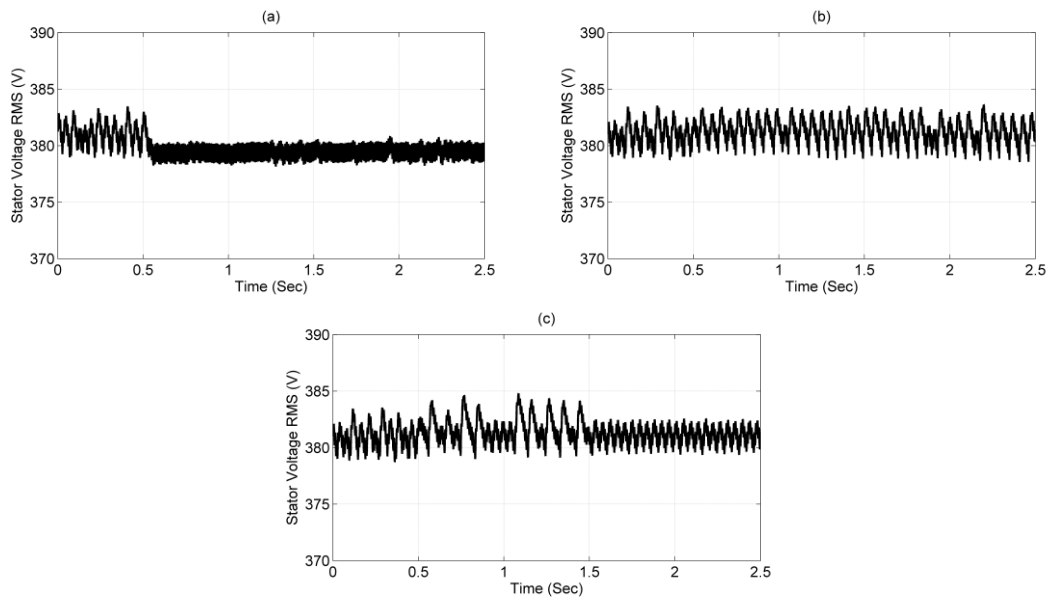


شکل ۴-۲۷: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات پله‌ی بار مختلف الف) از بی‌باری به بار عادی  $40+j40$  اهم، ب) از بی‌باری به بار کامل  $14+j14$  اهم ج) از بی‌باری به بار اضافی  $7+j7$  اهم د) از بی‌باری به حاشیه‌ی پایداری  $4+j4$  اهم

در شکل ۴-۲۷ مشاهده می‌شود که کنترلر توانایی مدیریت کردن بارهایی تا ۵ برابر بار نامی را دارد، و ریپل ولتاژ به ازای این بار به کمتر از ۲ ولت می‌رسد، که این ریپل به دلیل اختلاف فرکانس طبیعی بین سیستم الکتریکی و مکانیکی است. فرکانس پایین‌تر که در شکل موج ولتاژ مشاهده می‌شود، مربوط به سیستم مکانیکی است، و فرکانس بالاتر مربوط به سیستم الکتریکی.

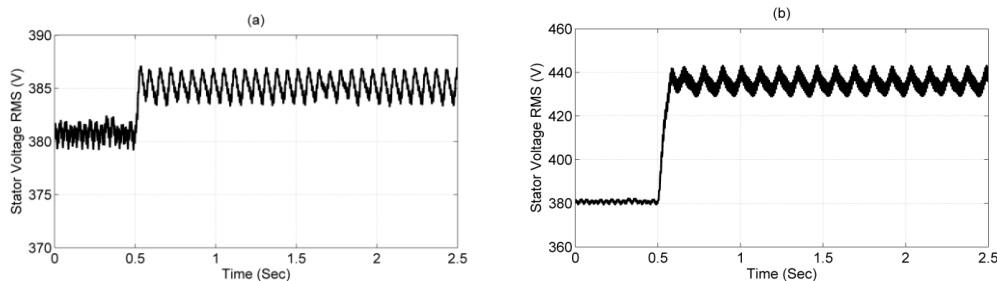
### ۳.۷.۴ پاسخ کنترلر به تغییرات سرعت

در یک توربین بادی، سرعت توربین‌ها به شدت وابسته به سرعت باد است، که قابل پیش‌بینی نیست، و به طور غیرمنظم تغییر می‌کند. بنابراین، سیستم کنترلی باید قابلیت مدیریت تغییرات سرعت را نیز، علاوه بر تغییرات بار داشته باشد. به همین دلیل، پاسخ سیستم در اینجا به افزایش و کاهش سرعت ژنراتور نیز بررسی شده است، که در شکل ۴-۲۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۲۸: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات پله‌ی سرعت از ۱۸۰۰ دور بر دقیقه به الف) ۱۷۵۰ دور بر دقیقه (ب) ۱۸۵۰ دور بر دقیقه (ج) ۱۹۰۰ دور بر دقیقه

در شکل ۴-۲۸ منبع ولتاژ DC برابر با ۶۰ ولت در نظر گرفته شده است. با نظر به بخش ۵-۱، برای ارزیابی فرضیه، تغییرات مشابهی برای سرعت به سیستم مشابه با منبع ولتاژ DC ۴۰ ولتی اعمال شده است، و ولتاژ استاتور متناظر با آن در شکل ۴-۲۹ رسم شده است.



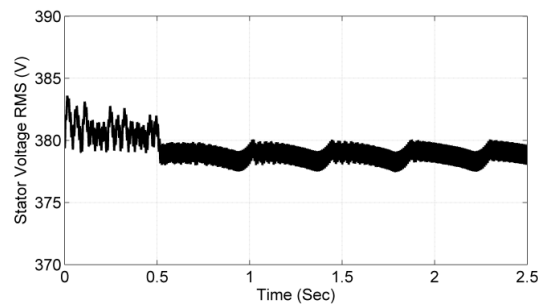
شکل ۴-۲۹: RMS ولتاژ استاتور با منبع ولتاژ DC ۴۰ ولتی برای تغییرات پله‌ی سرعت از ۱۸۰۰ دور بر دقیقه به الف) ۱۸۵۰ دور بر دقیقه (ب) ۱۹۰۰ دور بر دقیقه

همانطور که در شکل ۴-۲۹-الف دیده می‌شود، به ازای افزایش سرعت تا ۱۸۵۰، کنترلر به سختی ولتاژ استاتور را در نزدیکی ولتاژ مرجع نگه می‌دارد؛ هرچند، این کنترلر برای افزایش سرعت تا ۱۹۰۰ دور بر دقیقه شکست می‌خورد (بنگرید به شکل ۴-۲۹-ب). در این مورد، سوئیچ مبدل بوست همواره در حالت خاموش قرار می‌گیرد، و تمام ۴۰ ولت منبع ولتاژ به صورت سری در مدار معادل روتور قرار می‌گیرد؛

هرچند این مقدار ۴۰ ولت برای کاهش ولتاژ استاتور تا مقدار مرجع کافی نیست، و همانطور که دیده می‌شود، افزایش ولتاژ بسیار بیش از حد مجاز است.

#### ۴.۷.۴ تغییرات همزمان بار و سرعت

در این بخش، پاسخ کنترلر به تغییرات همزمان سرعت و بار بررسی شده است، یعنی بدترین حالت مورد نظر قرار گرفته است، که در آن سرعت روتور از ۱۸۰۰ دور بر دقیقه به ۱۷۵۰ دور بر دقیقه کاهش می‌یابد و در عین حال، بار از حالت بی‌باری به بار کامل می‌رسد، که هر دو پله در لحظه‌ی ۰/۵ ثانیه به طور همزمان اتفاق می‌افتند. ولتاژ استاتور در این حالت در شکل ۴-۳۰ رسم شده است.



شکل ۴-۳۰: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات همزمان پله‌ی سرعت از ۱۸۰۰ به ۱۷۵۰ دور بر دقیقه و بار از  $40+j40 \Omega$  به  $4+j4 \Omega$

#### جدول ۴-۷: عملکرد کلی استراتژی کنترلی پیشنهادی

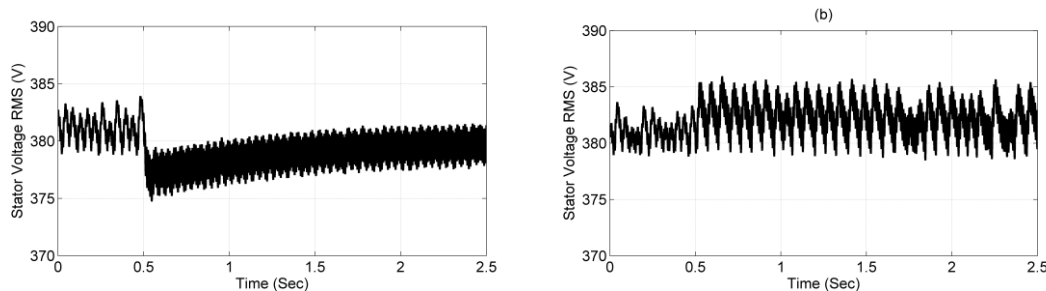
ریپل ولتاژ به ازای تغییرات بار و سرعت	مینیمم	ماکسیمم
محدوده‌ی سرعت	1750 rpm	1900 rpm
ریپل ولتاژ برای تغییرات سرعت	1.1% (4 V)	1.3% (5 V)
محدوده‌ی بار	بی‌باری	دوبرابر بار کامل
ریپل ولتاژ برای تغییرات بار	0.25% (1 V)	1.8% (7 V)

یک جمع‌بندی کلی از عملکرد کنترلر پیشنهادی در جدول ۴-۷ گزارش شده است، که در آن مشاهده می‌شود که ریپل ولتاژ به ازای محدوده‌ی وسیعی از تغییرات بار (از بی‌باری تا دوبرابر بار کامل) و تغییرات سرعت (از ۱۷۵۰ تا ۱۹۰۰ دور بر دقیقه) زیر محدوده‌ی مجاز یعنی ۰.۲٪ قرار دارد، که این به معنای موفقیت طراحی کنترلر است.

### ۵.۷.۴ عملکرد کنترلر خود-تنظیم

پاسخ کنترلر نسبت به پارامترهای سیستم مانند مقاومت‌ها و اندوکتانس‌های روتور و استاتور، و پارامترهای سیستم حساس است، که از میان آنها نسبت به تغییرات اندازه‌ی خازن‌های ولتاژساز، بیشترین حساسیت را دارد، که تغییرات کوچک این خازن‌ها منجر به تغییرات بزرگی در نقطه‌ی کار می‌شود. بنابراین، در این بخش عملکرد سیستم در پاسخ به تغییرات کوچکی در خازن‌های ولتاژساز مورد بررسی قرار گرفته است، که ممکن است در اثر فرسودگی، تغییرات دما و غیره اتفاق افتاده باشد.

هرچند چنین تغییراتی در سیستم به صورت آنی نیست، و به مرور زمان اتفاق می‌افتند، با این حال تنها برای مقایسه با بخش‌های قبلی، فرض شده است که مقدار خازن‌های ولتاژساز در لحظه‌ی ۰/۵ ثانیه از  $100 \mu\text{F}$  به  $110 \mu\text{F}$  می‌رسد. عملکرد سیستم ژنراتور در شکل ۴-۳۱ برای دو حالت نشان داده شده است: الف) بدون کنترلر خودتنظیم (با مقادیر P و I ثابت) و ب) با یک کنترلر PI خودتنظیم با استفاده از بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک.



شکل ۴-۳۱: RMS ولتاژ استاتور برای تغییرات خازن‌های ولتاژساز از  $100 \mu\text{F}$  به  $110 \mu\text{F}$  الف) بدون حلقه‌ی کنترل تطبیقی ب) با حلقه‌ی کنترل تطبیقی (کنترلر PI خودتنظیم)

عملکرد سیستم به شدت به تغییرات خازن‌های ولتاژساز حساس است، بنابراین تغییر آنها از  $100 \mu\text{F}$  به  $110 \mu\text{F}$  تغییرات بسیار بالایی برای چنین سیستمی محسوب می‌شود. همانطور که در شکل ۲۱-الف دیده می‌شود، کنترلر نمی‌تواند این تغییرات خازن را مدیریت کند و پاسخ قابل قبولی ندارد، زیرا پارامترهای P و I پس از تغییر خازن مثل حالت قبل آن ثابت می‌مانند. در حالی که با استفاده از یک کنترلر خودتنظیم، بلوک GA-Optimization پارامترهای P و I بهینه را محاسبه کرده، طوری که تابع هدف تعریف شده مینیمم شود و به سیستم اعمال می‌کند. تفاوت این دو حالت در شکل‌های ۴-۳۱-الف و ۴-۳۱-ب نشان داده شده است.

۵

## فصل پنجم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات



## ۱.۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

ژنراتورهای القایی خود تحریک، کاربردهای گسترده‌ای را در صنعت به خود اختصاص داده‌اند، از این رو، بررسی و بهبود عملکرد این نوع ژنراتورها حائز اهمیت است. بنابراین، در این پایان‌نامه سعی شد که یک ضمن مدل‌سازی ژنراتور القایی از طریق حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر آن، عملکرد آن را در حالت‌های گذرا مورد بررسی قرار دهیم.

برای مدل‌سازی ژنراتور، یک ماشین القایی موجود در آزمایشگاه در نظر گرفته شد، و با انجام آزمایش‌های DC، روتور قفل شده و بی‌باری (در ولتاژهای مختلف)، سعی شد که پارامترهای ماشین و همچنین منحنی اشباع آن را به دست آوریم. سپس با داشتن پارامترهای ماشین، و اعمال آنها در معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم (یعنی ژنراتور القایی متصل به شبکه‌ی قدرت سه‌فاز)، رفتار ماشین را در شرایط مختلف کاری، برای حالت ماندگار و همچنین گذرا، حل کنیم. برای حل معادلات ماشین، از روش حداقل مربعات غیرخطی، که تابع مربوط به آن در نرم‌افزار MATLAB به نام `fsolve` موجود است، استفاده شده است. دیده شد که رفتار ماشین با استفاده از حل این معادلات در شرایط مختلف بار و تغییرات مقدار خازن تحریک قابل محاسبه و کنترل است.

در ادامه با داشتن یک مدل مناسب برای تحلیل عملکرد ژنراتور، یک کنترلر مناسب جهت تثبیت ولتاژ استاتور طراحی شد. عملکرد این استراتژی کنترلی به این شکل بود که از طریق افزودن یک مقاومت قابل کنترل به صورت سری در مدار روتور سیم‌پیچی شده، و با تغییر مقامت روتور، ولتاژ استاتور در مقدار دلخواه ثابت نگاه داشته می‌شود.

همانطور که در این تحقیق نشان داده شد، این الگوریتم کنترلی، نسبت به تغییرات پارامترهای سیستم حساس است. بنابراین، یک راه حل برای مقابله با حساسیت سیستم نسبت به تغییر پارامترها و رسیدن به عملکرد بهینه در تمام شرایط کاری سیستم، افزودن یک حلقه‌ی کنترلر تطبیقی به کنترلر است. عملکرد این حلقه به این صورت است که یک تابع هدف را در آن تعریف می‌کنیم، و هر بار با اعمال پارامترهای قابل تنظیم کنترلر (از قبیل  $I$  و  $P$ )، مقدار تابع هدف را محاسبه می‌کند، و آن جفت  $I$  و  $P$  هایی که کمترین تابع هدف را به دست می‌دهند، به عنوان ضرایب کار دائمی انتخاب می‌شوند. تابع هدف

در اینجا ریپل ولتاژ در حالت دائمی در نظر گرفته شده است، که می‌تواند به مقادیر فراجهدش و سایر اهداف نیز بسط داده شود.

سپس عملکرد این کنترلر در شرایط مختلف کاری سیستم مورد بررسی قرار گرفت، و پاسخ آن به تغییرات بار و تغییرات سرعت مورد بررسی قرار گرفت. همینطور، یک ساختار کنترلی مشابه با جایگزین کردن مقاومت متغیر با منبع ولتاژ متغیر پیشنهاد شد، که این ساختار دارای سرعت پاسخ بالاتری بود. هرچند، محدوده‌ی کنترلی این ساختار نسبت به حالت مقاومت متغیر بسیار پایین‌تر بود. در ضمن، سرعت پاسخ ساختار کنترلی دارای مقاومت متغیر در محدوده‌ی قابل قبولی قرار دارد، که معمولاً پس از چند سیکل به حال ماندگار می‌رسد که برای یک ژنراتور پاسخ خوبی است.

بنابراین، در کل ساختار کنترلی دارای مقاومت متغیر نسبت به منبع ولتاژ متغیر، به علت محدوده‌ی کنترلی وسیع‌تر ترجیح داده می‌شود، همچنین، از دیگر مزایای آن وجود المان پسیو به جای المان اکتیو است، که منجر به افزایش قابلیت اطمینان، و همچنین کاهش هزینه‌های سیستم می‌شود.

## ۲.۵ پیشنهادات

در طراحی بهینه‌ی ژنراتورهای القایی خود-تحریک، دو روند تأثیر به‌سزایی دارند: رسیدن به مدل بهبود یافته، و طراحی کنترلر بهبود یافته. برای بهبود مدل ماشین، روش‌های بسیاری وجود دارد که یک نمونه از آن در این پایان‌نامه بررسی شد. هرچند، می‌توان از روش‌های جعبه‌سیاه (Black-box) نظیر روش‌های شناسایی سیستم از طریق شبکه‌های هوشمند، یا سیستم‌های تخمین حداقل مربعات، به مدل‌های نسبتاً دقیقی برای ماشین دست یافت. همچنین، با داشتن معادلات دیفرانسیل حاکم بر ماشین، می‌توان از روش‌های جعبه‌خاکستری (Grey-box) نیز استفاده کرد که عموماً پاسخ‌های بهتری به دست خواهند داد، و به این صورت است که معادلات حاکم بر سیستم را با پارامترهای مجهول در نظر بگیریم، و با اعمال ورودی و اندازه‌گیری خروجی، پارامترهای معادلات ماشین را تخمین بزنیم. این نوع تخمین در واقع جایگزین روش سنتی استفاده از سه آزمایش DC، روتور قفل شده و بی‌باری است. در این روش، می‌توان با اعمال تعداد بسیار بالای جفت‌های ورودی-خروجی، به تخمین بسیار دقیق‌تری برای ماشین دست یافت.

به این ترتیب، مرحله‌ی اول از هر طراحی بهینه‌ای که داشتن یک مدل دقیق از سیستم است، قابل دستیابی است. سپس، برای طراحی یک کنترل همه‌جانبه، که بتواند پاسخگوی نیازهای سیستم باشد، نیاز به طراحی دقیق دارد. بنابراین، با داشتن یک مدل غیرخطی دقیق از سیستم، می‌توان با استفاده از روش‌های کنترل غیرخطی مانند کنترل مد لغزشی (sliding mode control)، خطی سازی فیدبک (feedback linearization) و غیره، به کنترل‌هایی دست یافت که پاسخگوی نیازهای یک ژنراتور خود-تحریک باشند. خصوصاً که این نوع ژنراتور ها، از آنجا که عموماً به طور مستقل و در نقاطی دوردست کار می‌کنند، طراحی یک کنترلر با محدوده‌ی کنترلی بسیار وسیع به شدت به عملکرد مناسب سیستم کمک می‌کند.

در طراحی کنترلر به روش‌های خطی، عموماً مدل سیستم حول یک نقطه‌ی کار مشخص خطی می‌شود، بنابراین، به ازای بسیاری از نقاط دیگر پاسخ کنترلر خیلی مطلوب نیست. بنابراین، در طراحی کنترلر به روش غیرخطی، تمامی دینامیک‌های دیگر سیستم نیز در کنترلر لحاظ می‌شوند، و به همین دلیل، پاسخ کنترلر در محدوده‌ی وسیع‌تری قابل قبول خواهد بود.

بنابراین، پیشنهادات برای تحقیقات آینده در این زمینه را به دو دسته می‌توان تقسیم کرد:

### ۱.۲.۵ بهبود مدلینگ:

- استفاده از روش‌های Black-box برای مدلسازی ماشین، نظیر تخمین به روش حداقل مربعات، و یا روش‌های هوشمند مانند مدلینگ به روش شبکه‌های عصبی، تخمین پارامترها به روش بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک، و غیره
- همچنین با داشتن معادلات دیفرانسیل حاکم بر ماشین، می‌توان از روش‌های بهبود یافته‌ی grey-box استفاده کرد که در آن، معادلات سیستم با پارامترهای مجهول در نظر گرفته می‌شوند و پارامترهای مجهول با انواع روش‌های تخمین، به دست می‌آیند. این روش‌ها می‌توانند شامل حداقل مربعات، شبکه‌های عصبی، الگوریتم‌های هوشمند مانند ژنتیک، PSO و غیره باشند.

از آنجا که در روش مدلینگ grey-box، از تعداد بالایی از جفت‌های ورودی-خروجی به عنوان جایگزینی برای روش تخمین سنتی پارامترهای ماشین استفاده می‌شود (که شامل سه آزمایش DC، روتور قفل شده و بی باری است)، بنابراین به مدل دقیق‌تری برای سیستم دست خواهیم یافت. به این ترتیب مدل ماشین را با دقت بالایی در دست خواهیم داشت، و هر چه تعداد نمونه‌های جفت ورودی-خروجی را بالاتر ببریم به مدل دقیق‌تری از ماشین خواهیم رسید، و بسته به حداکثر مورد نیاز برای خطا، می‌توان دقت را تا هر مقدار لازم بالا برد.

### ۲.۲.۵ بهبود کنترل‌کننده

با داشتن مدل دقیق برای ماشین، می‌توان با استفاده از روش‌های کنترل غیرخطی نظیر کنترل به روش خطی‌سازی فیدبک، کنترل مود لغزشی، کنترل پسگام و غیره به کنترلی دست یافت که در محدوده‌ی بسیار وسیع‌تری پاسخ مطلوب را برآورده کند.

در این پایان‌نامه فرض شده که سرعت ماشین در مقادیر دلخواه قابل کنترل است، و به ازای تغییرات جزئی در سرعت آن، رفتار ولتاژ شبکه بررسی شد. هرچند، می‌توان با به دست آوردن مدلی برای بخش-های مکانیکی ژنراتور (که بستگی به نوع آن دارد، برای مثال بادی یا حرارتی)، کنترل‌کننده‌ای برای کنترل فرکانس خروجی، از طریق کنترل سرعت ژنراتور طراحی کرد. به این ترتیب، کنترل‌کننده‌ی طراحی شده می‌تواند هم ولتاژ و هم فرکانس آن را کنترل کند. هرچند این امر مستلزم به دست آوردن تمامی معادلات مکانیکی سیستم و طراحی یک کنترل‌کننده برای زاویه‌ی پره‌های توربین بادی، یا گاورنر در توربین حرارتی است. بنابراین، طراحی این کنترل‌کننده‌ی فرکانس در کنار کنترل‌کننده‌ی ولتاژ پیشنهاد شده در این پایان‌نامه می‌تواند موضوع تحقیقی برای آینده باشد.

- [1] R. Bansal, "Three-phase self-excited induction generators: an overview," 2005.
- [2] A. Alolah and M. Alkanhal, "Analysis of three phase self-excited induction generator under static and dynamic loads," in IEEE Conference proceedings, 2007, pp. 1783-1786.
- [3] T. Chan, "Self-excited induction generators driven by regulated and unregulated turbines," IEEE transactions on energy conversion, vol. 11, no. 2, pp. 338-343, 1996.
- [4] S. Singh, B. Singh, and M. Jain, "Performance characteristics and optimum utilization of a cage machine as capacitance excited induction generator," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 5, no. 4, pp. 679-685, 1990.
- [5] K. Sandhu and S. Jain, "Steady state operation of self-excited induction generator with varying wind speeds," International journal of circuits, systems and signal processing, vol. 2, no. 1, pp. 26-33, 2008.
- [6] S. Murthy, B. Singh, S. Gupta, and B. Gulati, "General steady-state analysis of three-phase self-excited induction generator feeding three-phase unbalanced load/single-phase load for stand-alone applications," in Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, 2003, vol. 150, no. 1, pp. 49-55: IET.
- [7] D. Lamabadu and S. Rajakaruna, "Dynamic Analysis of a Novel Single-Phase Induction Generator using an Improved Machine Model," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2016.
- [8] M. K. Paul, M. L. Doumbia, and A. Chériti, "Modeling and control of induction generator applied to variable speed Wind Energy Systems Conversion," in 2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2015, pp. 314-319.
- [9] O. Kiselychnyk, M. Bodson, and J. Wang, "Linearized State-Space Model of a Self-Excited Induction Generator Suitable for the Design of Voltage Controllers," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 4, pp. 1310-1320, 2015.
- [10] A. Alfarhan, S. M. Gadoue, B. Zahawi, M. Shalaby, and M. A. Elgendy, "Modelling of magnetizing inductance saturation in self-excited induction generators," in 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016, pp. 1-6.
- [11] O. Kiselychnyk, M. Bodson, and J. Wang, "Model of a self-excited induction generator for the design of capacitor-controlled voltage regulators," in 21st Mediterranean Conference on Control and Automation, 2013, pp. 149-154.
- [12] N. S. Jayalakshmi and D. N. Gaonkar, "Dynamic modeling and analysis of an isolated self excited induction generator driven by a wind turbine," in 2012 International Conference on Power, Signals, Controls and Computation, 2012, pp. 1-5.
- [13] M. Bodson and O. Kiselychnyk, "Nonlinear dynamic model and stability analysis of self-excited induction generators," in Proceedings of the 2011 American Control Conference, 2011, pp. 4574-4579.
- [14] K. Natarajan, A. M. Sharaf, S. Sivakumar, and S. Naganathan, "Modeling and Control Design for Wind Energy Power Conversion Scheme Using Self-Excited Induction Generator," IEEE Power Engineering Review, vol. PER-7, no. 9, pp. 53-54, 1987.
- [15] M. H. Haque, "Analysis of a Self-Excited Induction Generator With <emphasis

- emphasistype="italic">P</emphasis> &#x2013;<emphasis  
emphasistype="italic">Q</emphasis> Load Model," IEEE Transactions on Energy  
Conversion, vol. 25, no. 1, pp. 265-267, 2010.
- [16] K. Natarajan, A. M. Sharaf, S. Sivakumar, and S. Naganathan, "Modeling and  
Control Design for Wind Energy Power Conversion Scheme using Self-Excited Induction  
Generator," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. EC-2, no. 3, pp. 506-512,  
1987.
- [17] M. Barara, M. Akherraz, A. Abbou, M. Moutchou, and M. L. Elhafyani, "Fuzzy  
modeling magnetizing curve of a self excited induction generator and effect of mutual  
inductance," in 2013 International Renewable and Sustainable Energy Conference  
(IRSEC), 2013, pp. 287-291.
- [18] K. Hafiz, G. Nanda, and N. C. Kar, "Skin effect modeling of self excited induction  
generator in wind power application," in 2008 Canadian Conference on Electrical and  
Computer Engineering, 2008, pp. 001587-001590.
- [19] S. Murthy, O. Malik, and A. Tandon, "Analysis of self-excited induction  
generators," in Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C, 1982, vol.  
129, no. 6, pp. 260-265: IET.
- [20] S. Singh, B. Singh, and M. Jain, "Performance characteristics and optimum  
utilization of a cage machine as capacitance excited induction generator," Energy  
Conversion, IEEE Transactions on, vol. 5, no. 4, pp. 679-685, 1990.
- [21] S. Murthy, B. P. Singh, C. Nagamani, and K. Satyanarayana, "Studies on the use of  
conventional induction motors as self-excited induction generators," Energy Conversion,  
IEEE Transactions on, vol. 3, no. 4, pp. 842-848, 1988.
- [22] S. Singh, B. Singh, and M. Jain, "Comparative study on the performance of a  
commercially designed induction generator with induction motors operating as self excited  
induction generators," in Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C,  
1993, vol. 140, no. 5, pp. 374-380: IET.
- [23] A. K. Al Jabri and A. Alolah, "Limits on the performance of the three-phase self-  
excited induction generators," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 5, no. 2, pp.  
350-356, 1990.
- [24] T. Chan, "Self-excited induction generators driven by regulated and unregulated  
turbines," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 11, no. 2, pp. 338-343, 1996.
- [25] L. Ouazene and G. McPherson, "Analysis of the isolated induction generator,"  
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 8, no. PAS-102, pp. 2793-2798,  
1983.
- [26] A. Kheldoun, H. Bentarzi, and L. Refoufi, "A new algorithm applied to the  
evaluation of self excited induction generator performance," 2010.
- [27] T. Chan and L. L. Lai, "Capacitance requirements of a three-phase induction  
generator self-excited with a single capacitance and supplying a single-phase load,"  
Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 17, no. 1, pp. 90-94, 2002.
- [28] K. Nigim, M. Salama, and M. Kazerani, "Identifying machine parameters  
influencing the operation of the self-excited induction generator," Electric Power Systems  
Research, vol. 69, no. 2, pp. 123-128, 2004.
- [29] M. Haque, "Comparison of steady state characteristics of shunt, short-shunt and  
long-shunt induction generators," Electric Power Systems Research, vol. 79, no. 10, pp.  
1446-1453, 2009.

- [30] M. Haque, "A novel method of evaluating performance characteristics of a self-excited induction generator," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 2, pp. 358-365, 2009.
- [31] A. L. Alolah and M. A. Alkanhal, "Optimization-based steady state analysis of three phase self-excited induction generator," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 1, pp. 61-65, 2000.
- [32] D. Joshi, K. Sandhu, and M. Soni, "Performance analysis of three-phase self-excited induction generator using genetic algorithm," *Electric Power Components and Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 461-470, 2006.
- [33] D. R. Jones, C. D. Perttunen, and B. E. Stuckman, "Lipschitzian optimization without the Lipschitz constant," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 79, no. 1, pp. 157-181, 1993.
- [34] J. Dalei and K. B. Mohanty, "A novel method to determine minimum capacitance of the self-excited induction generator," in *Students' Technology Symposium (TechSym)*, 2014 IEEE, 2014, pp. 408-413: IEEE.
- [35] G. Ofualagba and E. Ubeku, "The analysis and modelling of a self-excited induction generator driven by a variable speed wind turbine," *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, InTech. [http://dx. doi. org/10.5772/18159](http://dx.doi.org/10.5772/18159), 2011.
- [36] B. Singh, M. Singh, and A. Tandon, "Transient performance of series-compensated three-phase self-excited induction generator feeding dynamic loads," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 4, pp. 1271-1280, 2010.
- [37] A. L. Alolah and M. A. Alkanhal, "Optimization-based steady state analysis of three phase self-excited induction generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 15, no. 1, pp. 61-65, 2000.
- [38] M. Örs, "Voltage control of self excited induction generator using look-up table," in *2009 European Control Conference (ECC)*, 2009, pp. 4211-4216.
- [39] H. Geng, D. Xu, B. Wu, and W. Huang, "Direct Voltage Control for a Stand-Alone Wind-Driven Self-Excited Induction Generator With Improved Power Quality," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 8, pp. 2358-2368, 2011.
- [40] A. Biglari and S. A. Miraftebi, "Steady-state analysis and voltage control of Self-Excited Induction Generator (SEIG)," in *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2012, pp. 776-781.
- [41] M. F. Khan and M. R. Khan, "Voltage control of single-phase two winding self excited induction generator for isolated loads," in *2014 International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT)*, 2014, pp. 209-214.
- [42] M. M. d. Silva, R. F. d. Camargo, J. R. Pinheiro, R. Vieira, T. G. Kenne, and F. Botteron, "Discrete-time super-twisting sliding-mode control applied to a DSTATCOM-based voltage regulator for a self excited induction generator," in *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2014, pp. 4273-4278.
- [43] K. Sowndarya, R. Essaki Raj, and C. Kamalakannan, "Voltage control of Self-Excited Induction Generator," in *2014 IEEE 2nd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2014, pp. 283-289.
- [44] M. Bierhoff and C. Rhinow, "A simple DC bus voltage control method for self excited squirrel cage induction generators," in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015, pp. 598-603.
- [45] B. Singh, S. S. Murthy, R. S. Reddy, and P. Arora, "Implementation of modified

---

current synchronous detection method for voltage control of self-excited induction generator," *IET Power Electronics*, vol. 8, no. 7, pp. 1146-1155, 2015.

[46] L. G. Scherer, R. V. Tambara, and R. F. d. Camargo, "Voltage and frequency regulation of standalone self-excited induction generator for micro-hydro power generation using discrete-time adaptive control," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 531-540, 2016.

[47] T. F. Chan, K. A. Nigim, and L. L. Lai, "Voltage and frequency control of self-excited slip-ring induction generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 1, pp. 81-87, 2004.

[48] A. T. L. and S. Mousavi, "Hybrid railway power quality conditioner for high-capacity traction substation with auto-tuned DC-link controller," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 6, no. 3, pp. 207-214, 2016.

[49] J. Holland, "Outline of control parameters for genetic algorithms," *J Assn Computer Machinery*, vol. 3, pp. 297-314, 1962.



## **Abstract**

This page is accurate translation from Persian abstract into English.

**Key Words:** Write a 3 to 5 KeyWords is essential.