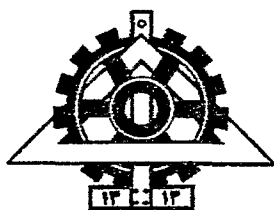




بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





دانشگاه تهران

دانشکده فنی

گروه مهندسی برق و کامپیوتر



ارزیابی ژنراتور سوئیچ رلوکتانس برای استفاده از انرژی باد

نگارش

استاد راهنما:

پایان نامه برای دریافت درجهی کارشناسی ارشد

در رشتهی مهندسی برق قدرت

چکیده

در این پایان نامه یک ژنراتور سوئیچ رلوکتانس ۲۰ kW با سرعت نامی ۱۰۰ rpm برای استفاده در مبدل‌های انرژی بادی تحریک مستقیم طراحی شده است. در انتخاب ساختار و طراحی این ژنراتور مسائل مربوط به نویز آکوستیک و لرزش اجزای مکانیکی در جهت بهبود سازگاری ژنراتور در تبدیل انرژی بادی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

طراحی ژنراتور بگونه‌ای صورت گرفته است که در مد تحرک تک پالس کار کند. با استفاده از یک مدل تحلیلی مشخصه‌های شار پیوندی در ژنراتور محاسبه شده و منحنی‌های مربوط به کارکرد الکتریکی ژنراتور شبیه سازی شده‌اند. با تعیین مدل شار در قسمت‌های مختلف ژنراتور تلفات آهنی در هر یک از این قسمت‌ها محاسبه می‌شود. تلفات مسی و تلفات هدایتی مدار الکترونیک قدرت نیز با استفاده از شکل موج جریان فاز تعیین می‌گردد. سپس بازده ژنراتور محاسبه، و بهینه سازی طرح با استفاده از بازده و با روش سعی و خطا انجام می‌شود.

۱	..... (۱) مقدمه و مروری بر سیستم‌های ژنراتوری توربین بادی
۱	..... (۱-۱) مقدمه
۴	..... (۲-۱) مروری بر سیستم‌های ژنراتور توربین بادی
۵	..... (۱-۲-۱) توان تولیدی توسط توربین بادی
۶	..... (۲-۲-۱) جعبه دنده و اینرسی توربین‌های بادی
۷	..... (۳-۲-۱) عملکرد سرعت ثابت توربین‌های بادی
۹	..... (۱-۳-۲-۱) ژنراتورهای القایی
۱۰	..... (۲-۳-۲-۱) ژنراتورهای سنکرون
۱۱	..... (۴-۲-۱) عملکرد سرعت متغیر توربین‌های بادی
۱۳	..... (۱-۴-۲-۱) ژنراتور سنکرون
۱۴	..... (۲-۴-۲-۱) ژنراتور القائی قفس سنجابی
۱۵	..... (۳-۴-۲-۱) ژنراتور القائی روتور سیم پیچی شده
۱۷	..... (۴-۴-۲-۱) ژنراتور آهنربای دائم سنکرون
۱۷	..... (۵-۴-۲-۱) ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
۱۹	..... (۲) ماشین سوئیچ رلوکتانس و تئوری عملکرد آن
۱۹	..... (۱-۲) مقدمه
۱۹	..... (۲-۲) دید کلی در مورد ماشین سوئیچ رلوکتانس
۲۰	..... (۱-۲-۲) سیستم ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
۲۱	..... (۱-۱-۲-۲) ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
۲۲	..... (۲-۱-۲-۲) آشکار ساز موقعیت روتور
۲۲	..... (۳-۱-۲-۲) میدل قدرت ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
۲۴	..... (۴-۱-۲-۲) کنترل کننده
۲۴	..... (۲-۲-۲) مزایای ماشین سوئیچ رلوکتانس
۲۶	..... (۳-۲-۲) معایب ماشین سوئیچ رلوکتانس
۲۸	..... (۴-۲-۲) ژنراتور سوئیچ رلوکتانس و دیگر ژنراتورهای بکار رفته برای تبدیل انرژی باد
۳۱	..... (۳-۲) تئوری عملکرد ماشین سوئیچ رلوکتانس
۳۱	..... (۱-۳-۲) منحنی‌های مغناطیسی

۳۲	..... شکل موج‌های جریان فاز و کنترل گشتاور (۲-۳-۲)
۳۷	..... محاسبه گشتاور (۳-۳-۲)
۴۱	..... شکل موج جریان خازن الکتrolیتی (۴-۳-۲)
۴۳	..... تلفات در ژنراتور سوئیچ رلوکتانس (۳)
۴۳	..... (۱-۳) مقدمه
۴۳	..... (۲-۳) محاسبه تلفات
۴۳	..... (۱-۲-۳) محاسبه تلفات آهنی هسته
۴۵	..... (۱-۱-۲-۳) روش محاسبه تلفات آهنی هسته
۴۷	..... (۲-۱-۲-۳) شکل موج‌های شار هسته و محاسبه تلفات آهنی
۴۹	..... (۲-۲-۳) تلفات مسی سیم پیچ‌ها
۵۱	..... (۳-۲-۳) تلفات الکترونیک قدرت
۵۲	..... (۴-۲-۳) محاسبه تلفات کل و بازده
۵۶	..... (۴) کنترل ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
۵۶	..... (۱-۴) مقدمه
۵۷	..... (۲-۴) مدهای کنترل ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
۵۷	..... (۱-۲-۴) کنترل تک پالس
۵۸	..... (۲-۲-۴) کنترل ولتاژ- PWM برشگری نرم
۵۹	..... (۳-۲-۴) کنترل جریان- برشگری سخت
۶۰	..... (۴-۲-۴) کنترل جریان- برشگری نرم
۶۱	..... (۳-۴) تحریک بهینه ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
۶۳	..... (۱-۳-۴) نگاشت مشخصه‌های ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
۶۶	..... (۲-۳-۴) انتخاب بهینه زوایای تحریک
۷۱	..... (۵) مدلسازی تحلیلی شار پیوندی در ماشین سوئیچ رلوکتانس
۷۱	..... (۱-۵) مقدمه
۷۲	..... (۲-۵) مدل تحلیلی انتخاب شده
۷۲	..... (۱-۲-۵) محاسبه تحلیلی اندوکتانس ماشین در حالت ناهمپوشانی قطب‌ها
۷۳	..... (۱-۱-۲-۵) سهم روتور در اندوکتانس حالت ناهمپوشانی
۷۴	..... (۲-۱-۲-۵) سهم استاتور در اندوکتانس حالت ناهمپوشانی

- ۷۵ ۳-۱-۲-۵) اندوکتانس مربوط به دوره‌های انتهایی سیم پیچ
- ۷۵ ۲-۲-۵) شار پیوندی با یک فاز در حالت همپوشانی قطب‌ها
- ۷۹ ۳-۲-۵) مشخصه‌های شار پیوندی فاز ژنراتور طراحی شده
- ۸۱ ۶) شبیه سازی ژنراتور سوئیچ رلوکتانس ۱۲/۸
- ۸۱ ۱-۶) بلوک شبیه سازی کل سیستم
- ۸۲ ۲-۶) بلوک شبیه سازی سیستم قدرت
- ۸۲ ۱-۲-۶) بلوک شبیه سازی فاز
- ۸۳ ۳-۶) بلوک کنترل ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
- ۸۴ ۱-۳-۶) بلوک شبیه سازی کنترل کننده مد تک پالس
- ۸۴ ۲-۳-۶) بلوک شبیه سازی کنترل کننده ولتاژ PWM برشگری نرم
- ۸۶ ۳-۳-۶) بلوک شبیه سازی کنترل کننده جریان مد برشگری سخت
- ۸۶ ۴-۳-۶) بلوک شبیه سازی کنترل کننده جریان مد برشگری نرم
- ۸۷ ۴-۶) بلوک اندازه گیری متغیرها و محاسبه تلفات جریانی
- ۸۷ ۵-۶) بلوک شبیه سازی شکل موج‌های شار و محاسبه تلفات آهنی
- ۸۹ ۱-۵-۶) بلوک شبیه سازی شکل موج شار قطب روتور
- ۸۹ ۲-۵-۶) بلوک شبیه سازی شکل موج شار طوقه روتور
- ۹۰ ۳-۵-۶) بلوک مشتق گیر شار
- ۹۱ ۴-۵-۶) بلوک شبیه سازی چگالی تلفات
- ۹۱ ۱-۴-۵-۶) بلوک شبیه سازی فرکانس معادل و دامنه تغییرات شکل موج شار
- ۹۲ ۱-۱-۴-۵-۶) بلوک شبیه سازی دامنه شکل موج شار
- ۹۳ ۲-۱-۴-۵-۶) بلوک شبیه سازی نمو شار و زمان
- ۹۳ ۳-۱-۴-۵-۶) بلوک شبیه سازی چگالی انرژی
- ۹۶ ۷) انتخاب پیکربندی و طراحی ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
- ۹۶ ۱-۷) طراحی ژنراتور سوئیچ رلوکتانس
- ۹۶ ۱-۱-۷) انتخاب تعداد فازها و قطب‌های استاتور و روتور
- ۱۰۳ ۲-۱-۷) انتخاب قطر و طول محور روتور
- ۱۰۴ ۳-۱-۷) انتخاب قطر استاتور و طول کلی ماشین
- ۱۰۵ ۴-۱-۷) انتخاب طول شکاف هوایی

۱۰۶	انتخاب کمانهای قطب استاتور و روتور (۵-۱-۷)
۱۰۸	انتخاب عمق شیار روتور (۶-۱-۷)
۱۰۹	انتخاب ضخامت طوقه روتور (۷-۱-۷)
۱۰۹	انتخاب قطر محور (۸-۱-۷)
۱۱۰	انتخاب ضخامت طوقه استاتور (۹-۱-۷)
۱۱۰	انتخاب عمق شیار استاتور (۱۰-۱-۷)
۱۱۱	انتخاب تعداد دور سیم پیچ‌های قطب استاتور (۱۱-۱-۷)
۱۱۱	انتخاب سطح مقطع و چگالی جریان سیم پیچ‌های قطب استاتور (۱۲-۱-۷)
۱۱۳	فلوچارت طراحی (۲-۷)
۱۱۴	ملاحظات نويز در طراحی ژنراتور سونیچ رلوکتانس (۳-۷)
۱۱۶	حذف نويز با روش کموتاسیون دو مرحله ای (۱-۳-۷)
۱۱۷	حذف نويز با طراحی ابعاد (۲-۳-۷)
۱۲۰	مشخصات و عملکرد ژنراتور طراحی شده (۴-۷)
۱۲۴	نتیجه گیری
۱۲۷	پیشنهادات
۱۲۸	مراجع
۱۳۳	ضمیمه (الف)
۱۳۴	ضمیمه (ب)
۱۳۴	ب-۱) ترانزیستور IGBT
۱۳۵	ب-۲) دیود قدرت بازیافت سریع

جدول ۷-۱- داده‌های ابعاد ژنراتورهای سه فاز	۹۶
جدول ۷-۲- داده‌های عملکرد ژنراتورهای سه فاز	۹۷
جدول ۷-۳- داده‌های ابعاد ژنراتورهای سه فاز	۹۸
جدول ۷-۴- داده‌های عملکرد ژنراتورهای سه فاز	۹۹
جدول ۷-۵- ترکیب‌های تعداد قطب استاتور بر روتور معتبر	۱۰۲
جدول ۷-۶- مقادیر نوعی TRV ، K و σ	۱۰۳
جدول ۷-۷- مقادیر نوعی برای نسبت قطر روتور به استاتور و کمانهای قطب	۱۰۵
جدول ۷-۸- مشخصات ژنراتور سوئیچ رلوکتانس ۱۲/۸ طراحی شده	۱۲۱
جدول ب-۱- مشخصات حداکثر در درجه حرارت محیط ۲۵ درجه	۱۳۴
جدول ب-۲- اندازه‌ها و مشخصات اصلی دیودهای قدرت	۱۳۵

- شکل ۱-۱-۱- مشخصه $C_r(\lambda, \beta)$ یک پروفایل پره نوعی ۵
- شکل ۱-۲-۱- مشخصه ضریب توان پروفایل پره نوعی ۶
- شکل ۱-۳-۱- مشخصه توان منحنی $C_p-\lambda$ پهن ۸
- شکل ۱-۴-۱- مشخصه توان منحنی $C_p-\lambda$ باریک ۸
- شکل ۱-۵-۱- عملکرد در نسبت سرعت قله ای بهینه ۱۲
- شکل ۱-۶-۱- ژنراتور سنکرون سرعت متغیر- دو مبدل پشت به پشت ۱۳
- شکل ۱-۷-۱- ژنراتور سنکرون سرعت متغیر- کنترل جریان میدان ۱۴
- شکل ۱-۸-۱- ژنراتور القائی- تحریک خازنی ۱۴
- شکل ۱-۹-۱- ژنراتور القائی- دو مبدل پشت به پشت ۱۵
- شکل ۱-۱۰-۱- ژنراتور القائی روتور سیم پیچی شده ۱۶
- شکل ۱-۲-۱- مقطع ماشین سوئیچ رلوکتانس $\lambda/6$ ۲۰
- شکل ۱-۲-۲- بلوک دیاگرام سیستم ژنراتور سوئیچ رلوکتانس ۲۱
- شکل ۱-۳-۲- مبدل قدرت نیم پل نامتقارن ۲۲
- شکل ۱-۴-۲- قطب‌های استاتور و روتور هم خطی و ناهم خطی ۳۲
- شکل ۱-۵-۲- منحنی‌های مغناطیسی ۳۲
- شکل ۱-۶-۲- شکل موج جریان در سرعت زیاد و حالت موتوری ۳۳
- شکل ۱-۷-۲- شکل موج جریان در سرعت زیاد و حالت ژنراتوری ۳۵
- شکل ۱-۸-۲- شکل موج جریان نوعی در سرعت کم ۳۷
- شکل ۱-۹-۲- تبدیل انرژی ۳۷
- شکل ۱-۱۰-۲- مسیرهای تحریک برای دو مد تک پالس و برشی ۳۹
- شکل ۱-۱۱-۲- مشخصه گشتاور نوعی ۴۰
- شکل ۱-۱۲-۲- شکل موج جریان سیم پیچ در 2 kW و 750 rpm ۴۰
- شکل ۱-۱۳-۲- شکل موج جریان سیم پیچ در 2 kW و 2000 rpm ۴۱
- شکل ۱-۱۴-۲- شکل موج جریان خازن الکترولیتی ۴۱
- شکل ۱-۳-۱- مشخصه‌های شار پیوندی ژنراتور نمونه $\lambda/6$ ۴۷
- شکل ۱-۳-۲- شکل موج‌های شار در قسمت‌های مختلف مدار مغناطیسی ۴۷
- شکل ۱-۳-۳- چگالی توان تلفاتی در قسمت‌های مختلف هسته ۴۸

- شکل ۳-۴- تلفات آهنی در قسمت‌های مختلف ژنراتور نمونه ۴۸
- شکل ۳-۵- تلفات آهنی کل بر حسب زاویه هدایت ۴۹
- شکل ۳-۶- شکل موج‌های جریان فاز ژنراتور بر حسب زاویه هدایت ۵۰
- شکل ۳-۷- جریان موثر فاز بر حسب زاویه هدایت ۵۰
- شکل ۳-۸- تلفات مسی بر حسب زاویه هدایت ۵۱
- شکل ۳-۹- تلفات الکترونیک قدرت بر حسب زاویه هدایت ۵۲
- شکل ۳-۱۰- تلفات متوسط کل بر حسب جریان موثر فاز ۵۳
- شکل ۳-۱۱- توان متوسط خروجی بر حسب زاویه هدایت ۵۳
- شکل ۳-۱۲- بازده بر حسب زاویه هدایت ۵۴
- شکل ۴-۱- سیستم کنترل نوعی ژنراتور ۵۶
- شکل ۴-۲- حالت‌های هدایتی در یک فاز ۵۷
- شکل ۴-۳- شکل موجهای عملکرد تک پالس ۵۸
- شکل ۴-۴- شکل موجهای PWM - برشگری نرم ۵۹
- شکل ۴-۵- شکل موجهای تنظیم جریان - برشگری سخت ۶۰
- شکل ۴-۶- شکل موجهای تنظیم جریان - برشگری نرم ۶۱
- شکل ۴-۷- نگاشت توان خروجی ژنراتور ۶۴
- شکل ۴-۸- نگاشت جریان موثر فاز ژنراتور ۶۴
- شکل ۴-۹- نگاشت تلفات ژنراتور ۶۵
- شکل ۴-۱۰- توان متوسط خروجی ژنراتور بر حسب زاویه روشن شدن ۶۵
- شکل ۴-۱۱- توان متوسط خروجی ژنراتور بر حسب زاویه هدایت ۶۶
- شکل ۴-۱۲- تمام نقاط کاری ممکن برای جریان موثر فاز ۶۶
- شکل ۴-۱۳- تمام نقاط کاری ممکن برای تلفات ۶۷
- شکل ۴-۱۴- نقاط انتخابی بر اساس حداقل جریان موثر فاز ۶۷
- شکل ۴-۱۵- نقاط انتخابی بر اساس حداقل تلفات در ژنراتور ۶۸
- شکل ۴-۱۶- زوایای روشن شدن بهینه بر حسب توان متوسط خروجی ۶۸
- شکل ۴-۱۷- زوایای هدایت بهینه بر حسب توان متوسط خروجی ۶۹
- شکل ۵-۱- مقایسه شار پیوندی روش المان محدود و تحلیلی برای ماشین ۱۲/۸ ۷۱
- شکل ۵-۲- وضعیت ناهمپوشانی با فرض مستطیل بودن شکل قطب‌ها ۷۳

- شکل ۳-۵- وضعیت ناهمپوشانی برای حل میدان در شیار استاتور..... ۷۴
- شکل ۴-۵- مسیرهای بسته آمپری برای محاسبه شدت میدان مغناطیسی..... ۷۵
- شکل ۵-۵- مدل ساده شده برای محاسبه فلوی پیوندی فاز در حالت هم پوشانی قطبها..... ۷۶
- شکل ۶-۵- مشخصه شار پیوندی فاز ژنراتور طراحی شده..... ۷۹
- شکل ۱-۶- شبیه سازی ژنراتور سوئیچ رلوکتانس سه فاز ۱۲/۸..... ۸۱
- شکل ۲-۶- بلوک شبیه سازی سیستم قدرت..... ۸۲
- شکل ۳-۶- بلوک شبیه سازی یک فاز ژنراتور..... ۸۳
- شکل ۴-۶- بلوک شبیه سازی کنترل کننده مد تک پالس..... ۸۴
- شکل ۵-۶- بلوک شبیه سازی کنترل کننده مد PWM نرم..... ۸۵
- شکل ۶-۶- بلوک شبیه سازی کنترل کننده جریان مد برشگری سخت..... ۸۵
- شکل ۷-۶- بلوک شبیه سازی کنترل کننده جریان مد برشگری نرم..... ۸۶
- شکل ۸-۶- بلوک اندازه گیری متغیرها و محاسبه تلفات جریانی..... ۸۷
- شکل ۹-۶- بلوک شبیه سازی شکل موج های شار و محاسبه تلفات آهنی..... ۸۸
- شکل ۱۰-۶- بلوک شبیه سازی شکل موج شار قطب روتور..... ۸۸
- شکل ۱۱-۶- بلوک شبیه سازی شکل موج شار طوقه روتور..... ۸۹
- شکل ۱۲-۶- بلوک مشتق گیر شار..... ۹۰
- شکل ۱۳-۶- بلوک شبیه سازی چگالی تلفات..... ۹۱
- شکل ۱۴-۶- بلوک شبیه سازی فرکانس معادل شکل موج شار..... ۹۲
- شکل ۱۵-۶- بلوک شبیه سازی دامنه شکل موج شار..... ۹۲
- شکل ۱۶-۶- بلوک شبیه سازی نمو شار و زمان..... ۹۳
- شکل ۱۷-۶- بلوک شبیه سازی چگالی انرژی..... ۹۴
- شکل ۱-۷- گشتاور بر واحد وزن طراحی های مختلف..... ۹۷
- شکل ۲-۷- حداکثر VA مورد نیاز کنترل کننده..... ۹۸
- شکل ۳-۷- ماشین سوئیچ رلوکتانس سه فاز ۶/۸..... ۱۰۰
- شکل ۴-۷- ماشین سوئیچ رلوکتانس سه فاز ۱۲/۸..... ۱۰۰
- شکل ۵-۷- ماشین سوئیچ رلوکتانس چهار فاز ۸/۶..... ۱۰۱
- شکل ۶-۷- مقطع یک ماشین نمونه با $L_{stk}/D_r=1$ ۱۰۴
- شکل ۷-۷- مثلث شدنی..... ۱۰۷

- شکل ۷-۸- فلوچارت طراحی ژنراتور سوئیچ رلوکتانس ۱۱۳
- شکل ۷-۹- شکل موجهای جریان، نیروی شعاعی و شتاب گیری شعاعی استاتور ۱۱۵
- شکل ۷-۱۰- حذف لرزش با روش کموتاسیون دو مرحله ای ۱۱۶
- شکل ۷-۱۱- پارامترهای ابعاد استاتور ۱۱۷
- شکل ۷-۱۲- مقطع ماشین های اولیه و پیشنهادی ۱۱۸
- شکل ۷-۱۳- ساختارهای مختلف برای طوقه استاتور ۱۱۸
- شکل ۷-۱۴- شکل های مختلف برای قطب استاتور ۱۱۹
- شکل ۷-۱۵- مقطع ژنراتور ۱۲/۸ طراحی شده ۱۲۰
- شکل ۷-۱۶- زوایای تحریک ۱۲۱
- شکل ۷-۱۷- توان خروجی ژنراتور بر حسب سرعت و زوایای تحریک انتخاب شده ۱۲۲
- شکل ۷-۱۸- بازده ژنراتور بر حسب سرعت و زوایای تحریک انتخاب شده ۱۲۲
- شکل ب-۱- نمای IGBT ۱۳۴
- شکل ب-۲- مشخصه خروجی ترانزیستور ۱۳۴
- شکل ب-۳- نحوه کدگذاری دیودها ۱۳۵
- شکل ب-۴- مشخصه افت ولتاژ مستقیم دیود ۱۳۵

فصل اول

مقدمه و مروری بر سیستم های

ژنراتوری توربین بادی