

اصول مدل‌سازی، طراحی و تحلیل ژنراتورهای شار متقاطع اتصال مستقیم برای توربین‌های بادی مقیاس کوچک

نویسندگان:

دکتر رضا نصیری زرنندی

(عضو هیئت علمی گروه ماشین‌های الکتریکی-پژوهشگاه نیرو)

مهندس احمد رضا کرمی شهنایی

(پژوهشگر گروه ماشین‌های الکتریکی-پژوهشگاه نیرو)

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

نصیری زرنندی، رضا، ۱۳۶۴-

اصول مدل سازی، طراحی و تحلیل ژنراتورهای شار متقاطع اتصال مستقیم برای توربین های بادی مقیاس کوچک / نویسندگان رضا نصیری زرنندی و احمد رضا کرمی شهنائی؛ ویراستار ادبی نازنین محمدی نام. تهران: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

غ ، ۲۸۶ص.مصور، جدول، نمودار.

ISBN: ۹۷۸-۶۲۲-۹۸۰۰۱-۴-۰

فهرست نویسی بر اساس اطلاعات فیفا
کتابنامه

۱. توربین های بادی — طراحی و ساخت. ۲. توربین های بادی — ایران. ۳. مولدهای برق سرعت متغیر.
۴. Wind turbines -- Design and construction ۵. Wind turbines -- Iran ۶. Variable speed generators

الف. کرمی شهنائی، احمد رضا، ۱۳۷۷- ب. عنوان

شماره کتابشناسی ملی: ۷۷۲۷۵۱۴ رده بندی دیویی: ۶۲۱/۳۱۲۱۳۶

www.ketab.ir

انتشارات پژوهشگاه نیرو

نوبت چاپ: تابستان ۱۴۰۰

قیمت: ۸۰۰،۰۰۰ ریال

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

پیشگفتار

کتابی که در دست دارید در سه بخش و هشت فصل تدوین شده است که حاصل تحقیقات مؤلفان، در یک پروژه‌ی تحقیقاتی در گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی پژوهشگاه نیرو است. قسمت‌های مختلفی از نتایج تحقیقات این پروژه در مجلات معتبر بین‌المللی به چاپ رسیده و مقالات ارزنده‌ای نیز در کنفرانس‌های بین‌المللی و ملی ارائه شده است. با توجه به نیاز جامعه‌ی دانشگاهی به ارتباط هر چه بیشتر با صنعت، در این کتاب علاوه بر نکات صنعتی و مباحث روز انرژی در حوزه‌ی انرژی بادی، مراحل مدل‌سازی، طراحی و بهینه‌سازی گام به گام یک مولد برای توربین بادی مقیاس کوچک ارائه شده است. جهت استفاده‌ی هر چه بهتر از این تجربه، نتایج تحقیقات صورت‌پذیرفته در قالب کتاب پیش رو آماده شده و در اختیار پژوهشگران قرار گرفته است.

امروزه با توجه به افزایش جمعیت کره زمین و پیشرفت روزافزون صنعت و فناوری، نیازمندی مردم دنیا به استفاده از انرژی افزایش بی‌سابقه‌ای داشته است. عواملی مانند محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی، پراکندگی این منابع بین کشورها، ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی و نوسان قیمت آن به دلیل مناسبات سیاسی، موجب شده است تا جستجو برای یافتن منابع تولید انرژی به‌ویژه منابع پاک و تجدیدپذیر و نیز نحوه‌ی تولید انرژی از آن منابع، مورد توجه تمام کشورهای صنعتی قرار گیرد. یکی از مصادیق انرژی‌های پاک، استحصال انرژی از باد است. از این رو، در فصل اول ضمن معرفی مختصر توربین‌های بادی، مناطق بادخیز کشور ایران بررسی شده است. با رویکرد توسعه‌ی استفاده از انرژی باد در سطوح توانی کم، فصل دوم کتاب به شناسایی و معرفی انواع توربین‌های بادی کم‌توان پرداخته است. علاوه بر بررسی ویژگی‌های هر کدام، تعدادی از نمونه‌های تجاری از توربین‌های کم‌توان افق-محور و عمود-محور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در فصل سوم کتاب حاضر، به بررسی انواع ژنراتورهای استفاده‌شده در توربین‌های بادی پرداخته شده است. در توربین‌های بادی هر سه نوع ژنراتور یعنی ژنراتورهای جریان مستقیم (DC)، ژنراتورهای القائی و ژنراتورهای سنکرون می‌توانند جهت تولید توان مورد استفاده قرار بگیرند. در توربین‌های سرعت ثابت، ژنراتور به‌طور مستقیم به شبکه متصل می‌شود، بنابراین سرعت ژنراتور و در نتیجه پره‌ها ثابت است. به عبارت دیگر، سرعت توربین تابعی از فرکانس شبکه خواهد بود و تنها تا ۲ درصد می‌تواند تغییر کند. در سیستم‌های سرعت متغیر، سرعت روتور به فرکانس شبکه وابسته نخواهد بود و برای سرعت‌های مختلف باد می‌توان به نسبت بهینه سرعت نوک پره جهت افزایش بهره‌وری رسید. در این فصل پس از بررسی

عملکرد انواع ژنراتورها برای کاربرد در توربین‌های بادی کم‌توان، به محدودیت‌های اعمالی از طرف توربین بر ژنراتور نیز پرداخته شده است.

دسته‌ای جدید از ماشین‌های مخصوص که قابلیت استفاده در توربین‌های بادی را دارند، ماشین‌های شارمقاطع هستند. ماشین‌های شارمقاطع در قسمت تحریک خود از آهنربای دائم بهره می‌گیرند که به‌استثنای ماشین‌های ترکیبی شار سوئیچ‌شونده‌ی شار مقاطع، آهنربا در قسمت روتور قرار دارد. ساختار منحصربه‌فرد این ماشین‌ها امکان جای دادن تعداد قطب‌های زیاد را در ساختار ماشین فراهم می‌کند و بنابراین حصول گشتاور بالا در سرعت‌های پایین در این ماشین‌ها امکان‌پذیر است. این ویژگی منحصربه‌فرد موجب می‌شود که ماشین‌های شارمقاطع در دسته‌ی ماشین‌های سرعت‌پایین و دارای چگالی گشتاور بالا قرار بگیرند. بنابراین ماشین‌های شارمقاطع می‌توانند برای توربین‌های بادی اتصال مستقیم که نیازمند چگالی گشتاور بالا و سرعت کارکرد پایین هستند گزینه‌ی مناسبی باشند. در فصل چهارم انواع ساختار ماشین‌های شار مقاطع به همراه اصول عملکرد آنها موردبررسی قرار گرفته است. فصل پنجم به نحوه‌ی مدل‌سازی ماشین‌های شار مقاطع می‌پردازد. روش مدار معادل مغناطیسی یک روش تحلیلی برای ماشین‌های الکتریکی است. این روش با استفاده از ترسیم مدار معادل مغناطیسی ماشین در هر لحظه و حل معادلات حاکم بر مدار، عملکرد ماشین را تحلیل می‌کند. پس از روش اجزای محدود، روش مدار معادل مغناطیسی، یکی از دقیق‌ترین روش‌های تحلیل ماشین‌های الکتریکی است. اما به لحاظ سرعت محاسبات، نسبت به روش اجزای محدود حداقل ۴ برابر سریع‌تر است و نیاز به سیستم کامپیوتر گران‌قیمت و پیشرفته ندارد. این مسئله در ماشین‌هایی که دارای مسیر شار سه‌بعدی هستند مانند ماشین شار محوری و ماشین شار مقاطع قوت می‌گیرد، چراکه در این ماشین‌ها امکان اعمال روش اجزای محدود به‌صورت دوبعدی وجود ندارد و مجبور به استفاده از مدل سه‌بعدی خواهیم بود که موجب افزایش چشم‌گیر مش‌بندی و زمان پردازش می‌گردد.

روند طراحی یک نمونه ژنراتور شار مقاطع با هدف استفاده در توربین‌های بادی اتصال مستقیم در فصل شش ارائه شده است. با مطالعه‌ی این فصل از کتاب، پژوهشگران قادر به طراحی این نوع ماشین در سطوح توانی مختلف خواهند بود. در ادامه به‌منظور بررسی اثر پارامترهای طراحی بر عملکرد ژنراتورهای شار مقاطع، از روش بهینه‌سازی طراحی آزمون‌ها برای شناسایی و انتخاب پارامترهای بهینه استفاده شده است.

روش طراحی آزمایشات به‌منظور یافتن ترکیب خاصی از فاکتورهای اثرگذار در خروجی است، به‌نحوی که بهترین خروجی ممکن حاصل شود. روش فاکتوریل کامل، دقیق‌ترین و کامل‌ترین روش ممکن در طراحی آزمایشات به‌شمار می‌آید؛ اما در عوض روشی زمان‌بر و حتی پرهزینه است. روش‌هایی برای کاهش تعداد آزمایش‌ها معرفی شدند که به روش‌های فاکتوریل جزئی مرسوم هستند. روش طراحی آزمایشات تاگوچی، یکی از روش‌های فاکتوریل جزئی است که تأثیر چشمگیری در کاهش تعداد آزمایش‌ها دارد. فصل هفتم

این کتاب به صورت گام به گام، نمونه ژنراتور طراحی شده در فصل‌های پیشین را با استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوشی بهینه‌سازی می‌کند. در تمامی مراحل، عملکرد الکترومغناطیسی ماشین با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی به روش اجزا محدود مورد بررسی و صحت‌سنجی قرار می‌گیرد. در نهایت در فصل هشتم به کمک روش اجزا محدود عملکرد حرارتی ژنراتور بهینه ارزیابی شده و روش‌های تحلیل حرارتی بیان می‌شوند.

بر خود واجب می‌دانیم تا از زحمات استاد گران قدر جناب آقای دکتر کریم عباس‌زاده استاد محترم دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی به جهت راهنمایی‌های ایشان تشکر ویژه داشته باشیم. همچنین از آقایان، مهندس عقیل قاهری و اکبر محمدی عجملو بابت همکاری‌شان در بخش‌هایی از پروژه تشکر و قدردانی می‌گردد. امید است کتاب پیشرو برای دانشجویان فعال در حوزه‌ی ماشین‌های الکتریکی مفید واقع شود.

www.ketab.ir

فهرست

بخش اول

مقدمه‌ای بر انواع توربین‌های بادی و بررسی توربین‌های بادی توان‌باین با اتصال مستقیم

فصل ۱ «معرفی توربین‌ها بادی و بررسی نقاط بادخیز کشور» ۲

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- توربین‌های بادی ۳

۱-۲-۱- توربین‌های افق‌محور ۳

۱-۲-۲- توربین‌های عمودمحور ۱۱

۱-۳- نمونه‌هایی از توربین‌های عمودمحور ساخته‌شده در جهان ۱۹

۱-۴- بررسی نقاط بادخیز ایران ۲۱

مراجع ۲۸

فصل ۲ «بررسی مشخصات توربین‌های بادی توان‌باین با رویکرد اتصال مستقیم» ۲۹

۲-۱- مقدمه ۲۹

۲-۲- انواع توربین‌های کم‌توان ۲۹

۲-۳- مقایسه توربین‌های افق‌محور و عمودمحور کم‌توان ۴۰

مراجع ۴۳

بخش دوم

بررسی انواع ژنراتورهای استفاده شده در توربین های بادی و استخراج قیود ژنراتور شار متقاطع در توربین بادی

فصل ۳ «انواع ژنراتورهای قابل استفاده در توربین های بادی، ساختار، مزایا و معایب».....۴۵

۴۵.....	مقدمه.....	۳-۱-
۴۷.....	ژنراتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم.....	۳-۲-
۴۸.....	ژنراتور القایی قفس سنجابی.....	۳-۳-
۴۹.....	ژنراتور القایی با روتور تغذیه شده دوسویه.....	۳-۴-
۵۰.....	ژنراتور سنکرون روتور سیم پیچی شده.....	۳-۵-
۵۲.....	ژنراتور سنکرون آهنربای دائم.....	۳-۶-
۵۲.....	ژنراتور سنکرون آهنربای دائم شار شعاعی.....	۳-۷-
۵۷.....	ژنراتور سنکرون آهنربای دائم شار محوری.....	۳-۸-
۶۱.....	ژنراتور آهنربای دائم شار متقاطع.....	۳-۹-
۶۳.....	مقایسه و نتیجه گیری.....	۳-۱۰-
۷۳.....	محدودیت های اعمالی به ژنراتور در توربین های بادی اتصال مستقیم.....	۳-۱۱-
۷۷.....	روش های کاهش گشتاور دندانه ای.....	۳-۱۲-
۸۲.....	گرمایش ژنراتور.....	۳-۱۳-
۸۶.....	مراجع.....	

فصل ۴ «ماشین های شار متقاطع، ساختار و اصول عملکرد».....۸۹

۸۹.....	مقدمه.....	۴-۱-
۹۰.....	انواع ساختارهای ماشین شار متقاطع و سیر تحول آن.....	۴-۲-
۹۶.....	معادلات خروجی ماشین.....	۴-۳-
۹۶.....	روابط گشتاور و توان ماشین سنکرون آهنربای دائم.....	۴-۳-۱-

۹۸.....	۲-۳-۴- روابط خروجی ماشین شار متقاطع...
۱۰۵.....	مراجع

بخش سوم

مدل سازی، طراحی و بهینه سازی ژنراتور

۱۰۷.....	فصل ۵ «مدل سازی ماشین شار متقاطع به روش تحلیلی»
۱۰۸.....	۱-۵- مقدمه
۱۰۸.....	۲-۵- پرمانس های شبکه
۱۱۶.....	۳-۵- منابع شبکه
۱۱۸.....	۴-۵- شبکه پرمانسی
۱۱۸.....	۵-۵- رابطه گشتاور و ولتاژ
۱۱۹.....	۶-۵- اعمال اثر اشباع هسته
۱۲۰.....	۷-۵- خروجی و مقایسه مدل سازی به روش MEC و FEA
۱۲۳.....	۸-۵- ارائه و مدل سازی ماشینی مبتنی بر چیدمان آرایه‌ی هالباخ
۱۲۴.....	۱-۸-۵- آرایه‌ی هالباخ با دو قطعه آهنربا بر قطب
۱۲۷.....	۲-۸-۵- آرایه‌ی هالباخ با سه قطعه آهنربا بر قطب
۱۳۰.....	۳-۸-۵- آرایه‌ی هالباخ با چهار قطعه آهنربا بر قطب
۱۳۳.....	۹-۵- تحلیل ساختارهای مبتنی بر چند پشته
۱۳۳.....	۱-۹-۵- ساختار تک فاز
۱۴۰.....	۲-۹-۵- ساختار دو فاز
۱۴۱.....	۳-۹-۵- ساختار سه فاز
۱۴۳.....	۴-۹-۵- ساختار پنج فاز
۱۴۷.....	۱۰-۵- مقایسه ساختارهای چند فاز