بسم الله الرحمن الرحیم

بسمه تعالی

دانشگاه زنجان

دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

عنوان:

ساختار توربین های بادی و نحوه عملکرد ژنراتور القایی تغذیه دوگانه

نگارش:

رضا محمدی

استاد راهنما:

دکتر سعید جلیل زاده

پایان‌نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی در

رشته‌ی مهندسی برق- قدرت

اسفند ۱۳۹۱

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب رضا محمدی تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده‌است طبق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه‌ی حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه زنجان می‌باشد.

رضا محمدی

تقدیم به دو عشق پاک زندگی ام، پدر و مادرم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آن ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی بر بودنم. چرا که این دو وجود پس از آفریدگار مایه هستی ام بوده اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموخته اند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند.

حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم به آنان . . .

سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانم از استاد گرانقدرم، جناب آقای دکتر جلیل زاده که در طول این پروژه همواره اینجانب را دلسوزانه راهنمایی کرده‌اند و کاستی‌ها و کمبودهای بنده را با صبر و تحمل خاص خودشان گوشزد کرده‌اند، صمیمانه سپاسگزاری نمایم.

فهرست

۱- مقدمه ۱

۲- تاریخچه ۲

۳- اهمیت انرژی باد ۴

۴- تبدیل انرژی باد ۷

۵- روابط انرژی بادی ۸

۶ - روش های کنترل توان ورودی توربین باد ۱۱

۷ - انواع ساختارهای تبدیل انرژی باد به الکتریکی ۱۲

۸ - ساختارتوربین‌های بادی ۱۲

۸ – ۱- توربین‌های سرعت ثابت ۱۲

۸ – ۲ - توربین‌های سرعت متغیر ۱۴

۹- ژنراتور القایی تغذیه دوگانه ۱۵

۱۰ - مدار معادل و معادلات DFIG ۱۸

۱۱- ساختارهای مختلف مبدل الکترونیک قدرت برای ژنراتورهای بادی ۲۲

۱۱- ۱- مبدل دو سطحی پشت به پشت ۲۲

۱۱- ۲- مبدل یک طرفه ۲۳

۱۱- ۳- مبدل های چند سطحی ۲۴

۱۱- ۴- مبدل مدولار ۲۵

۱۲- مدل لینک D.C. ۲۶

۱۳ - کنترل توان و سرعت در توربین ۲۷

۱۴ - فهرست مراجع ۲۹

۱ـ مقدمه

در گذشته اکثر انرژی الکتریکی تولیدی در جهان، توسط منابع غیرتجدیدپذیر تامین می‌شد و منابع تجدیدپذیر سهم اندکی را در تولید انرژی الکتریکی داشتند. اما در سال‌های اخیر رشد چشم‌گیری در تولید انرژی الکتریکی توسط منابع تجدیدپذیر صورت گرفته و صنایع و دولت‌ها هزینه‌ی زیادی را صرف پروژه‌های این صنعت می‌کنند. دلایلی نظیر افزایش هزینه‌ی سوخت‌های فسیلی، مسائل زیست محیطی و آلودگی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، کشورها را به سمت استفاده از منابع تجدیدپذیر سوق داده است.

در این میان تولید انرژی بادی دارای مزیت‌هایی است که آن را از دیگر منابع تجدیدپذیر متمایز می‌سازد. اول آن که در تمام دنیا انرژی باد به صورت گسترده و وسیع در دسترس می‌باشد و دوم اینکه نسبت به دیگر منابع تجدیدپذیر مانند سلول خورشیدی دارای هزینه‌ی نصب پایین‌تر بوده و بسیار با محیط سازگار است. در این بین توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القائی تغذیه دوگانه، به عنوان ساختاری که بخش وسیعی از این صنعت را به خودش اختصاص داده، در این پایان‌نامه مورد مطالعه قرار گرفته است.

در این پایان‌نامه ابتدا به اهمیت انرژی باد پرداخته و سپس روابط اساسی تولید انرژی بادی ارائه می‌شود. در ادامه انواع مختلف توربین‌های بادی به طور خلاصه معرفی شده و ساختار ژنراتور القائی تغذیه دوگانه به عنوان موضوع اصلی این پایان‌نامه به تفصیل توضیح داده می‌شود.

۲ـ تاریخچه

تاریخچه استفاده از باد به عنوان منبعی برای انرژی به بیش از ۵۰۰۰ سال پیش و در کشتی ها باز می گردد. سالها بعد، از انرژی باد برای پمپاژ کردن آب و آسیاب کردن غلات استفاده می شد که به حدود ۲۰۰ سال قبل از میلاد باز می گردد. استفاده از انرژی باد طی قرون اخیر افزایش زیادی یافت تا آنجا که پیش از انقلاب صنعتی بالغ بر ۱۰۰۰۰ آسیاب بادی در انگلستان مورد استفاده قرار می گرفتند که با پیدایش ماشین بخار بخش اعظمی از آنها بلا استفاده شدند.

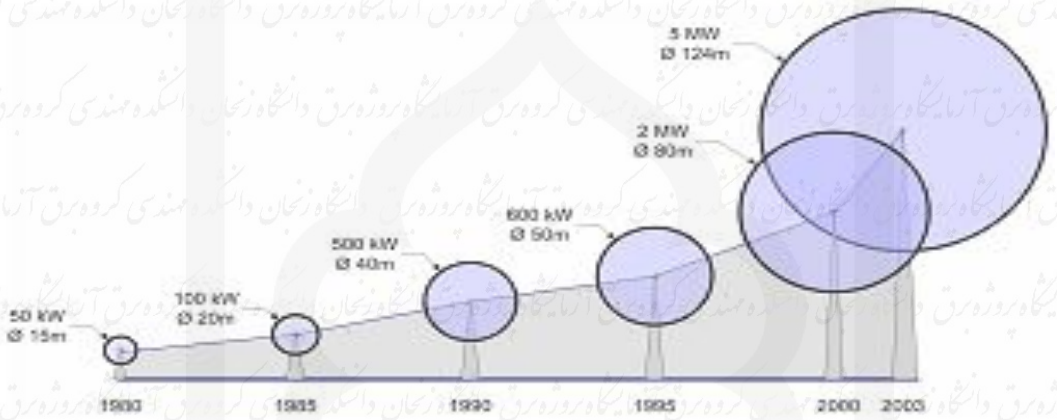
استفاده از انرژی باد صرفا مربوط به انرژی مکانیکی آن بود تا اینکه اولین بار در اواخر قرن ۱۹ میلادی، از باد به عنوان منبع تولید انرژی الکتریکی استفاده شدکه از جمله موارد آن می توان به ژنراتور با ظرفیت KW ۱۲ و توربینی با قطر رتور ۱۷ متر در کلیوند اوهایو در سال ۱۸۸۸ اشاره کرد.

در سال ۱۹۲۵، ژنراتورهای بادی با توان KW ۰/۲ تا KW ۳ برای شارژ باطری در ایالات متحده وارد بازار شدند. این روند ادامه داشت تا ساخت و توسعه توربین های بادی بزرگ اولین بار در کریمه، با توربین KW ۱۰۰ و قطر روتور ۳۰ متر آغاز شد. پس از آن توربین KW ۱۲۵ با قطر روتور ۵۳ متر در سال ۱۹۴۱ در Vermont ایالات متحده و توربین KW ۲۰۰ با قطر روتور ۲۴ متر در سال ۱۹۵۶ در دانمارک و توربین MW ۱/۱ با قطر روتور ۳۵ متر در سال ۱۹۶۳ ساخته شدند.

در این سالها قیمت پایین نفت مانعی برای سرمایه گذاری گسترده در بخش انرژی بادی محسوب می شد. اما با افزایش ناگهانی قیمت نفت در اوایل دهه هفتاد، سرمایه گذاری گسترده تری در این بخش شد. از این رو دهه هفتاد را می توان نقطه عطفی در صنعت انرژی باد به شمار آورد. از جمله توربین های ساخته شده در این دوره، می توان به توربین mod 5B در آمریکا با قطر روتور ۹۷/۵ متر و توان MW ۳/۲ و توربین mod LS-1 با قطر روتور ۶۰ متر و توان MW ۳ در انگلستان اشاره کرد.

در ابتدا از طرحهای مختلفی نظیر توربین های با محورچرخش قائم مورد استفاده قرار می گرفت اما به تدریج سازندگان رو به ساخت توربینهای بادی با ۳ پره و سرعت ثابت با تنظیم قفل شدگی و رتور جلوی برج آوردند. با بزرگتر شدن توربین ها و افزایش ظرفیت آن ها، تغییراتی در این ساختار ایجاد شد که باعث به کارگیری مفاهیمی چون عملکرد سرعت متغیر و تنظیم زاویه گام شد.

امروزه توربین های چندین مگاواتی برای کاربردهای مختلف ارائه می شود اما بزرگترین توربینی که تاکنون در بازار عرضه شده توربین E-126 متعلق به شرکت ENERCON با توان 7 MW و قطر ۱۲۶ متر می باشد. در شکل زیر روند افزایش توان و اندازه توربین های بادی در سال های اخیر مشاهده می شود.



شکل(۱): روند افزایش توان و اندازه توربین های بادی طی ۲۵ سال اخیر

شکل (۲) : نمونه ای از پره توربین های چندین مگاواتی

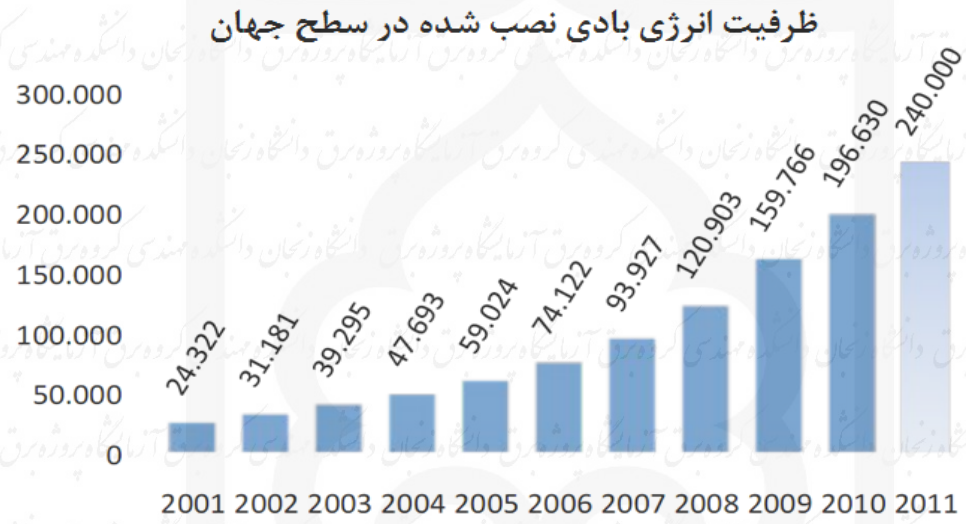
۳ـ اهمیت انرژی باد

اهمیت و ارزش انرژی بادی را می‌توان در توسعه، رقابتی شدن و آینده‌ی آن جستجو کرد. پیشرفت و توسعه‌ی این صنعت تا حدود زیادی وابسته به حمایت‌های مالی دولت‌ها و نوسانات قیمت انرژی در بازارهای جهانی بوده است. از این رو در دهه‌های مختلف اهمیت و نقش متفاوتی در تامین انرژی بشر ایفا کرده است. شاید بتوان شروع رقابتی شدن این انرژی را از سال ۱۹۷۳ و با افزایش ناگهانی قیمت نفت و سوخت‌های فسیلی دانست. از این سال به بعد، حمایت‌های دولتی با تصویب قانون‌های حمایت مالیاتی و تعرفه‌ای از این صنعت افزایش یافت که منجر به پیشرفت در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ شد. با آغاز دهه‌ی ۹۰ و کاهش قیمت نفت، نقش انرژی باد کم رنگ شد و کم‌کم به عنوان انرژی برای نسل آینده از آن یاد می‌شد. با این وجود در این دهه، قیمت انرژی بادی به طور متوسط Cent/KWh ۸ کاهش پیدا کرد که موجب رقابتی شدن این صنعت در اواخر دهه شد.

تا حدود زیادی دهه‌ی ۹۰ را می‌توان متعلق به اروپاییان دانست، در این زمان اتحادیه اروپا با تصویب تعرفه بر روی تولیدات بادی، راه را برای توسعه‌ی این صنعت فراهم کرد، که باعث پیشی گرفتن کشورهایی چون آلمان، اسپانیا و دانمارک در این صنعت شد. یکی از عوامل محرک در این دهه، درخواست کمیسیون اتحادیه اروپا در سال ۱۹۹۷ مبنی بر تولید ۱۲٪ از کل انرژی، معادل GW ۱۲ در سال ۲۰۱۰ از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر بود که این نسبت بعدها به ۲۰٪ رسید.

ایالات متحده آمریکا تا قبل از سال ۱۹۹۸، دهه‌ی بی رونقی را در این صنعت سپری کرده بود، تا این که در این سال با تصویب قانون کاهش مالیاتی (FPTC) با مضمون این‌که طرح‌های اتمامی قبل از ژوئن ۱۹۹۹، در ده سال اول عملکردشان شامل ۱/۶ تا Cent/KWh ۱/۷ معافیت مالیاتی می‌شوند، جان تازه‌ای به این صنعت در آمریکا داد. رشد انرژی بادی از اوایل دهه‌ی ۹۰ تاکنون به طور متوسط هر سه سال یک بار دو برابر بوده است. عوامل زیست‌محیطی و تولید گازهای گلخانه‌ای، وجه دیگری از تولید انرژی است که امروزه از دغدغه‌های جامعه‌ی بشری به شمار می‌آید. امروزه تولید و مصرف انرژی ناشی از سوخت‌های فسیلی باعث به‌وجود آمدن ۵۰٪ تا ۶۰ ٪ گازهای گلخانه‌ای موجود در جو می‌باشد.

از طرف دیگر آینده‌ی سوخت‌های فسیلی نامشخص و برآوردها حاکی از دوام این منابع تا ۲۵۰ سال آینده در صورت ثابت ماندن نرخ مصرف است. نکته حائز اهمیت دیگر، رشد مصرف انرژی است که در بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۶ برای کشورهای توسعه یافته ۵/۱ ٪ و برای کشورهای در حال توسعه ۲/۳ ٪ بوده است. از این رو انرژی باد با داشتن مزایایی از قبیل فزونی مناطق بادخیز، تجدیدپذیری، وسعت جغرافیایی، پاک بودن و عدم تولید گازهای گلخانه‌ای و همچنین با داشتن بیشترین رشد در سال‌های اخیر، پتانسیل بالایی برای داشتن سهم بیشتر در تولید انرژی را دارا است. در شکل (۳) میزان ظرفیت انرژی بادی نصب شده در بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ در سطح جهان نشان داده شده است.



شکل (۳) : میزان ظرفیت انرژی بادی نصب شده در سطح جهان برحسبMW

در پایان سال ۲۰۱۰ ظرفیت نصب شده‌ی ژنراتورهای بادی ۱۹۶/۶۳ گیگا وات بوده، که نسبت به سه سال قبل از آن دو برابر شده است. میزان انرژی تولیدی توسط این ژنراتورها ۴۳۰ تراوات ساعت بوده که معادل ۲/۵ ٪ کل انرژی الکتریکی مصرفی بشر می‌باشد. هم اکنون نیز تعدادی از کشورهای اروپایی در زمینه‌ی استفاده از انرژی باد به ضرایب نفوذ بالایی دست یافته‌اند، به طوری که دانمارک با ضریب نفوذ ۲۱٪ ، پرتغال ۱۸٪ و اسپانیا ۱۶٪ از کشورهای پیش‌تاز در این زمینه محسوب می‌شوند. در جدول (۱) بزرگترین کشورهای تولیدکننده انرژی بادی به ترتیب ظرفیت نصب شده‌ی کل، همراه با نحوه‌ی افزایش ظرفیت تولید انرژی بادی آنها در ۵ سال اخیر آورده شده‌است.

جدول (۱) : میزان ظرفیت انرژی بادی نصب شده درکشورهای مختلف برحسب MW

رتبه	کشور	سال				
		۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰
۱	چین	۲۵۹۹	۵۹۱۲	۱۲۲۱۰	۲۵۸۱۰	۴۴۷۳۳
۲	آمریکا	۱۱۵۷۵	۱۶۸۲۳	۲۵۲۳۷	۳۵۱۵۹	۴۰۱۸۰
۳	آلمان	۲۰۶۲۲	۲۲۲۴۷/۴	۲۳۸۹۷	۲۵۷۷۷	۲۷۲۱۵
۴	اسپانیا	۱۱۶۳۰	۱۵۱۴۵/۱	۱۶۶۸۹	۱۹۱۴۹	۲۰۶۷۶
۵	هند	۶۲۷۰	۷۸۵۰	۹۵۸۷	۱۱۸۰۷	۱۳۰۶۵/۸
۶	ایتالیا	۲۱۲۳/۴	۲۷۲۶/۱	۳۷۳۶	۴۸۵۰	۵۷۹۷
۷	فرانسه	۱۵۶۷	۲۴۵۵	۳۴۰۴	۴۵۷۴	۵۶۶۰
۸	انگلیس	۱۹۶۲/۹	۲۳۸۹	۳۱۹۵	۴۰۹۲	۵۲۰۳/۸
۹	کانادا	۱۴۶۰	۱۸۴۶	۲۳۶۹	۳۳۱۹	۴۰۰۸
۱۰	دانمارک	۳۱۳۶	۳۱۲۵	۳۱۶۳	۳۴۶۵	۳۷۳۴
۱۱	پرتقال	۱۷۱۶	۲۱۳۰	۲۸۶۲	۳۳۵۷	۳۷۰۲
۱۲	ژاپن	۱۳۰۹	۱۵۲۸	۱۸۸۰	۲۰۸۳	۲۳۰۴
۱۳	هلند	۱۵۵۹	۱۷۴۷	۲۲۳۵	۲۲۲۳	۲۲۳۷
۱۴	سوئد	۵۷۱/۲	۸۳۱	۱۰۶۶/۹	۱۴۴۸/۲	۲۰۵۲
۱۵	استرالیا	۸۱۷/۳	۸۱۷/۳	۱۴۹۴	۱۸۷۷	۱۸۸۰
۱۶	ایرلند	۷۴۶	۸۰۵	۱۰۲۷	۱۳۱۰	۱۴۲۸
۱۷	ترکیه	۶۴/۶	۲۰۶/۸	۳۳۴/۴	۷۹۶/۵	۱۲۷۴
۱۸	یونان	۷۵۷/۶	۸۷۳/۳	۹۸۹/۷	۱۰۸۶	۱۲۰۸
۱۹	لهستان	۱۵۳	۲۷۶	۴۷۲	۷۲۵	۱۱۰۷
۲۰	اتریش	۹۶۴/۵	۹۸۱/۵	۹۹۴/۹	۹۹۵	۱۰۱۰/۶
۳۹	ایران	۴۷/۴	۶۶/۵	۸۲	۸۲	۱۰۰

نکته‌ی قابل توجه، رشد و توسعه‌ی انرژی بادی در کشور چین است که با ظرفیت کل نصب شده‌ی ۴۴۷۳۳ مگاوات در رتبه‌ی اول جهان قرار گرفته است. کشور ایران نیز با ظرفیت کل نصب شده‌ی۱۰۰ مگاوات در رتبه سی نهم جهان قرار دارد. با توجه به پیشرفت سریع در زمینه‌ی استفاده از انرژی باد، پیش‌بینی می‌شود در ده سال آینده، میزان توان نصب شده از ۱۹۶/۶۳ گیگاوات در سال ۲۰۱۰ به حدود ۶۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۱۵ و بیش از ۱۵۰۰ گیگاوات در سال ۲۰۲۰ برسد، که معادل ۱۰٪ کل تولید انرژی الکتریکی جهان می‌باشد.

۱۴ ـ فهرست مراجع

[1] "World Wind Energy Report " *10th World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition*, Nov.2011

[2] T. Ackerman, Wind Power in Power Systems. Hoboken, NJ: Wiley, 2005

[3] Florin lov, and Frede Blaabjerg, "Power electronic and Control for Wind Power Systems," *Power Electronics and Machines in Wind Application (PEMWA)2009*, IEEE.2009, pp.1-16.

[4] F. Lov, M. Ciobotaru, and F. Blaabjerge, "Power Electronics Control of Wind Energy in Distributed Power Systems," *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)2008*, IEEE.2008, pp.XXIX-XLIV.

[5] M. Tazil, V. Kumar, R. C. Bansal, S. Kong, Z. Y. Dong, W. Freitas, and H. D. Mathur, "Three Phase Doubly Fed Induction Generators:an overview," *IET Electric Power Application*, Vol.4, Iss.2, pp.75-89, Feb.2010.

[6] Gonzalo Abad, Jesus Lopez, Miguel A. Rodriguez, Luis Marroyo, and Gregorz Iwanski , "Doubly Fed Induction Machine Modeling and Control for Wind Energy Generation Applications," *Wiley-IEEE Press*, 2011.

[7] Zhe Chen, Josep M. Guerrero, and Frede Blaabjerg, "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines," *IEEE Transactions on Power Electronic*, Vol.24, No.8, August.2009.

[8] Shuhui Li, Tim A. Haskew, and Jeff Jakson, "Power Generation Characteristic Study of Integrated DFIG and its Frequency Converter," *Power and Energy Society General Meeting Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21th Century 2008*, IEEE 2008, pp.1-9.

[9] R. Pena, J. Clare, and G. Asher, "Doubly Fed Induction Generator Using Back to Back PWM Converters and its Application to Variable Speed Wind Energy Generation," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, Vol.143, 1996, p.231.

[10] S. Muller, M. Deicke, and R. De Doncker, " Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol.8, 2002, p.26–33.

[11] M. Tazil, V. Kumar, R. Bansal, S. Kong, Z. Dong, and W. Freitas, "Three-Phase Doubly Fed Induction Generators: an overview," *IET Electric Power Applications*, vol.4, 2010, p.75.