

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

[طراحی بهینه و آنالیز یک ژنراتور سنکرون سه فاز بادی
شار محوری با آهنربای دائم به روش اجزای محدود سه
بعدی]

توسط:

[راضیه پرموزه نویری]

استاد راهنما:

[دکتر محمد اردبیلی]

زمستان 1391

اظهارنامه دانشجو

اینجانب راضیه پرموزه نویری دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - قدرت گرایش ماشین های الکتریکی و الکترونیک قدرت دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان نامه با عنوان طراحی بهینه و آنالیز یک ژنراتور سنکرون سه فاز بادی شار محوری با آهنربای دائم به روش اجزای محدود سه بعدی با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر محمد اردبیلی، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان نامه مورد تایید می باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده ام.

امضاء دانشجو:

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

- 1- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هر گونه کپی برداری بصورکل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.
- 2- کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه خانم راضیه پرموزه نویری را با عنوان طراحی بهینه و آنالیز یک ژنراتور سنکرون سه فاز بادی شار محوری با آهنربای دائم به روش اجزای محدود سه بعدی از نظر فرم و محتوا بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تایید می کنند.

امضاء	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	اعضای هیئت داوران
	دانشیار	آقای دکتر محمد اردبیلی	۱- استاد راهنما
	دانشیار	آقای دکتر حسین حیدری (دانشگاه علم و صنعت)	۲- استاد ممتحن
	استادیار	آقای دکتر عباس هوشمند	۳- استاد ممتحن
	دانشیار	آقای دکتر محمد اردبیلی	۴- نماینده گروه

تقدیم به:...

تقدیم به دو وجود پاک و صمیمی که هر آنچه دارم از مهربانی آن هاست. به پدر عزیزم که همواره راهنمای زندگیم بوده است به مادر مهربانم که مهربانی و دوست داشتن را به من آموخت.

و هدیه به همسر مهربانم

تقدیر و تشکر فراوان از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر محمد اردبیلی که با راهنمایی های ارزنده خود در کلیه مراحل انجام پروژه راهگشای اینجانب بوده است.

چکیده

امروزه از بین ساختارهای مختلف ژنراتورهای الکتریکی آهنربای دائم، ژنراتورهای شار محوری به دلیل راندمان بالا در توربین های بادی مورد استفاده قرار می گیرند. اخیراً "توربین های بادی با درایو مستقیم و بدون گیربکس جایگزین توربین های بادی مرسوم شده اند. این نوع توربین ها در مقایسه با توربین های بادی مرسوم دارای مزایایی شامل کاهش تلفات چرخ دنده ها، کاهش نویز و افزایش راندمان می باشند.

ژنراتور مورد استفاده در توربین های بادی درایو مستقیم باید دارای ساختار مناسب، سرعت کم، چگالی توان و گشتاور بالا، قابلیت اطمینان و بازده بالا باشد. با مقایسه های انجام شده بین ماشین های شار محوری و شار شعاعی چنین بر می آید که ماشین های شار محوری جهت استفاده در توربین های بادی با درایو مستقیم مناسب ترند. در این پایان نامه ژنراتور شار محوری مغناطیس دائم سینوسی با ساختار دو وجهی شیار دار استاتور میانی جهت کاربرد در توربین های بادی درایو مستقیم انتخاب گردید. از روش الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات (PSO) جهت بهینه سازی راندمان ماشین و کمینه نمودن میزان تلفات استفاده شد. با توجه به نتایج بهینه سازی ساختار 18 شیار، 12 قطب انتخاب گردید.

در ادامه ژنراتور بهینه شده به روش الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات (PSO) با استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی مدلسازی شده و مورد ارزیابی قرار گرفت.

کلید واژه: توربین بادی درایو مستقیم- ژنراتور شار محور مغناطیس دائم- الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات- روش اجزای محدود سه بعدی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست جدول‌ها.....	ه
فهرست شکل‌ها.....	و
فهرست علائم و نشانه‌ها.....	ط
فصل 1- مقدمه.....	1
1-1- تعریف مساله.....	1
2-1- توربین بادی درایو مستقیم.....	4
3-1- مزایا و معایب توربین بادی درایو مستقیم.....	5
4-1- انواع ژنراتورهای سنکرون مورد استفاده در توربین های بادی درایو مستقیم.....	6
5-1- ساختار پایان نامه.....	7
فصل 2- معرفی ماشین های شار محوری آهنربای دائم (AFPM) و روابط حاکم بر آن.....	9
2-1- معرفی ماشین شار محوری.....	9
2-2- انواع ماشین های شار محوری آهنربای دائم (AFPM).....	12
2-2-1- آرایش استاتور- روتور.....	12
2-2-1-1- ساختار تک وجهی.....	12
2-2-1-2- ساختار دو وجهی.....	12
2-2-1-3- ساختار چند وجهی.....	13
2-2-2- روش های ساخت (ایجاد) آهنربا دائم.....	14
2-2-2-1- آهنربای دائم نصب شده روی سطح.....	14
2-2-2-2- آهنربای دائم داخلی یا دفن شده.....	14
2-2-2-3- شیار در استاتور.....	14
2-2-2-1- استاتور بدون شیار.....	14
2-2-2-2- استاتور شیاردار.....	15
2-2-2-4- وجود هسته.....	16
2-2-2-1- هسته آهنی.....	16
2-2-2-2- بدون هسته استاتور.....	16
2-2-2-3- بدون هسته استاتور و روتور.....	17
2-2-2-5- انواع مواد مصرفی در هسته و آهنربای دائم.....	17

- 17.....[36-1] جنس هسته -1-5-2-2
- 18..... جنس مواد مغناطیسی آهنربای دائم -2-5-2-2
- 18..... مقایسه و انتخاب ساختار مناسب ژنراتور شار محوری -3-2
- 19..... مقایسه حجم -1-3-2
- 19..... مقایسه وزن فولاد -2-3-2
- 19..... مقایسه وزن مس مصرفی -3-3-2
- 19..... مقایسه وزن آهنربای مصرفی -4-3-2
- 19..... مقایسه تلفات مسی -5-3-2
- 19..... مقایسه تلفات آهنی -6-3-2
- 20..... مقایسه آرایش ساختار شیاردار و بدون شیار -7-3-2
- 21..... مقایسه ماشین های شار محوری و شار شعاعی -4-2
- 21..... تفاوت های ساختاری -1-4-2
- 22..... مقایسه چگالی گشتاور -2-4-2
- 25..... مزایا و معایب ژنراتور شار محوری -3-4-2
- 26..... روابط حاکم بر ماشین AFPM -5-2
- 27..... گشتاور الکترومغناطیسی -1-5-2
- 31..... توان خروجی و نیروی محرکه القایی (EMF) -2-5-2
- 32..... جمع بندی -6-2
- 33..... فصل 3- طراحی اجزای ژنراتور شار محوری دو وجهی شیاردار
- 33..... نیروی محرکه القایی -1-3
- 33..... ضریب سیم پیچی -1-1-3
- 34..... مولفه مرتبه nام هارمونیک شار مغناطیسی -2-1-3
- 35..... رآکتانس سنکرون -2-3
- 36..... رآکتانس عکس العمل آرمیچر -1-2-3
- 37..... طراحی اجزای ژنراتور -3-3
- 37..... رابطه توان و حجم -1-3-3
- 41..... طول محوری، ضخامت طول استاتور و روتور -2-3-3
- 46..... طراحی شیار -3-3-3
- 48..... طراحی سیم پیچی -4-3-3
- 53..... روند طراحی -4-3
- 54..... جمع بندی -5-3

55	فصل 4 - طراحی بهینه ژنراتور شار محوری دو وجهی شیاردار
55	1-4 - بهینه سازی
56	2-4 - الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات (PSO)
56	1-2-4 - الگوریتم PSO الهام گرفته از طبیعت
59	2-2-4 - تاریخچه الگوریتم PSO
63	3-2-4 - پارامترهای PSO
65	3-4 - انتخاب روش بهینه سازی مناسب
66	4-4 - تابع هدف
67	1-4-4 - بهینه سازی راندمان
68	2-4-4 - انتخاب ذرات در فضای جستجو
68	3-4-4 - تعیین محدودیت های بهینه سازی ژنراتور شار محوری
71	5-4 - فرآیند بهینه سازی
71	6-4 - نتایج حاصل از بهینه سازی
78	7-4 - جمع بندی
79	فصل 5 - مدلسازی ژنراتور بهینه با استفاده از روش اجزای محدود
79	1-5 - معرفی روش اجزای محدود
80	2-5 - مراحل اجرای روش اجزای محدود
80	5-2-1- تقسیم بندی ناحیه
81	5-2-2- فرمول بندی مساله جهت حل مساله میدان
82	3-5 - تئوری مغناطیسی ژنراتور AFPM
84	4-5 - مقایسه روش اجزای محدود ماشین های شار محوری و شار شعاعی
84	1-4-5 - تحلیل ریاضی میدان مغناطیسی چرخشی [50]
87	2-4-5 - تحلیل دو بعدی یا سه بعدی
87	5-5 - نتایج شبیه سازی به روش اجزای محدود
95	6-5 - جمع بندی
97	فصل 6 - نتیجه گیری
97	6-1- نتایج
98	2-6 - پیشنهادات در ادامه کار
99	ضمیمه أ - تعداد شیارها و توزیع سیم پیچ ها

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
39	جدول 1-3: مقدار $Ki.Kp$ برای شکل موج‌های مختلف [45]
52	جدول 2-3: مقایسه بین سیم پیچی‌های تک لایه و دو لایه
69	جدول 1-4: مقادیر نامی ژنراتور شار محوری دو وجهی شیاردار
70	جدول 2-4: ترکیبات ممکن قطب و شیار
71	جدول 3-4: پارامترهای بهینه طراحی ژنراتور 12 قطب و 15 شیار
72	جدول 4-4: پارامترهای بهینه طراحی ژنراتور 12 قطب و 18 شیار
73	جدول 5-4: پارامترهای بهینه طراحی ژنراتور 12 قطب و 21 شیار
74	جدول 6-4: پارامترهای بهینه طراحی ژنراتور 12 قطب و 27 شیار
76	جدول 7-4: ابعاد ژنراتور بهینه نشده
77	جدول 8-4: ابعاد ژنراتور بهینه 18 شیار

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
شکل 1-1: رشد ظرفیت متوسط سالانه توربین های بادی منصوبه در جهان طی سال های 1994-2005	2
شکل 2-1: روند توسعه ظرفیت و اندازه توربین های بادی طی سال های 1980-2005	2
شکل 3-1: ساختار مبدل الکترومکانیکی درایو مستقیم	3
شکل 4-1: ساختار مبدل الکترومکانیکی تغذیه دوگانه	4
شکل 5-1: مبدل انرژی بادی مرسوم (چپ) و درایو مستقیم (راست)	5
شکل 1-2: نخستین ماشین شار محوری	10
شکل 2-2: انواع توپولوژی ماشین شار محور	10
شکل 3-2: یک نمونه ماشین شار شعاعی (چپ) و ماشین شار محوری (راست) با مرکزیت روتور	11
شکل 4-2: یک نمونه ماشین شار شعاعی (چپ) و ماشین شار محوری (راست) با مرکزیت استاتور	11
شکل 5-2: یک ژنراتور شار محور نمونه با ساختار تک وجهی [5]	12
شکل 6-2: یک ژنراتور شار محور نمونه با ساختار دو وجهی	13
شکل 7-2: یک ژنراتور شار محور نمونه با ساختار چند وجهی	13
شکل 8-2: نحوه قرار گرفتن آهنربای دائم داخلی (سمت راست)، سطحی (سمت چپ)	14
شکل 9-2: یک ژنراتور شار محور با استاتور بدون شیار	15
شکل 10-2: یک ژنراتور شار محور با استاتور شیاردار (الف) نمای سه بعدی (ب) نمای دو بعدی	15
شکل 11-2: مقایسه ساختار استاتور شیاردار ماشین شار محوری و شار شعاعی	16
شکل 12-2: روند توسعه تاریخی مواد مغناطیس دائم از نوع خاک کمیاب	18
شکل 13-2: ساختار ماشین شار شعاعی (سمت راست) و شار محور (سمت چپ)	21
شکل 14-2: ساختار ماشین شار شعاعی (سمت چپ) و شار محوری (سمت راست)	21
شکل 15-2: نمایی ساده از ماشین های AFPM و RFPM	23
شکل 16-2: چگالی شار ماکزیمم روتور بر حسب چگالی شار ماکزیمم در دندانه استاتور	25
شکل 17-2: نمایی ساده از ماشین AFPM	26
شکل 18-2: نمایی از تقابل چگالی شار مغناطیسی با هادی های استاتور	27
شکل 19-2: سیم پیچی سری توزیع شده سینوسی در هر فاز	28
شکل 3-1: آهنربای دائم سطحی و توزیع چگالی شار جریان سینوسی	35

- شکل 3-2: سیم پیچی های موج سینوسی 35
- شکل 3-3: نمای سه بعدی یک استاتور شیاردار 40
- شکل 3-4: نمای دو بعدی ژنراتور استاتور میانی 41
- شکل 3-5: نمایی از جهت عبور شار در دو ساختار NN و NS 41
- شکل 3-6: نمایی دو بعدی از ماشین (TORUS-S) 42
- شکل 3-7: مدار معادل مغناطیسی آهنربا 44
- شکل 3-8: مدار معادل مغناطیسی ساده شده شکل (3-7) 45
- شکل 3-9: ابعاد شیار در قطر داخلی محور استاتور 47
- شکل 3-10: کوپل دوزنقه ای شکل 49
- شکل 3-11: انواع توپولوژی سیم بندی ماشین های شار محوری (a) دارای همپوشانی (b) غیر همپوشانی 50
- شکل 3-12: نمای سه بعدی سیم پیچی دارای همپوشانی 51
- شکل 3-13: نمای سه بعدی سیم پیچی غیر همپوشانی شده 51
- شکل 3-14: سیم پیچی های بدون همپوشانی ماشین شار محوری (a) تک لایه (b) دو لایه 51
- شکل 3-15: نمایی از سه دندانه و کوپل ها (a) سیم پیچی تک لایه (b) سیم پیچی دو لایه 52
- شکل 4-1: یک گروه از ماهی ها که خطر یک شکارچی را پشت سر می گذارد 57
- شکل 4-2: دو نمونه از الگوهای ساکن موجود در طبیعت 58
- شکل 4-3: دو نمونه از الگوهای متحرک موجود در طبیعت 58
- شکل 4-4: الگوریتم بهینه سازی 62
- شکل 4-5: تغییرات تابع هدف در روند بهینه سازی برای ژنراتور 15 شیار 72
- شکل 4-6: تغییرات تابع هدف در روند بهینه سازی برای ژنراتور 18 شیار 73
- شکل 4-7: تغییرات تابع هدف در روند بهینه سازی برای ژنراتور 21 شیار 74
- شکل 4-8: تغییرات تابع هدف در روند بهینه سازی برای ژنراتور 27 شیار 75
- شکل 5-1: نواحی تک بعدی، دو بعدی، سه بعدی 81
- شکل 5-2: مدل میدان مغناطیسی دوار ماشین دو قطبی 86
- شکل 5-3: مدل میدان مغناطیسی دوار ماشین چهار قطبی 86
- شکل 5-4: حلقه سینوسی میدان مغناطیسی دوار ماشین دو قطبی 87
- شکل 5-5: نمایی سه بعدی از ساختار استاتور ژنراتور بهینه شده 88
- شکل 5-6: نمای سه بعدی ساختار استاتور سیم پیچی شده 88
- شکل 5-7: نمای سه بعدی ساختار روتور و آهنرباهای دائم 89

- شکل 5-8: نمایی از ژنراتور بهینه و مدلسازی شده 89
- شکل 5-9: نمایی از مش بندی ماشین 90
- شکل 5-10: جهت عبور خطوط مغناطیسی در آهنرباهای دائم (N,S)[32] 90
- شکل 5-11: جهت عبور خطوط مغناطیسی در ماشین مدلسازی شده 91
- شکل 5-12: نمایی دیگر از جهت عبور خطوط مغناطیسی در ماشین مدلسازی شده 91
- شکل 5-13: نمایی از چگالی شار مغناطیسی در ساختار سه بعدی ماشین 92
- شکل 5-14: چگالی شار مغناطیسی در حالت مگنتواستاتیگ (در یک لحظه) 92
- شکل 5-15: چگالی شار مغناطیسی ماشین در حالت متغیر با زمان 93
- شکل 5-16: چگالی شار مغناطیسی در حالت متغیر با زمان 93
- شکل 5-17: ولتاژ فاز القایی در حالت بی باری 94
- شکل 5-18: جریان فاز سیم پیچی ها در حالت بارداری 94
- شکل 5-19: منحنی ولتاژ- جریان ماشین (در سرعت $n=500$ rpm) 95
- شکل 5-20: منحنی توان الکتریکی خروجی - جریان ماشین (در سرعت $n=500$ rpm) 95
- شکل أ-1: ضرایب اصلی سیم پیچی ترکیب های متفاوت قطب و شیار در سیم پیچی دو لایه 99
- شکل أ-2: ضرایب اصلی سیم پیچی ترکیب های متفاوت قطب و شیار در سیم پیچی تک لایه 99
- شکل أ-3: ضرایب اصلی سیم پیچی ترکیب های متفاوت قطب و شیار در سیم پیچی دو لایه 99
- شکل أ-4: سیم بندی استاتور دو لایه دارای 9 شیار 100
- شکل أ-5: سیم بندی استاتور دو لایه دارای 15 شیار 100
- شکل أ-6: سیم بندی استاتور دو لایه دارای 18 شیار 100
- شکل أ-7: سیم بندی استاتور دو لایه دارای 21 شیار 100

فهرست علائم و نشانه‌ها

علائم اختصاری	عنوان
A	آمپر و بارپذیری الکتریکی
AFPM	ماشین شار محوری مغناطیس دائم
RFPM	ماشین شار شعاعی مغناطیس دائم
B	چگالی شار مغناطیسی
B_g	چگالی شار مغناطیس در فاصله هوایی
B_{cr}	چگالی شار مغناطیسی در یوغ روتور
B_{cs}	چگالی شار مغناطیسی در یوغ استاتور
D_o	قطر خارجی ماشین
D_i	قطر داخلی ماشین
D_{av}	قطر متوسط ماشین
Emf	نیروی محرکه الکتریکی
E_{ph}	ولتاژ فازی
E_{pk}	دامنه ولتاژ
f	فرکانس
F	نیرو
FEM	روش اجزای محدود
g	فاصله هوایی
h	تعداد وجه استاتور و روتور
H	هانری
I	جریان موثر
I_{pk}	دامنه جریان
J_s	چگالی جریان
K_w	ضریب سیم بندی
K_p	ضریب گام
K_d	ضریب توزیع
K_s	ضریب مورب سازی

L_e	کل طول محوری
L_{cr}	ضخامت یوغ روتور
L_{cs}	ضخامت یوغ استاتور
L_{pm}	ضخامت آهنربا
N_{ph}	تعداد دور کلاف در هر فاز
P	تعداد قطب
P_{out}	توان خروجی
P_{den}	چگالی توان
R_i	شعاع داخلی
R_o	شعاع خارجی
RFPM	ماشین شار شعاعی
T	گشتاور
V	ولت

فصل 1 - مقدمه

1-1 - تعریف مساله

با محدود شدن منابع سوخت های فسیلی و نگرانی از آلودگی زیست محیطی ناشی از آن ها نیاز به منابع انرژی تجدید پذیر مانند انرژی باد، انرژی خورشیدی، انرژی موج دریا و... در طول قرن بیستم افزایش یافته است. بحران نفت در دهه سال 1970 نیاز به منابع انرژی تجدید پذیر را بیش از پیش نمود. از آنجایی که باد در سراسر جهان و در هر مکانی بر روی زمین وجود داشته و از لحاظ اقتصادی نیز موثرترین روش به منظور تولید الکتریسیته به شمار می رود، در میان منابع گوناگون انرژی تجدید پذیر، انرژی باد دارای سریع ترین رشد ظرفیت در جهان بوده است.

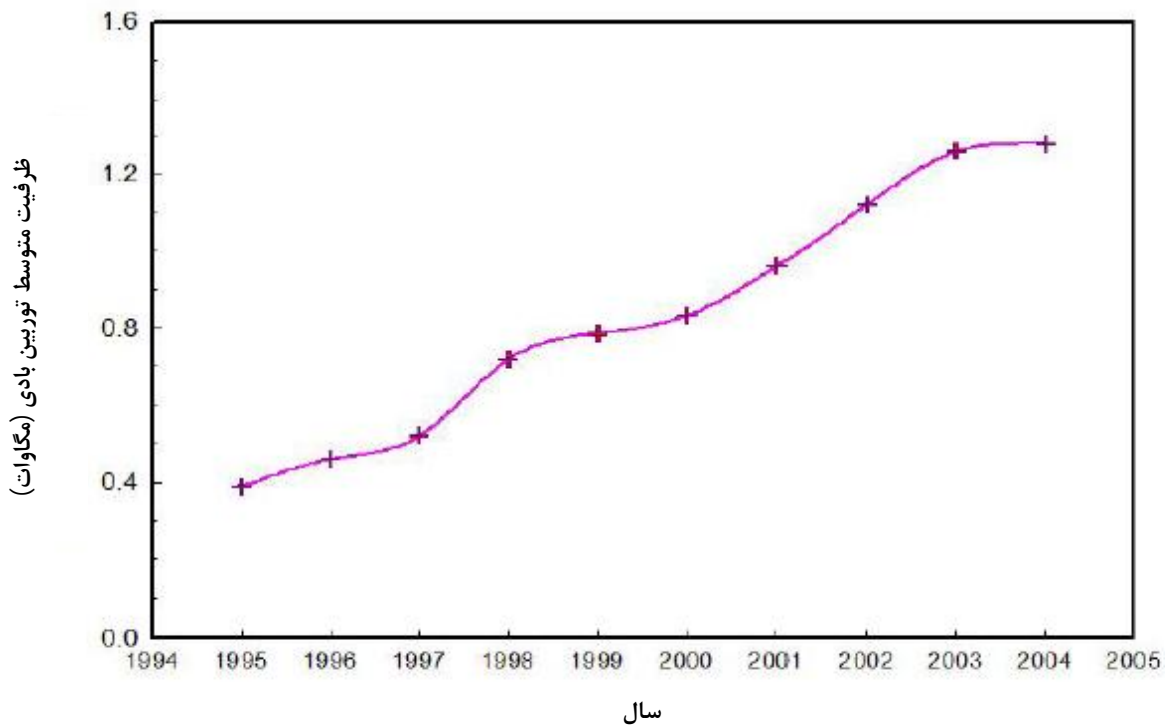
نرخ رشد متوسط سالانه انرژی باد در طول ده سال گذشته حدودا 30 درصد بوده است. ظرفیت تولید توان الکتریکی ناشی از انرژی باد در سراسر جهان تا سال 2005 میلادی معادل 59.100 مگاوات بوده است که رشد 24 درصدی داشته است. در شکل (1-1) رشد ظرفیت توان الکتریکی توربین بادی ناشی از انرژی باد در جهان در طول سال های 1994-2005 نشان داده شده است. انتظار می رود تا پایان سال 2020 میزان این ظرفیت به مقداری معادل 1.260.000 مگاوات افزایش یابد که 12 درصد مصرف کل توان الکتریکی مورد نیاز جهان را تامین خواهد کرد. بنابراین بازار جهانی برای تولید توان الکتریکی با استفاده از ژنراتورهای توربین بادی به طور مداوم در حال افزایش است به گونه ای که فن آوری انرژی بادی را وادار به رقابت در عرصه جهانی می نماید.

از این رو جهت دستیابی به بیشترین انرژی سالانه، با کمترین هزینه، پاسخ دینامیکی پایدار و بهبود کیفیت توان، ساختارهای گوناگونی از توربین های بادی توسعه یافته و در طول دو دهه اخیر ساخته شده اند. انواع سیستم های ژنراتور مرسوم برای توربین های بادی بزرگ شامل سه نوع اصلی به شرح ذیل می باشد. نوع اول سیستم توربین بادی سرعت ثابت با گیربکس چند مرحله ای و یک ژنراتور القایی قفس سنجابی¹ استاندارد، نوع دوم سیستم توربین بادی سرعت متغیر با گیربکس چند مرحله ای و یک ژنراتور القایی تغذیه دوگانه² و نوع سوم توربین بادی سرعت متغیر، بدون جعبه دنده و دارای ژنراتور با کوپل مستقیم می باشد. این ساختار شامل یک ژنراتور سنکرون با گشتاور بالا و سرعت کم و یک مبدل الکترونیک قدرت جهت اتصال به شبکه می باشد. با افزایش سطوح توان و کاهش سرعت روتور،

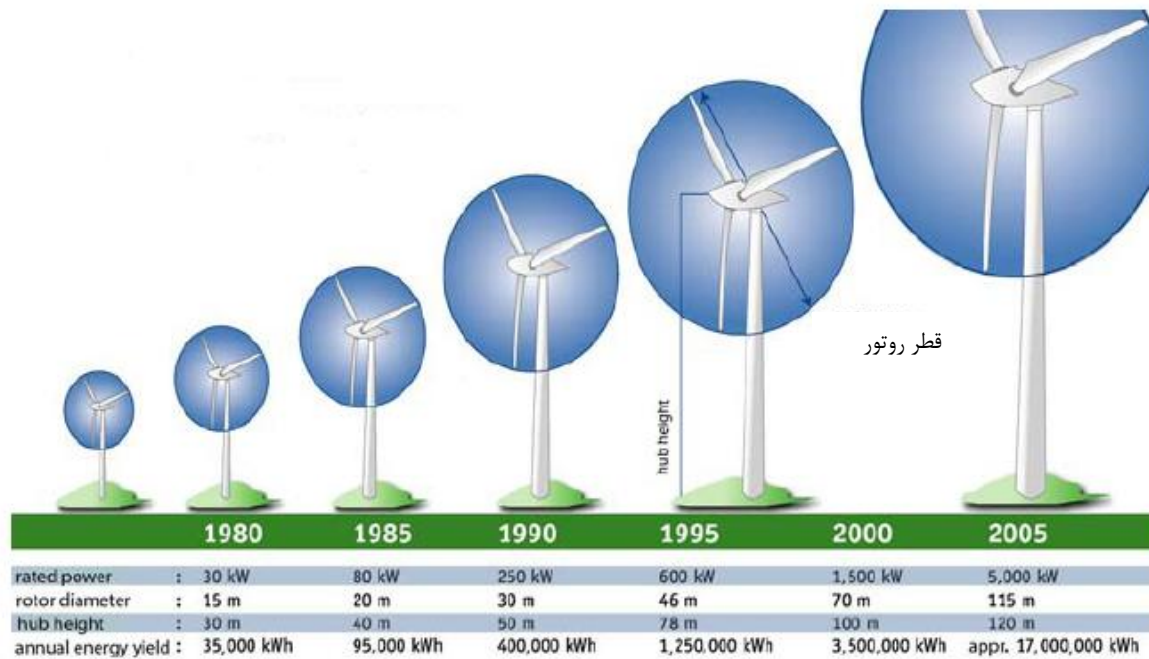
¹ Squirrel-cage induction generator (SCIG)

² Doubly fed induction generator (DFIG)

ژنراتورهای بادی بزرگ تر و گران تر می شوند. روند رشد اندازه توربین های بادی طی سال های 2005-1980 در شکل (2-1) نشان داده شده است.



شکل 1-1: رشد ظرفیت متوسط سالانه توربین های بادی منصوبه در جهان طی سال های 1994-2005



شکل 2-1: روند توسعه ظرفیت و اندازه توربین های بادی طی سال های 1980-2005