

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق
گروه قدرت

عنوان پایان نامه ارشد
مدیریت توان در سیستم های تولید توان ترکیبی بادی، پیل سوختی
و ذخیره ساز انرژی

دانشجو: فتاح حسنزاده

استاد راهنما:
دکتر امین حاجی زاده

استاد مشاور:
دکتر مرتضی رحیمیان

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۲



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره : ۸۶ / ۱۸ . ت. ب
تاریخ : ۹۲ / ۰۶ / ۲۵
ویرایش : -----

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :
فتاح حسن زاده رشته : برق گرایش : قدرت
تحت عنوان : مدیریت توان در سیستم های تولید توان ترکیبی بادی پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی
که در تاریخ ۹۲/۰۶/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : عالی) امتیاز (۱۱ / ۱۸) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸ / ۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷ / ۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵ / ۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	امیرحاج حسن زاده	استادیار	
۲- استاد مشاور	مرتضی زحیفی	استادیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	علیرضا کهن بلانی	استادیار	
۴- استاد ممتحن	سید علی باقری	استادیار	
۵- استاد ممتحن	علی اکبر زاده	استادیار	

رئیس دانشکده :

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم کہ در تمامی مراحل زندگی پشتیبان من بودند،

و استاد محترم و کرامی ام، جناب آقای دکتر امین حاجی زادہ.

از دست و زبان که بر آید

کز عهده می شکرش به در آید

خداوندا! تو را به خاطر تمامی الطافی که شامل حال من کرده ای سپاس.

بدین وسیله زحمات پدر و مادر عزیزم

و استاد علم و اخلاق، جناب آقای دکتر امین حاجی زاده

که راهنما و مشوق همیشگی من در طول این دوره بودند را رج نهاده،

و از تمام کسانی که اینجانب را در این راه حمایت کردند، تشکر می نمایم.

﴿اللهم عجل لوليک الفرج﴾

این پایان نامه با کمک و پشتیبانی

سازمان انرژی‌های نو ایران (سازانا)

اجرا شده است.

تعهد نامه

اینجانب ...فتحاح حسن زاده... دانشجوی دوره ...کارشناسی ارشد... رشته ... مهندسی برق-قدرت... دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ...مدیریت توان در سیستم های تولید توان ترکیبی بادی، پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی... تحت راهنمایی ...دکتر امین حاجی زاده... متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ: ۱۳۹۲/۰۶/۲۵

امضای دانشجو



مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

در این پایان نامه هدف پیاده سازی یک الگوریتم مناسب برای مدیریت توان بین منابع تولید انرژی در یک سیستم تولید توان ترکیبی شامل توربین بادی، پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی می باشد. در طراحی استراتژی مدیریت توان، شاخص هایی نظیر تأمین توان بار، حالت شارژ ذخیره ساز انرژی، قرارگیری در نقاط بهینه عملکردی هر یک از منابع بادی و پیل سوختی، بهره برداری بهینه از سوخت در پیل های سوختی و ... در نظر گرفته می شود. همچنین با طراحی یک کنترل کننده فازی مناسب به دنبال کنترل هر یک از منابع تولید توان در سیستم مورد نظر می باشیم. این کنترل کننده به دلیل مزایایی از قبیل پاسخ مناسب در حالات تعیین شده، خروجی مناسب در حالتی که ورودی ها در بازه های غیر از بازه های تعیین شده قرار دارند و عملکرد هوشمند این کنترل کننده، مورد استفاده قرار گرفته است.

در این سیستم، توان تولیدی توربین بادی، میزان توان مورد نیاز بار و سطح شارژ باتری ها به عنوان ورودی های کنترل کننده می باشند. از آنجا که در این سیستم به دنبال بهره برداری بهینه از سیستم و با هدف کاهش هزینه ها می باشیم، و با توجه به اینکه عامل اصلی در تعیین هزینه های این سیستم میزان سوخت مصرفی پیل و به تبع آن توان تولیدی پیل می باشد، لذا میزان توان مرجع تولیدی که باید توسط پیل سوختی برای پوشش بار تولید شود، به عنوان خروجی کنترل کننده می باشد.

کلمات کلیدی: سیستم تولید توان ترکیبی، کنترل کننده فازی، مدیریت توان.

لیست مقالات استخراج شده و چاپ شده:

۱. فتاح حسنزاده، امین حاجی‌زاده، فاضل عباسی، "تحلیل شرایط عملکردی مختلف در تعیین اندازه اجزاء سیستم تولید توان ترکیبی بادی/پیل سوختی/ذخیره ساز انرژی" *کنفرانس انرژی‌های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران، ۱-۶، اصفهان ۱۳۹۲*

2. Fattah Hassanzadeh, Amin Hajizadeh, Fazel Abbasi, "Stability Analysis and Optimal State Feedback Control of Back-to-Back Converter", *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy, 2013, 2, 139-144*

لیست مقالات در دست داوری:

۱. فتاح حسنزاده، امین حاجی‌زاده. "مدیریت هوشمند توان در سیستم تولید توان ترکیبی بادی/پیل سوختی/ذخیره ساز انرژی" *نشریه علمی پژوهشی سیستم های هوشمند، دانشگاه اصفهان ۱۳۹۲*

2. Fattah Hassanzadeh, Amin Hajizadeh, "Intelligent Power Management in Hybrid Wind Turbine/ Fuel Cell/ Energy Storage Power Generation System" *IEEE Transaction on Energy Conversion*

فهرست مطالب

فصل اول

مقدمه ۱

فصل دوم

بررسی منابع انرژی در سیستم تولید توان ترکیبی توربین بادی / پیل

سوختی و ذخیره ساز انرژی ۱۱

۱-۲ توربین‌های بادی ۱۲

۱-۱-۲ نحوه عملکرد توربین بادی ۱۴

۲-۱-۲ ضریب ظرفیت ۱۷

۳-۱-۲ ساختمان توربین بادی ۱۷

۴-۱-۲ انواع توربین‌های بادی ۲۰

۱-۴-۱-۲ توربین‌های بادی با سرعت ثابت ۲۰

۲-۴-۱-۲ توربین‌های بادی با سرعت متغیر ۲۱

۱-۲-۴-۱-۲ توربین‌های بادی سرعت متغیر از نوع ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG) ۲۲

۲-۲-۴-۱-۲ توربین‌های بادی سرعت متغیر از نوع تمام کنترل شونده (FRC) ۲۴

۵-۱-۲ انواع ژنراتورهای مورد استفاده در توربین‌های بادی ۲۵

۱-۵-۱-۲ ژنراتورهای آسنکرون (القایی) ۲۵

- ۲۷ ۲-۱-۵ ژنراتور سنکرون
- ۲۷ ۲-۱-۶ پیش‌بینی پذیری
- ۲۸ ۲-۱-۷ برق بادی در مقیاس‌های کوچک
- ۲۸ ۲-۱-۸ آثار زیست‌محیطی
- ۲۹ ۲-۱-۸-۱ انتشار CO_2 و آلودگی
- ۲۹ ۲-۱-۸-۲ تأثیرات بوم‌شناختی
- ۳۰ ۲-۱-۸-۳ استفاده از زمین
- ۳۱ ۲-۲ پیل سوختی چیست؟
- ۳۲ ۲-۲-۱ تاریخچه پیل‌های سوختی
- ۳۴ ۲-۲-۲ انواع پیل سوختی
- ۳۴ ۲-۲-۲-۱ پیل سوختی الکترولیت پلیمر یا غشاء مبادله‌کننده پروتون (PEMFC)
- ۳۴ ۲-۲-۲-۲ پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)
- ۳۵ ۲-۲-۲-۳ پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)
- ۳۶ ۲-۲-۳ انواع سوخت مورد استفاده در پیل سوختی
- ۳۶ ۲-۳-۱ نفت خام
- ۳۷ ۲-۳-۲ زغال‌سنگ و گاز زغال‌سنگ

۳۷ گاز طبیعی ۳-۳-۲-۲

۳۸ (Biofuel) منشاء زیستی ۴-۳-۲-۲

۳۸ تولید هیدروژن از انرژی خورشیدی، آب و باد ۵،۳،۲،۲

فصل سوم

تعیین بهینه اندازه اجزاء منابع تولید توان ترکیبی بادی / پیل سوختی و

ذخیره ساز انرژی ۴۰

۴۱ مقدمه ۱-۳

۴۱ HOMER نرم افزار ۲-۳

۴۲ سایز بندی مناسب سیستم تولید توان ترکیبی بادی / پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی ۳-۳

۴۵ تحلیل نتایج ۴-۳

فصل چهارم

استراتژی کنترل مدیریت توان در سیستم تولید توان ترکیبی بادی / پیل

سوختی و ذخیره ساز انرژی ۴۸

۴۹ استراتژی مدیریت توان در سیستم ترکیبی بادی / پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی ۱-۴

۵۴ روش کنترل فازی (Fuzzy Control) اعمال شده بر سیستم مورد مطالعه ۲-۴

فصل پنجم

شبیه سازی بر اساس مدل های ارائه شده ۶۰

۵-۱ شبیه‌سازی اجزای سیستم ۶۱

۵-۱-۱ توربین بادی ۶۱

۵-۱-۲ ژنراتور PMSG ۶۲

۵-۱-۳ پیل سوختی ۶۶

۵-۱-۴ ذخیره ساز انرژی (باتری‌ها) ۶۹

۲,۵ مدل‌سازی سیستم ۷۲

فصل ششم

نتایج شبیه‌سازی سیستم در حالت‌های مختلف عملکرد ۷۴

۶-۱ حالت اول: سرعت باد ثابت- بار متغیر ۷۶

۶-۲ حالت دوم: سرعت باد متغیر- بار ثابت ۸۰

۶-۳ حالت سوم: سرعت باد متغیر- بار متغیر ۸۳

۶-۴ حالت چهارم: خروج توربین از مدار ۸۸

۶-۵ حالت پنجم: باد متغیر- بار متغیر با سطح شارژ باتری پایین ۹۱

۶-۶ حالت ششم: بررسی پاسخ دینامیکی پیل سوختی ۹۳

فصل هفتم

نتیجه‌گیری ۹۹

۱-۷ نتیجه‌گیری ۹۹

۲-۷ پیشنهادات ۱۰۲

پیوست‌ها ۱۰۳

مراجع ۱۲۰

فهرست شکلها

- شکل (۱-۱) بلوک دیاگرام سیستم مرجع ۳
- شکل (۲-۱) زیر سیستم پیل سوختی - ابر خازن ۴
- شکل (۳-۱) توپولوژی کنترلی سیستم مرجع ۵
- شکل (۴-۱) سیستم DFIG و ذخیره ساز ۶
- شکل (۵-۱) سیستم بادی - ذخیره ساز انرژی ۷
- شکل (۶-۱) عملکرد سیستم تحت شرایط تولید ثابت - بار متغیر (a) بار متغیر (b) توان تولیدی ثابت ژنراتور (c) جریان ذخیره ساز با توجه به اختلاف بین بار و تولید (d) شارژ و دشارژ باتری ها ۸
- شکل (۷-۱) عملکرد سیستم تحت بار ثابت - تولید متغیر (a) بار (b) تولید توربین بادی (c) جریان ذخیره ساز با توجه به اختلاف بین بار و تولید (d) شارژ و دشارژ باتری ها ۹
- شکل (۱-۲) پیش بینی روند رشد تولید انرژی بادی ۱۳
- شکل (۲-۲) توربین بادی ۱۴
- شکل (۳-۲) رابطه سرعت باد و توان تولیدی توربین بادی ۱۵
- شکل (۴-۲) رابطه بین مساحت جاروب شده توسط پره ها و توان خروجی توربین بادی ۱۶
- شکل (۵-۲) اجزای توربین بادی ۱۸
- شکل (۶-۲) توربین بادی با سرعت ثابت ۲۱

- شکل (۷-۲) شمای توربین بادی با سرعت متغیر از نوع DFIG ۲۴
- شکل (۸-۲) شمای توربین بادی با سرعت متغیر از نوع FRC ۲۵
- شکل (۹-۲) مدار ماشین آسنکرون ۲۶
- شکل (۱۰-۲) رابطه توان ماشین آسنکرون (القایی) ۲۷
- شکل (۱۱-۲) عملکرد پیل سوختی ۳۱
- شکل (۱۲-۲) بهره‌گیری از انرژی الکتریکی و گرمای تولیدی پیل سوختی ۳۵
- شکل (۱-۳) مدل سیستم مورد نظر ۴۲
- شکل (۲-۳) پروفایل بار ۴۳
- شکل (۳-۳) متوسط سرعت باد در ماه‌های سال ۴۳
- شکل (۴-۳) نتایج شبیه‌سازی برای حالت اول ۴۶
- شکل (۵-۳) آنالیز اقتصادی سیستم حالت اول ۴۶
- شکل (۶-۳) توان تولیدی توربین بادی و پیل سوختی در یک بازه ۷ روزه ۴۷
- شکل (۱-۴) منحنی مشخصه عملکردی توربین بادی مورد استفاده در این پایان‌نامه ۵۰
- شکل (۲-۴) فلوچارت سیستم مدیریت توان فازی ۵۶
- شکل (۳-۴) نمایی از ورودی یا خروجی در سیستم فازی ۵۶
- شکل (۱-۵) منحنی مشخصه عملکردی توربین بادی مورد استفاده ۶۲

- شکل (۲-۵) توربین بادی با ژنراتور PMSG ۶۴
- شکل (۳-۵) سرعت باد ۶۵
- شکل (۴-۵) منحنی C_p با توجه با سرعت باد شکل (۳-۵) ۶۵
- شکل (۵-۵) توان الکتریکی تولیدی توربین بادی با توجه با سرعت باد شکل (۳-۵) ۶۵
- شکل (۶-۵) منحنی آئرو دینامیکی توربین بادی ۶۶
- شکل (۷-۵) مدار پیل سوختی ۶۸
- شکل (۸-۵) ولتاژ پیل سوختی در شرایط بی باری ۶۹
- شکل (۹-۵) مشخصه ولتاژ-جریان پیل سوختی در شرایط بی باری ۶۹
- شکل (۱۰-۵) مشخصه دشارژ باتری‌ها ۷۱
- شکل (۱۱-۵) سیستم تولید توان ترکیبی بادی-پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی ۷۳
- شکل (۱-۶) توان تولیدی توربین بادی ۷۶
- شکل (۲-۶) بار الکتریکی ۷۷
- شکل (۳-۶) توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل کننده) ۷۷
- شکل (۴-۶) توان ذخیره ساز انرژی ۷۸
- شکل (۵-۶) سطح شارژ باتری‌ها (SOC) ۷۸
- شکل (۶-۶) مطابقت توان تولیدی و بار ۷۹

- شکل (۶-۷) توان تولیدی توربین بادی ۸۰
- شکل (۶-۸) بار الکتریکی ۸۱
- شکل (۶-۹) توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل کننده) ۸۲
- شکل (۶-۱۰) توان ذخیره ساز انرژی ۸۲
- شکل (۶-۱۱) سطح شارژ باتری‌ها (SOC) ۸۳
- شکل (۶-۱۲) مطابقت توان تولیدی و بار ۸۳
- شکل (۶-۱۳) توان تولیدی توربین بادی ۸۴
- شکل (۶-۱۴) بار الکتریکی ۸۴
- شکل (۶-۱۵) توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل کننده) ۸۵
- شکل (۶-۱۶) توان ذخیره ساز انرژی ۸۵
- شکل (۶-۱۷) سطح شارژ باتری‌ها (SOC) ۸۶
- شکل (۶-۱۸) مطابقت توان تولیدی و بار ۸۷
- شکل (۶-۱۹) توان تولیدی توربین بادی ۸۹
- شکل (۶-۲۰) بار الکتریکی ۸۹
- شکل (۶-۲۱) توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل کننده) ۸۹
- شکل (۶-۲۲) توان ذخیره ساز انرژی ۹۰

- شکل (۶-۲۳) مطابقت توان تولیدی و بار ۹۰
- شکل (۶-۲۴) توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل کننده) ۹۱
- شکل (۶-۲۵) توان ذخیره ساز انرژی ۹۱
- شکل (۶-۲۶) سطح شارژ باتری‌ها (SOC) ۹۲
- شکل (۶-۲۷) مطابقت توان تولیدی و بار ۹۲
- شکل (۶-۲۸) توان تولیدی توربین بادی ۹۴
- شکل (۶-۲۹) منحنی C_p توربین بادی ۹۴
- شکل (۶-۳۰) جریان محور d ژنراتور ۹۴
- شکل (۶-۳۱) بار الکتریکی ۹۵
- شکل (۶-۳۲) توان مرجع و توان واقعی تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل کننده) ۹۵
- شکل (۶-۳۳) هیدروژن جذب شده توسط پیل سوختی ۹۵
- شکل (۶-۳۴) جریان شارژ و دشارژ باتری‌ها ۹۶
- شکل (۶-۳۵) توان ذخیره ساز انرژی (باتری‌ها) ۹۶
- شکل (۶-۳۶) سطح شارژ باتری‌ها (SOC) ۹۶
- شکل (۶-۳۷) مطابقت توان تولیدی و بار ۹۷

- شکل (پ-۱) ساختار یک سیستم فازی خالص ۱۰۹
- شکل (پ-۲) ساختار اصلی سیستم فازی TSK ۱۰۹
- شکل (پ-۳) ساختار اصلی یک سیستم فازی با فازی ساز و غیر فازی ساز ۱۱۰
- شکل (پ-۴) تابع عضویت μ را بر حسب $e(t)$ نشان می‌دهد ۱۱۱
- شکل (پ-۵) نمایش گرافیکی غیر فازی ساز مرکز ثقل ۱۱۳
- شکل (پ-۶) نمایش گرافیکی غیر فازی ساز میانگین مراکز ۱۱۴
- شکل (پ-۷) مجموعه فازی ۱۱۵

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۲) مشخصات عملکردی انواع پیل‌های سوختی ۳۶

جدول (۱-۳) مشخصات اجزاء مورد استفاده در سیستم تولید توان ترکیبی بادی/ پیل سوختی و ذخیره

سازانرژی ۴۴

جدول (۱-۴): قوانین فازی برای حالت اول ۵۷

جدول (۲-۴): قوانین فازی برای حالت دوم ۵۸

جدول (۳-۴): قوانین فازی برای حالت سوم ۵۸

جدول (۴-۴): قوانین فازی برای حالت چهارم ۵۹

جدول (۵-۴): قوانین فازی برای حالت پنجم ۵۹

جدول (۱-۵): پارامترهای پیل سوختی ۶۸

جدول (پ-۱) پارامترهای PMSG ۱۱۹

علامت اختصاری

FC	Fuel Cell	پیل سوختی
UC	Ultra Capacitor	ابر خازن
SOC	State Of Charge	سطح شارژ
DFIG	Doubly Fed Induction Generator	ژنراتور با تغذیه دوگانه
rpm	radian rpr minute	رادیان بر دقیقه
DC	Direct Current	جریان مستقیم
FRC	Fully Rate Converter	تمام مبدلی
WRSG	Winding Rotor Synchronous Generator	ژنراتور سنکرون روتور سیم پیچی شده
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator	ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم
CHP	Combine Heat and Power	ترکیب توان و گرما
AC	Alternativ Current	جریان متناوب
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	پیل سوختی با غشا تبادل پروتون

SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	پیل سوختی کربنات مذاب
AFC	Acid Fuel Cell	پیل سوختی قلیایی
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	پیل سوختی اسید فسفریک
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	پیل سوختی اکسید جامد
VL	Very Low	خیلی کم
L	Low	کم
M	Medium	متوسط
H	High	زیاد
VH	Very High	خیلی زیاد

فصل اول

مقدمه

با گسترش روز افزون جوامع انسانی و توسعه صنعتی جوامع مختلف، نیاز به منابع انرژی در حال افزایش است. از سویی دیگر منابع فسیلی در جهان رو به اتمام هستند و این منابع، از نظر اندازه و مقدار محدود بوده و در ضمن آلاینده محیط زیست نیز محسوب می‌شوند. از این رو در سالهای گذشته، گرایش به استفاده از منابع نوین و تجدیدپذیر انرژی، رو به فزونی گذاشته است. پیشرفت مسائل مربوط به محیط زیست و ترکیب آن با فناوری‌های استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی و اتصال آنها به شبکه قدرت، مباحث جدیدی را پیش روی محققین قرار داده است. از جمله این منابع تجدیدپذیر انرژی و پاک می‌توان به خورشید، باد، پیل‌های سوختی، زمین گرمایی و غیره اشاره نمود [۱].

استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی علاوه بر آثار زیست محیطی مطلوب خود، از نظر اقتصادی نیز به صرفه می‌باشد. می‌توان با ترکیب این منابع و تولید انرژی الکتریکی به صورت ترکیبی، باعث افزایش بازده و بهره‌برداری مناسب سیستم‌های تولید پراکنده شد. در سیستم‌های تولید توان ترکیبی، هر یک از منابع در تأمین بار نقش داشته و بدین ترتیب با پشتیبانی از یکدیگر مانع از عدم تأمین بار می‌شوند.

در این پایان‌نامه به مدیریت توان در سیستم‌های تولید توان ترکیبی بادی، پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی می‌پردازیم و با کنترل مناسب بر روی سیستم فوق، به دنبال بهره‌برداری بهینه از هر یک از منابع می‌باشیم. در همین راستا مروری بر کارهای پیشین انجام شده بر روی سیستم‌های تولید توان ترکیبی صورت گرفته است.

در [۱] از توان توربین بادی برای تغذیه الکترولیزر و بار استفاده شده است. هرگاه توان تولیدی توسط توربین بادی کمتر از توان مورد نیاز بار باشد، آنگاه پیل سوختی (FC^1) با مصرف هیدروژن تولیدی توسط الکترولیزر شروع به تولید توان الکتریکی نموده بار را تغذیه می‌کند. در صورتی که این دو قادر به تأمین بار نباشند، مازاد توان مورد نیاز بار توسط ابر خازن (UC^2) تأمین می‌شود. شکل (۱-۱)

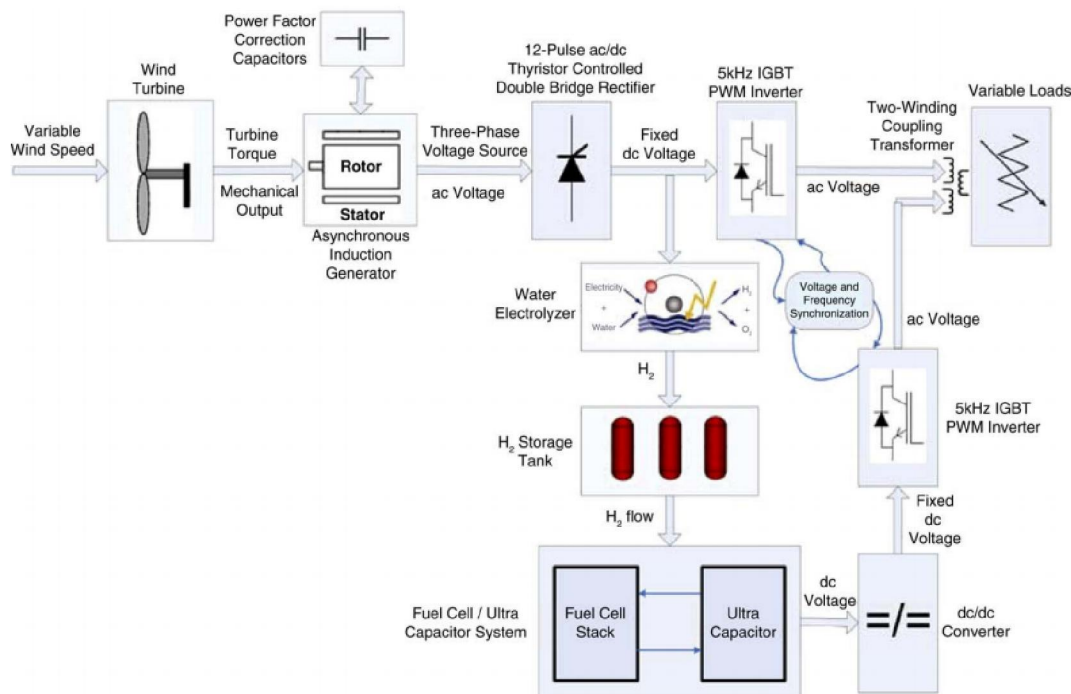
¹ Fuel Cell

² Ultra Capacitor

نشان‌دهنده بلوک دیاگرام شبیه‌سازی شده این سیستم می‌باشد. در این سیستم FC/UC با یکدیگر به صورت یک زیرسیستم می‌باشند که مطابق شکل (۱-۲) می‌باشند. نقش UC در این سیستم پوشش دینامیک کند FC در زمان‌های تغییر توان تولیدی FC و همچنین تأمین بار در صورت نیاز می‌باشد. همچنین استفاده از UC باعث کاهش هزینه سیستم می‌شود.

در این سیستم UC تنها زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که FC در حال کار باشد. استراتژی شارژ و دشارژ UC در این سیستم بدین صورت است که در زمان‌های کم باری، توان مازاد FC در UC ذخیره می‌شود و در زمان پر باری کمبود توان توسط UC جبران می‌شود.

ایراد این استراتژی در این است که برای زمانی که توان تولیدی توربین بیش از توان مورد نیاز بار و الکترولایزر باشد، راه کاری در نظر گرفته نشده است. همچنین کنترلی بر روی سطح شارژ باتری (SOC^۳) صورت نگرفته است و همین موضوع بزرگترین ایراد این سیستم می‌باشد.



شکل (۱-۱) بلوک دیاگرام سیستم مرجع [۱]

^۳ State of Charge

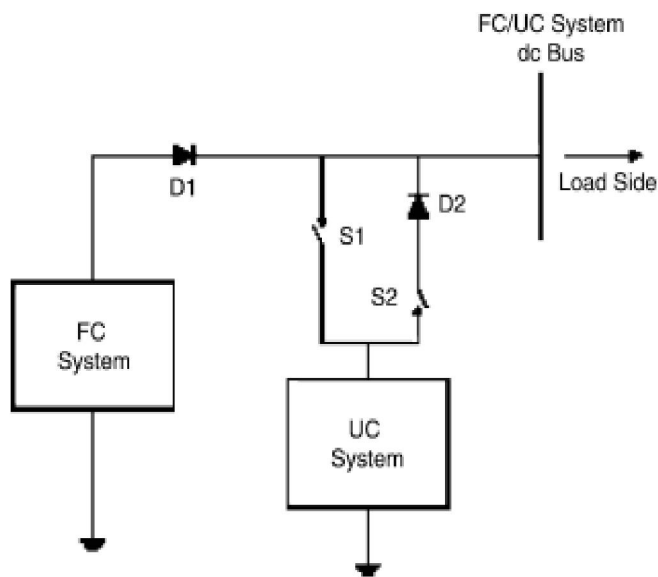
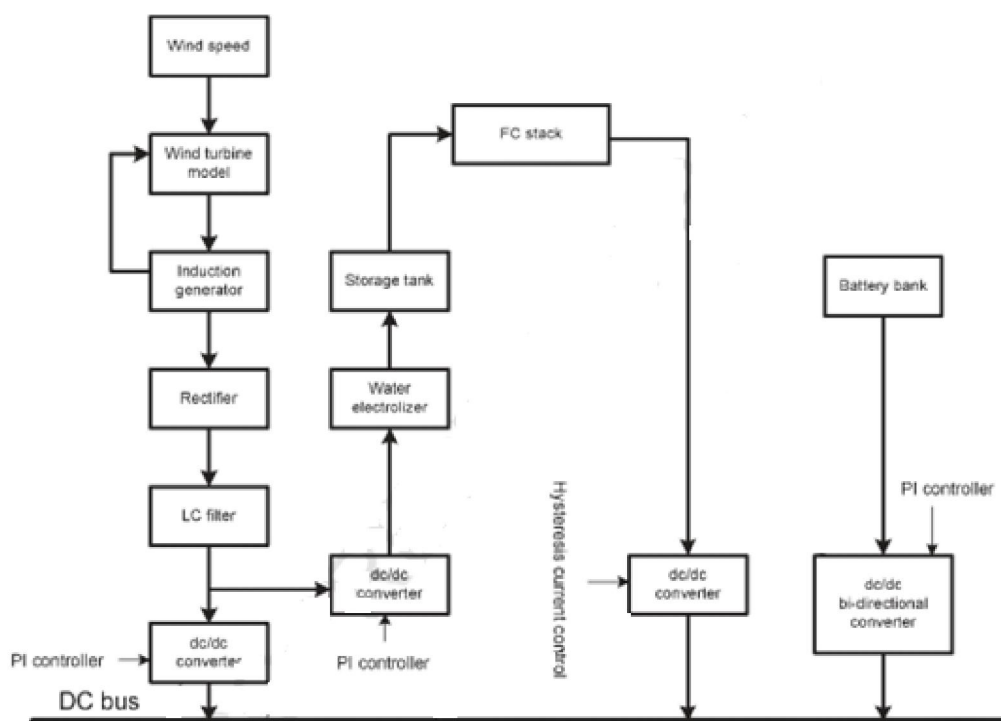


Fig. 10. The FC/UC hybrid system.

شکل (۲-۱) زیرسیستم پیل سوختی - ابر خازن [۱]

در [۲] توپولوژی سیستم به صورت شکل (۳-۱) می‌باشد. در این استراتژی از توربین بادی برای تغذیه بار و الکترولیزر استفاده می‌شود. در این استراتژی تا زمانی که فشار تانک ذخیره ساز هیدروژن به میزان مورد نظر نرسیده باشد، الکترولیزر همچنان به تولید هیدروژن ادامه می‌دهد. در غیر این صورت دیگر توانی به الکترولیزر انتقال نمی‌یابد.

حال اگر مابقی توان توربین بیش از توان مورد نیاز بار باشد، آنگاه مازاد توان در باتری‌ها ذخیره می‌شود. و اگر توان توربین کمتر از توان مورد نیاز بار باشد، آنگاه پیل سوختی شروع به افزایش توان تولیدی خود می‌کند. لازم به ذکر است که در این استراتژی FC همواره در حال کار و تولید توان می‌باشد.



شکل (۳-۱) توپولوژی کنترلی سیستم مرجع [۲]

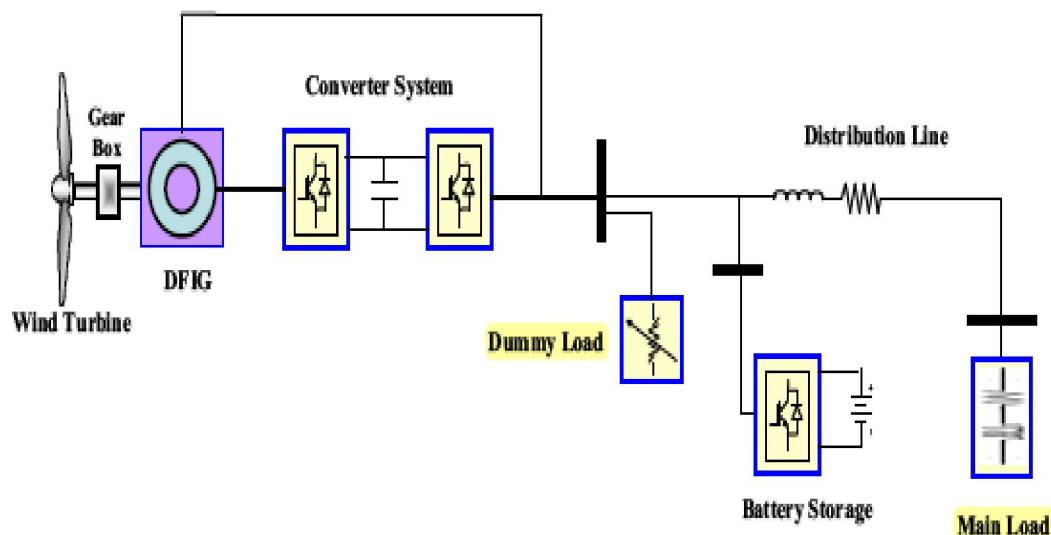
در صورتی که توان تولیدی توربین به همراه توان تولیدی FC بیش از بار باشد، مازاد توان در باتری‌ها ذخیره می‌شود. البته این امر در صورتی اتفاق می‌افتد که SOC باتری‌ها زیر ۸۰٪ باشد. در غیر این صورت پیل از توان تولیدی خود می‌کاهد.

اگر مجموع توان‌های تولیدی توربین و FC کمتر از توان مورد نیاز بار باشد، در این صورت مابقی توان از طریق ذخیره ساز تأمین می‌شود. همچنین ذخیره سازها به چگالی بالای انرژی خود، دینامیک FC را نیز پوشش می‌دهند.

مهم‌ترین ایراد این سیستم عدم سایزینگ مناسب اجزای سیستم می‌باشد. در این سیستم توربین بادی بکار رفته دارای ظرفیت بسیار پایینی نسبت به بار می‌باشد که همین امر باعث شده است که بیشتر بار توسط پیل سوختی تأمین گردد. همین امر می‌تواند باعث افزایش بیش از حد هزینه بهره‌برداری از سیستم در طول عمر پروژه گردد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. همچنین زمانی که نیاز

به افزایش توان پیل می‌باشد، پیل سوختی به اندازه ظرفیت نامی خود شروع به تولید می‌کند؛ درحالی‌که نیاز به تولید توان تا این مقدار نمی‌باشد.

در [۳] سیستم مورد مطالعه شامل یک ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه (DFIG^۴)، بار موهومی، باتری‌ها و بار اصلی می‌باشد. شکل (۴-۱) نشان‌دهنده این سیستم می‌باشد.



شکل (۴-۱) سیستم DFIG و ذخیره ساز [۳]

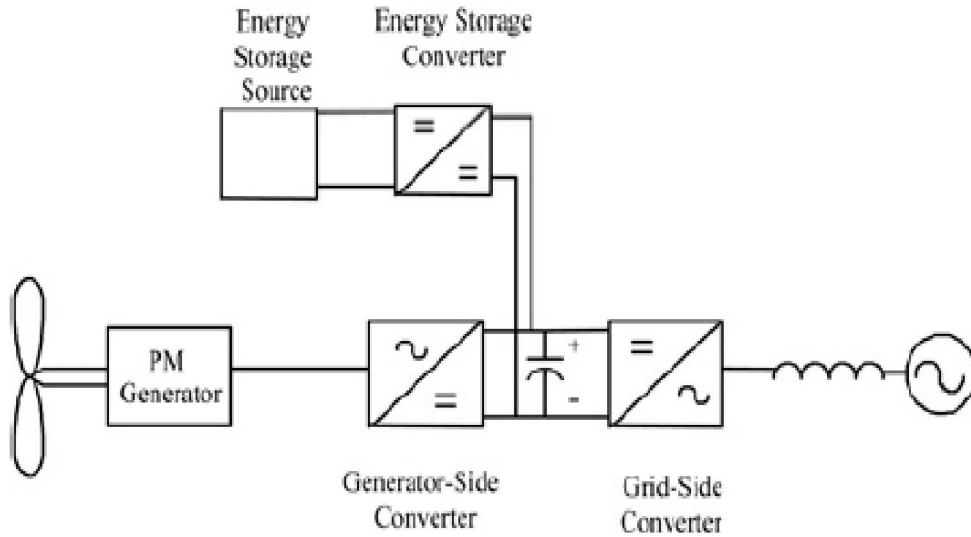
در این سیستم DFIG به عنوان منبع اصلی تولید توان مورد نیاز بار می‌باشد. همچنین سیستم باتری و اینورتر برای تأمین مقدار مشخص توان در صورت نیاز طراحی شده است. در این مرجع هدف گرفتن بیش‌ترین توان ممکن از توربین می‌باشد. بیش‌ترین توان تولیدی زمانی حاصل می‌شود که توربین تحت شرایط C_p بهینه عمل نماید. بار مجازی در واقع برای جذب اختلاف توان بین بار و تولید استفاده شده است. این مورد باعث تلف شدن توان مازاد تولیدی توسط منابع توان می‌شود.

در [۴] عملکرد سیستم ترکیبی بادی ذخیره ساز انرژی نشان داده شده در شکل (۵-۱) در دو حالت زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

^۴ Doubly Fed Induction Generator

۱. بار متغیر و توان تولیدی ژنراتور ثابت باشد.

۲. بار ثابت و توان تولیدی ژنراتور متغیر باشد.

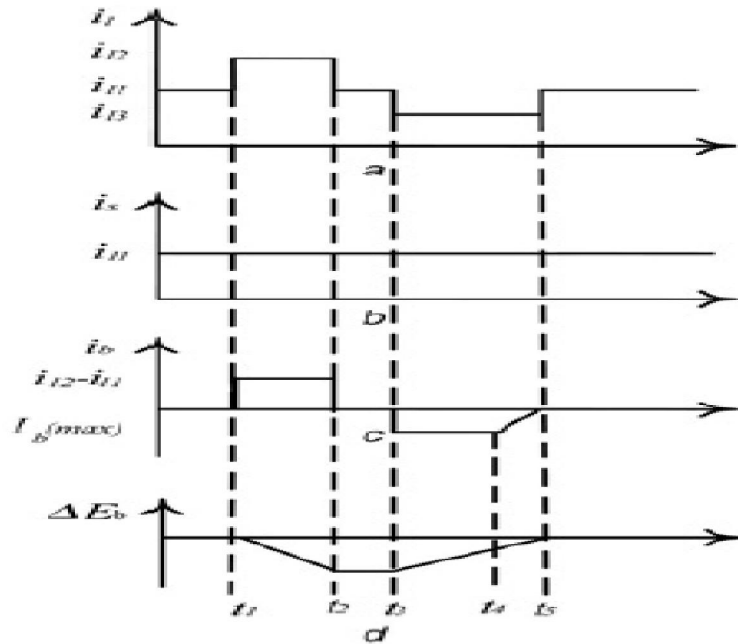


شکل (۵-۱) سیستم بادی-ذخیره ساز انرژی [۴]

۱. بار متغیر و توان تولیدی ژنراتور ثابت

تحت این شرایط، به واسطه فرض ثابت بودن سرعت باد، توان تولیدی ژنراتور ثابت می‌باشد و بار مورد استفاده در این حالت متغیر فرض می‌شود. بنابراین برای ایجاد تعادل بین تولید و تقاضا از ذخیره ساز انرژی استفاده شده است. با توجه به میزان بار، مازاد و یا کمبود توان تولیدی ژنراتور توسط باتری‌ها به ترتیب جذب و تزریق می‌شود. در شکل (۶-۱) عملکرد سیستم در این حالت به نمایش در آمده است.

مطابق شکل مشاهده می‌شود که در زمانی تولید کمتر از بار باشد، با دشارژ باتری مقدار کمبود توان جبران می‌شود. و زمانی که مقدار تولید بیش از بار باشد، مازاد توان توسط باتری جذب می‌شود.

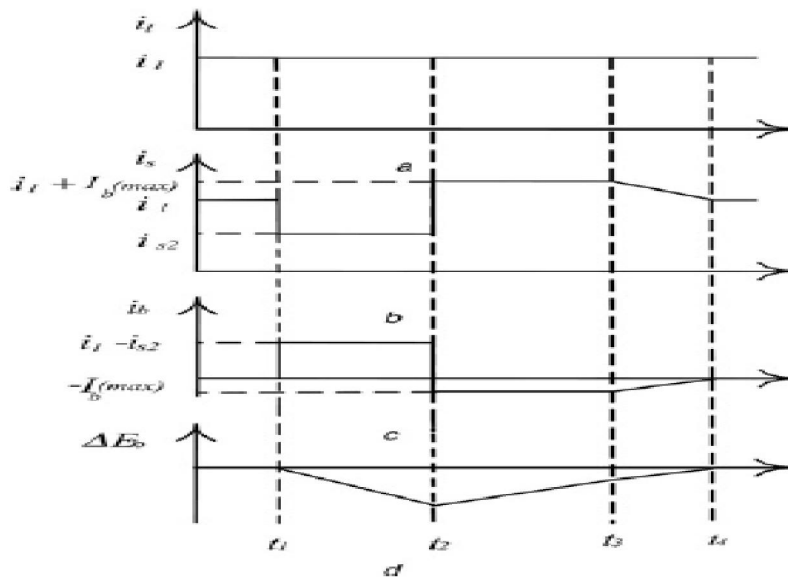


شکل (۶-۱) عملکرد سیستم تحت شرایط تولید ثابت- بار متغیر (a) بار متغیر (b) توان تولیدی ثابت ژنراتور (c) جریان ذخیره ساز با توجه به اختلاف بین بار و تولید (d) شارژ و دشارژ باتری‌ها

۲. بار ثابت و توان تولیدی ژنراتور متغیر

در این حالت با تغییر سرعت باد توان تولیدی توربین بادی نیز تغییر می‌کند اما بار مورد نظر ثابت و بدون تغییر می‌باشد. در این حالت نیز باتری‌ها عامل ایجاد تعادل در سیستم تولید و مصرف می‌باشند.

شکل (۷-۱) عملکرد سیستم را تحت این شرایط نشان می‌دهد. مطابق شکل، هرگاه بار کمتر از تولید باشد توان مازاد جذب باتری‌ها می‌شود و در حالتی بار بیشتر از تولید باشد، باقی توان مورد نیاز بار توسط باتری‌ها جبران می‌شود.



شکل (۷-۱) عملکرد سیستم تحت بار ثابت- تولید متغیر (a) بار (b) تولید توربین بادی (c) جریان ذخیره ساز با توجه به اختلاف بین بار و تولید (d) شارژ و دشارژ باتری‌ها

در این پایان‌نامه هدف طراحی استراتژی کنترلی و کنترل‌کننده مناسب برای سیستم ترکیبی بادی/ پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی باهدف پوشش و از بین بردن نارسایی‌های موجود در موارد فوق می‌باشد. در ادامه به معرفی هر یک از منابع سیستم فوق می‌پردازیم.

توربین بادی: وسیله ایست که بر اثر وزش باد و به حرکت درآمدن پره‌های توربین و در نتیجه ژنراتور متصل به توربین، تولید انرژی الکتریکی می‌نماید. به علت متغیر بودن سرعت باد، توان خروجی توربین نیز متغیر بوده و در نتیجه دارای نوسان در خروجی خود می‌باشد. لذا استفاده از یک سیستم پشتیبان به همراه توربین بادی کمک شایانی به افزایش قابلیت اطمینان سیستم نموده و باعث افزایش بازدهی سیستم می‌شود. در ادامه این موضوع بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد [۵].

پیل سوختی: وسیله‌ای است که به طور مستقیم انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. از پیل سوختی می‌توان برای تأمین بارهای محلی و یا حتی به صورت اتصال به شبکه بهره‌برداری نمود. از جمله مسائل مربوط به پیل‌های سوختی دینامیک کند این سیستم‌ها در برابر تغییرات توان خروجی (بر اثر تغییر تقاضا) می‌باشد. همین امر نیاز به استفاده از سیستم پشتیبان از

جمله ذخیره ساز انرژی را ضروری می‌نماید. با به‌کارگیری منبع پشتیبان در این سیستم، می‌توان به طور کامل تغییرات توان و آثار دینامیکی حاصل از آن را پوشش داده و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش داد [۶]-[۷].

ذخیره ساز انرژی: استفاده از ذخیره ساز انرژی می‌تواند در کاهش انحرافات ولتاژ سیستم و همچنین جلوگیری از هدر رفتن انرژی مازاد تولیدی، موثر واقع شود. همچنین در جلوگیری از عدم تأمین بخشی از بار نیز نقش به‌سزایی ایفا می‌کند. عملکرد سیستم ذخیره ساز انرژی بدین صورت است که در مواقعی که انرژی تولیدی سیستم کمتر از میزان بار باشد، از انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز انرژی می‌توان برای جبران این کمبود استفاده نمود و در شرایطی که توان تولیدی سیستم بیش از مقدار توان مورد نیاز بار باشد، این مازاد انرژی در سیستم ذخیره‌ساز انرژی ذخیره می‌شود تا در زمان مورد نیاز از آن استفاده نمود. انواع ذخیره سازهای انرژی شامل باتری‌ها، ابر خازن‌ها، پمپ آب، ذخیره ساز هیدروژن، کمپرسورهای ذخیره ساز هوا و... می‌باشند. رایج‌ترین این ذخیره سازها عبارت‌اند از باتری‌ها، ابر خازن‌ها و ذخیره ساز هیدروژن. در مقایسه بین باتری‌ها و ابر خازن‌ها می‌توان به علت عملکرد دینامیکی سریع، ابر خازن‌ها را بهتر از باتری‌ها ارزیابی نمود. همچنین ابر خازن‌ها قابلیت شارژ و دشارژ سریع تری دارند. در کل ابر خازن‌ها بازدهی بیشتری نسبت به باتری‌ها داشته و دارای دینامیک سریع تری می‌باشند. همچنین دمای عملکرد کمتری نسبت به باتری‌ها می‌باشند. اما از نظر اقتصادی، باتری‌ها نسبت به ابر خازن‌ها ارزان‌تر می‌باشند و همین موضوع در انتخاب نوع ذخیره‌ساز انرژی عامل مهمی می‌باشد [۸] و [۱۱].

در ادامه به تشریح کامل توربین‌های بادی و پیل سوختی در فصل دوم می‌پردازیم. در فصل سوم به تعیین اندازه بهینه اجزاء سیستم پرداخته و سپس در فصل چهارم استراتژی کنترل سیستم مورد نظر را تشریح می‌شود. در فصل پنجم مدل‌سازی سیستم و در فصل ششم نتایج شبیه‌سازی سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. فصل هفتم به نتیجه‌گیری می‌باشد.

فصل دوم

بررسی منابع انرژی در سیستم تولید توان ترکیبی

توربین بادی اپیل سوختی و ذخیره ساز انرژی

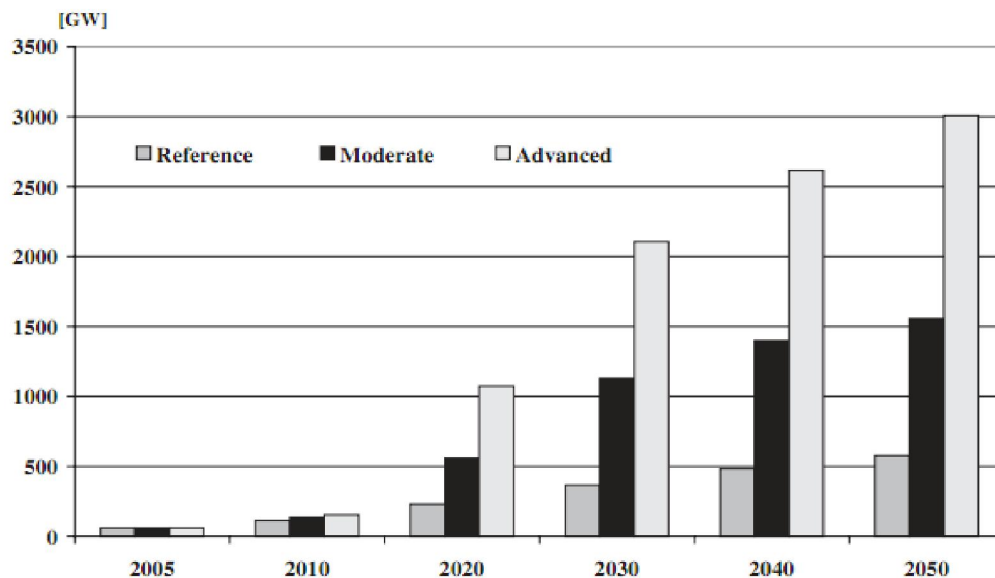
توربین‌های بادی یکی از منابع تولید انرژی می‌باشند که انرژی حاصل از باد را که به طور طبیعی در طبیعت موجود بوده و انرژی پاک محسوب می‌شود، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نمایند. همچنین پیل‌های سوختی از منابع نوین انرژی می‌باشند که طی عملیات شیمیایی در درون خون انرژی الکتریکی تولید می‌نمایند. در این بخش به معرفی توربین‌های بادی و انواع پیل‌های سوختی و نحوه عملکرد آنها می‌پردازیم.

۲-۱ توربین‌های بادی:

در سال‌های گذشته، گرایش به استفاده از منابع نوین و تجدیدپذیر انرژی، با توجه به مسائل زیست‌محیطی و مسائل اقتصادی افزایش یافته است. یکی از ارزان‌ترین و سهل‌الوصول‌ترین آنها انرژی باد است. بررسی میزان استفاده از این انرژی در سال‌های اخیر به خوبی گویای اهمیت و جایگاه آن در تأمین انرژی در سطح جهان است. منظور از توان بادی، تبدیل انرژی باد به نوعی مفید از انرژی مانند انرژی الکتریکی است که این کار به وسیله توربین‌های بادی صورت می‌گیرد.

قدیمی‌ترین روش استفاده از انرژی باد، به ایران باستان بازمی‌گردد. برای نخستین بار، ایرانیان موفق شدند با استفاده از نیروی باد، چرخ چاه را به گردش درآورده و آب را از عمق چاه به سطح مزارع برسانند. با گذشت زمان و با پیشرفت فناوری محققان موفق به تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی شده و بدین صورت از آن بهره‌برداری نمودند. در انتهای سال ۲۰۰۸ میزان ظرفیت تولیدی انرژی الکتریکی توسط توربین‌های بادی در سراسر جهان برابر حدود ۱۲۰ گیگا وات بود. و در انتهای سال ۲۰۱۲ این مقدار به حدود ۶٪ کل انرژی تولیدی جهان رسید. در این میان کشورهای دانمارک با ۲۵ درصد، اسپانیا و پرتغال با ۹ درصد و آلمان با ۷ درصد از نظر درصد تولید برق بادی از کل تولید انرژی الکتریکی در جایگاه‌های نخست قرار دارند [۱۳-۱۲].

شکل (۱-۲) نشان‌دهنده پیش‌بینی صورت گرفته برای آینده توان تولیدی توسط توربین‌های بادی تا سال ۲۰۵۰ می‌باشد که در سه سطح ابتدایی، نیمه پیشرفته و پیشرفته در نظر گرفته شده است.



شکل (۱-۲) پیش‌بینی روند رشد تولید انرژی بادی [۱۲]

انرژی بادی در مقادیر زیاد در مزارع بادی تولید و به شبکه الکتریکی منتقل می‌شود. از توربین‌های بادی در تعداد کم معمولاً فقط برای تأمین برق در مناطق دور افتاده استفاده می‌شود. اما از جمله دلایل تمایل کشورها برای افزایش ظرفیت تولید برق بادی مزایای بسیار زیاد این روش تولید انرژی الکتریکی است. چرا که انرژی بادی فراوان، تجدیدپذیر و پاک بوده و همچنین در مقایسه با استفاده از انرژی سوخت‌های فسیلی میزان بسیار کمتری گاز گلخانه‌ای منتشر می‌کند. از سوی دیگر استفاده از این منبع تنها نیاز به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه داشته و بهره‌برداری از این انرژی با توجه به اینکه باد همواره وجود دارد، هزینه‌ای در بر نخواهد داشت [۱۴].

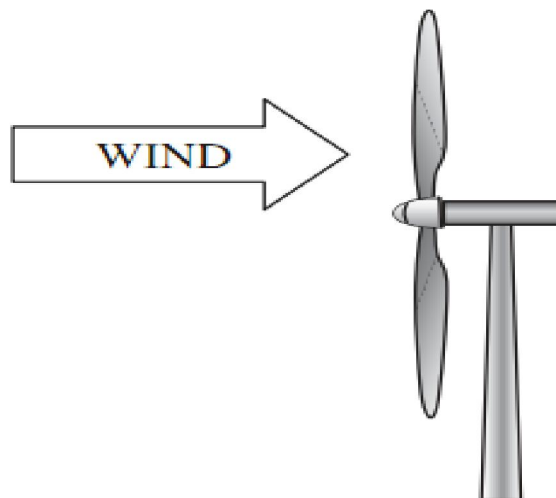
منشا باد یک موضوع پیچیده است. از آنجایی که زمین به طور نامساوی به وسیله نور خورشید گرم می‌شود بنابراین در قطب‌ها انرژی گرمایی کمتری نسبت به مناطق استوایی وجود دارد. همچنین

در خشکی‌ها تغییرات دما با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد و بنابراین خشکی‌های زمین نسبت به دریاها زودتر گرم و سرد می‌شوند. این تفاوت دمای جهانی موجب به وجود آمدن یک سیستم جهانی تبادل حرارتی می‌شود که از سطح زمین تا بالای جو، که مانند یک سقف مصنوعی عمل می‌کند، ادامه دارد. بیشتر انرژی که در حرکت باد وجود دارد را می‌توان در سطوح بالای جو پیدا کرد [۱۵].

انرژی باد نظیر سایر منابع انرژی تجدید پذیر، به طور گسترده ولی پراکنده در دسترس می‌باشد. یک برآورد کلی این‌گونه می‌گوید که ۷۲ تراوات (TW^{Δ}) انرژی باد بر روی زمین وجود دارد که پتانسیل تبدیل به انرژی الکتریکی را دارد و این مقدار قابل ترقی نیز می‌باشد [۱۲].

۲-۱-۱ نحوه عملکرد توربین بادی:

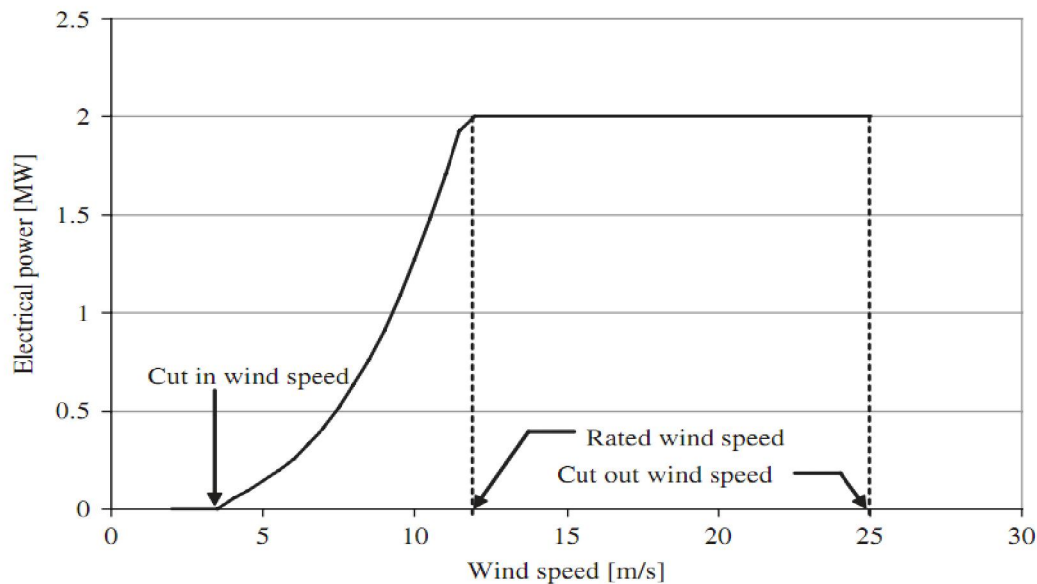
توربین‌های بادی، با استفاده از نیروی طبیعی باد و با به حرکت درآوردن پره‌های توربین و در نتیجه ژنراتور متصل به آن، انرژی الکتریکی تولید می‌کنند. شکل (۲-۲) نشان‌دهنده شمایی از توربین بادی می‌باشد.



شکل (۲-۲) توربین بادی [۱۲]

^Δ Thera Watt

بیشتر توربین‌های بادی زمانی که سرعت باد حدود ۳-۴ متر بر ثانیه می‌باشد، شروع به تولید برق می‌نمایند و برای جلوگیری از خسارات حاصل از توفان در سرعت باد حدود ۲۵ متر بر ثانیه و یا بیشتر متوقف شده و از کار می‌افتند [۱۵]. در شکل (۳-۲) منحنی عملکرد توربین بادی بر اساس سرعت باد نشان داده شده است.



شکل (۳-۲) رابطه سرعت باد و توان تولیدی توربین بادی [۱۲]

طبق مراحل زیر انرژی باد به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود [۱۲]:

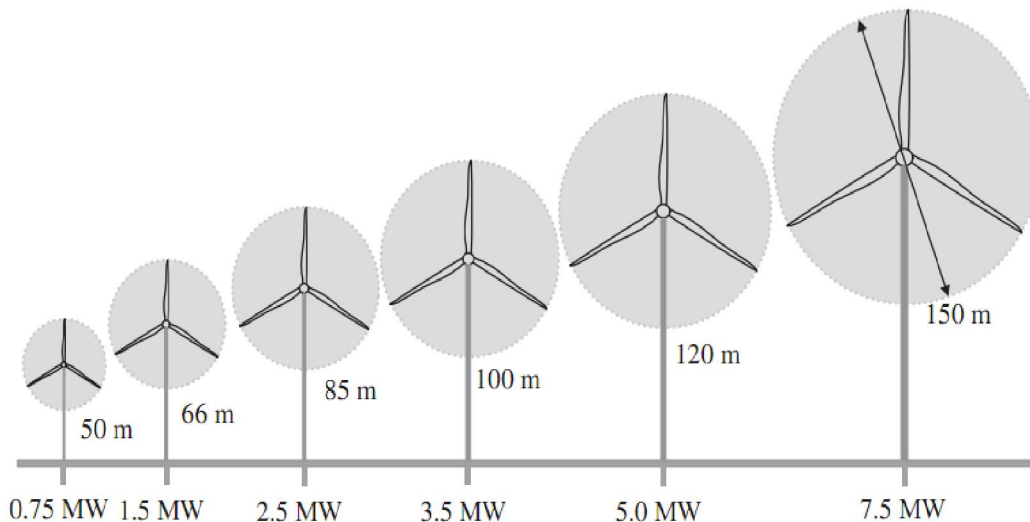
۱. پره‌های چرخان، پروانه داخل موتور را که به جعبه‌دنده می‌رود می‌چرخاند.
۲. جعبه‌دنده سرعت چرخش را برای ژنراتور افزایش می‌دهد.
۳. ژنراتور از میدان مغناطیسی برای تبدیل انرژی چرخشی به انرژی الکتریکی استفاده می‌کند. نیروی خروجی تولیدشده به یک ترانسفورماتور انتقال می‌یابد.
۴. ترانسفورماتور انرژی حاصل از ژنراتور را به ولتاژ مناسب برای بهره‌گیری از آن تبدیل می‌کند.

فرمول (۱-۲) نشان‌دهنده توان تولیدی توربین بادی می‌باشد [۱۲ و ۱۴ و ۱۶]:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{wt} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \\ C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{16}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \\ OR \quad \lambda = \frac{r w_m}{V} \end{array} \right. \quad (1-2)$$

در این معادلات ρ نشان‌دهنده چگالی باد، A مساحت جاروب شده توسط پره‌ها (m^2)، V_w سرعت باد (m/s) و C_p ضریب بهره‌وری (بستگی به طراحی توربین دارد)، β زاویه پره‌ها، λ نرخ سرعت، r شعاع پره‌ها (m) و w_m سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب (rad/sec) می‌باشند.

همان‌طور که فرمول (۱-۲) آمده، توان تولیدی توربین نسبت مستقیم با مساحت جاروب شده توسط پره‌ها دارد. این موضوع در شکل (۴-۲) نیز نشان داده شده است.



شکل (۴-۲) رابطه بین مساحت جاروب شده توسط پره‌ها و توان خروجی توربین بادی [۱۲]

زمانی که توربین انرژی باد را می‌گیرد سرعت باد کم خواهد شد که این خود باعث جدا شدن باد می‌شود. آلبرت بتز (Albert Betz) فیزیکدان آلمانی در ۱۹۱۹ اثبات کرد که یک توربین حداکثر

می‌تواند ۵۹ درصد از انرژی بادی را که در مسیر آن می‌وزد استخراج کند و به این ترتیب C_p در معادله بالا هرگز بیشتر از ۰/۵۹ نخواهد شد.

۲-۱-۲ ضریب ظرفیت:

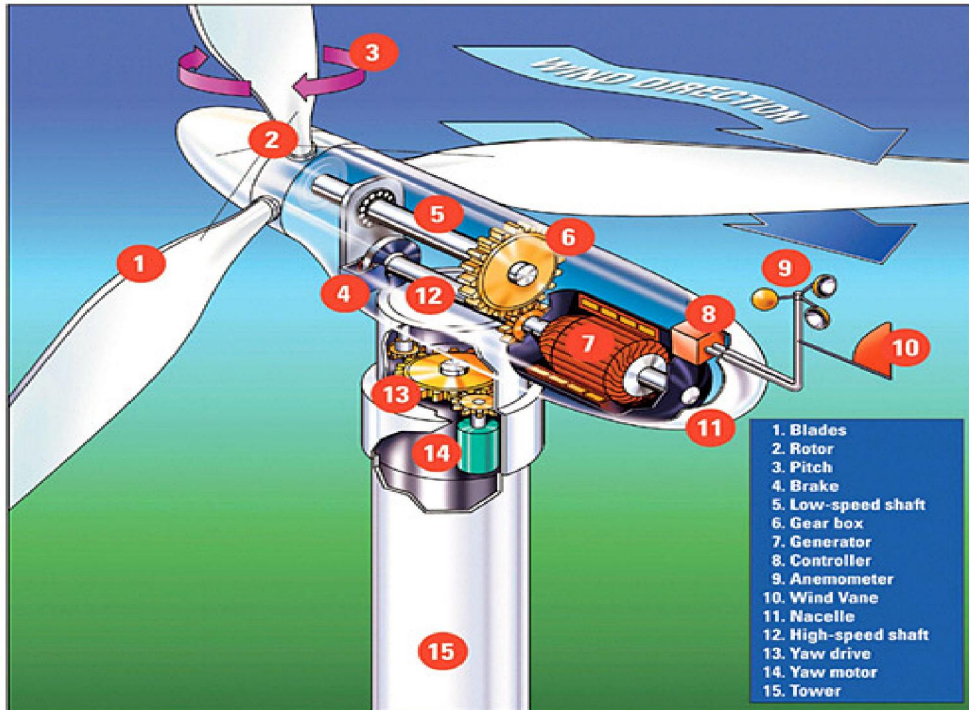
نسبت میزان توان حقیقی تولیدشده توسط نیروگاه و ماکزیمم ظرفیت تولیدی نیروگاه را ضریب ظرفیت می‌نامند. تا زمانی که سرعت باد ثابت نباشد تولید سالیانه انرژی الکتریکی توسط نیروگاه بادی هرگز برابر حاصل‌ضرب توان تولیدی نامی در مجموع ساعت کار آن در یک سال نخواهد شد. یک نیروگاه بادی نصب‌شده در یک محل مناسب در ساحل ضریب ظرفیت سالیانه‌ای در حدود ۳۵٪ دارد. برخلاف نیروگاه‌های سوختی، ضریب ظرفیت در یک نیروگاه بادی به شدت به خصوصیات ذاتی باد وابسته است. ضریب ظرفیت در انواع دیگر نیروگاه‌ها معمولاً به بهای سوخت و زمان مورد نیاز برای انجام عملیات تعمیر بستگی دارد. از آنجایی که نیروگاه‌های هسته‌ای دارای هزینه سوخت نسبتاً پایینی هستند، بنابراین محدودیت‌های مربوط به تأمین سوخت این نیروگاه‌ها نسبتاً پایین است که این خود ضریب ظرفیت این نیروگاه‌ها را به حدود ۹۰٪ می‌رساند [۱۷].

نیروگاه‌هایی که از توربین‌های گاز طبیعی برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند به علت پرم هزینه بودن تأمین سوخت معمولاً تنها در زمان اوج مصرف به تولید می‌پردازند. به همین دلیل ضریب ظرفیت این توربین‌ها پایین بوده و معمولاً بین ۵ تا ۲۵ درصد می‌باشد.

۲-۱-۳ ساختمان توربین بادی

توربین‌های بادی مدرن به دو شاخه اصلی دسته‌بندی می‌شوند :

۱. توربین‌های با محور افقی
۲. توربین‌های با محور عمودی



شکل (۵-۲) اجزای توربین بادی

همان طور که در شکل (۵-۲) نیز مشخص است، توربین بادی از برج نگه‌دارنده، پره‌ها، جعبه‌دنده، ژنراتور، محور توربین و... تشکیل یافته است. در زیر اجزای توربین فوق در زیر به طور کامل معرفی می‌شوند [۱۷].

۱. پره‌ها (Blades): بیشتر توربین‌ها دارای دو یا سه پره می‌باشند. وزش باد بر روی پره‌ها باعث چرخش پره‌ها می‌شود.

۲. روتور (Rotor): بال‌ها و هاب به روتور متصل هستند.

۳. زاویه پره (pitch): زاویه پره‌های توربین در محور عرضی را نشان می‌دهد.

۴. ترمز (Brake): از این وسیله برای توقف روتور در مواقع اضطراری استفاده می‌شود. عمل ترمز کردن می‌تواند به صورت مکانیکی، الکتریکی یا هیدرولیکی انجام گیرد.

۵. شفت با سرعت پایین (Low-speed shaft): روتور حول این محور چرخیده و سرعت چرخش

آن ۱۵ تا ۶۰ دور در دقیقه می‌باشد.

۶. گیربکس (Gear box): چرخ‌دنده‌ها به شفت سرعت پایین متصل هستند و آنها از طرف دیگر همان طور که در شکل مشخص شده به شفت با سرعت بالا متصل می‌باشند و افزایش سرعت چرخش از ۱۵ تا ۶۰ rpm به سرعتی حدود ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ rpm را ایجاد می‌کنند. این افزایش سرعت برای تولید برق توسط ژنراتور الزامیست. هزینه ساخت گیربکس‌ها بالاست در ضمن گیربکس‌ها بسیار سنگین هستند. مهندسان در حال انجام تحقیقات گسترده‌ای می‌باشند تا درایوهایی بسازند که ژنراتورها را با سرعت کمتری به چرخش درآورند تا نیازی به گیربکس نباشد.

۷. ژنراتور: وظیفه ژنراتور تولید انرژی الکتریکی می‌باشد.

۸. کنترل‌کننده: کنترل‌کننده‌ها وقتی که سرعت باد به ۴ تا ۵ متر بر ثانیه می‌رسد ماشین را راه‌اندازی می‌کنند و وقتی سرعت از حدود ۲۴ متر بر ثانیه بیشتر می‌شود دستور خاموش شدن ماشین را می‌دهند. این عمل از آن جهت صورت می‌گیرد که توربین‌ها قادر نیستند زمانی که سرعت باد به ۲۴ متر بر ثانیه می‌رسد حرکت کنند زیرا ژنراتور به سرعت به حرارت بسیار بالایی خواهد رسید که ممکن است به سیم‌پیچی ماشین آسیب برسد. همچنین برای کنترل زاویه پره‌ها کنترل‌کننده‌هایی استفاده می‌شود.

۹. بادسنج (Anemometer): این وسیله سرعت باد را اندازه گرفته و اطلاعات حاصل از آنرا به کنترل‌کننده‌ها انتقال می‌دهد.

۱۰. بادنما (Wind vane): وسیله‌ای است که جهت وزش باد را اندازه‌گیری می‌کند و کمک می‌کند تا جهت توربین نسبت به باد در وضعیت مناسبی قرار داشته باشد.

۱۱. Nacelle: قسمت انتهایی توربین می‌باشد.

۱۲. شفت با سرعت بالا (High-speed shaft): وظیفه آن به حرکت در آوردن ژنراتور می‌باشد.

۱۳. درایو انحراف (Yaw drive): وسیله ایست که وضعیت توربین را هنگامی که باد در خلاف جهت می‌وزد کنترل می‌کند و زمانی استفاده می‌شود که قرار است روتور در مقابل وزش باد از روبرو قرار گیرد. اما زمانی که باد در جهت توربین می‌وزد نیازی به استفاده از این وسیله نمی‌باشد.

۱۴. موتور انحراف (Yaw motor) : برای به حرکت در آوردن درایو انحراف مورد استفاده قرار می-گیرد.

۱۵. برج (Tower) : برج‌ها از فولادهایی که به شکل لوله درآمده‌اند ساخته می‌شوند. توربین‌هایی که بر روی برج‌هایی با ارتفاع بیشتر نصب شده‌اند انرژی بیشتری دریافت و تولید می‌کنند.

۲-۱-۴ انواع توربین‌های بادی

توربین‌های بادی از نظر عملکرد در دو نوع سرعت ثابت و سرعت متغیر می‌باشند. در زیر راجع به این دو نوع توربین صحبت شده است [۱۱]-[۱۵].

۲-۱-۴-۱ توربین‌های بادی با سرعت ثابت :

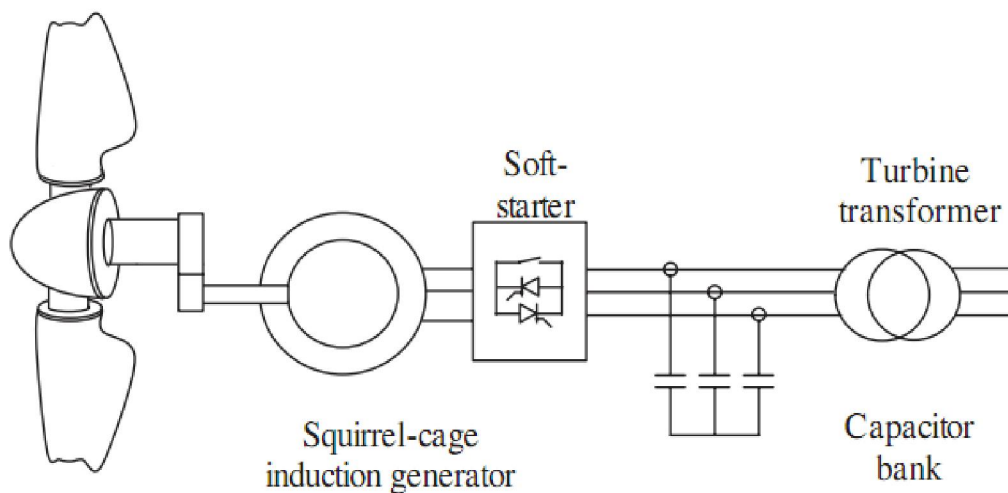
تا اوایل ۱۹۹۰، استاندارد نصب و بهره‌برداری بر مبنای توربین‌های بادی با سرعت ثابت بود. در این نوع توربین‌ها، صرف‌نظر از سرعت باد سرعت رتور توربین (محور) ثابت است. این سرعت به فرکانس شبکه، ساختمان ژنراتور و نیز به نسبت دنده‌ها در گیربکس بستگی دارد.

این نوع توربین‌ها دارای ژنراتور القایی قفس سنجابی با رتور سیم‌پیچی شده هستند که مستقیماً متصل به شبکه قدرت می‌باشند. این ژنراتورها به یک استارتر نرم و به بانک‌های خازنی برای جبران توان راکتیو مجهز هستند. این ژنراتور به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در یک سرعت مشخص باد، بیش‌ترین بازدهی را داشته باشند. به منظور افزایش توان تولیدی، این نوع توربین‌های بادی دارای دو نوع تنظیم بر روی سیم‌پیچی‌های استاتور هستند، یکی در سرعت‌های پایین باد (نوعاً ۸ قطب) و دیگری در سرعت‌های متوسط یا بالا (۴ قطب یا ۶ قطب) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲].

این نوع توربین‌ها مزایایی از قبیل سادگی، استحکام و قابلیت اطمینان بالایی دارند و کارهای علمی و پژوهشی بسیاری بر روی آنها انجام شده است. قیمت اجزای الکتریکی و درایو آنها نیز پایین است [۱۲] و [۱۶].

معایب این نوع توربین‌ها نیز عبارت‌اند از توان راکتیو مصرفی غیرقابل کنترل، استرس مکانیکی و کنترل محدود کیفیت توان. به علت عملکرد سرعت ثابت آنها، تمامی نوسانات در سرعت باد به صورت نوسانات در گشتاور مکانیکی و از آنجا به صورت نوسانات در توان الکتریکی شبکه ظاهر می‌شوند. در مورد شبکه‌های ضعیف، نوسانات توان می‌تواند به نوسانات بزرگ ولتاژ منتهی شوند که باعث ایجاد تلفات قابل توجه در خطوط انتقال می‌شوند [۱۲] و [۱۶].

در شکل (۶-۲) شماتیکی از این نوع توربین‌ها مشاهده می‌شود.



شکل (۶-۲) توربین بادی با سرعت ثابت [۱۲]

۲-۴-۱-۲ توربین‌های بادی با سرعت متغیر

در سال‌های اخیر، توربین‌های بادی با سرعت متغیر، اکثریت غالب را در میان توربین‌های نصب‌شده تشکیل داده‌اند. در این حالت، امکان تنظیم سرعت چرخش رتور (با افزایش یا کاهش شتاب)

وجود دارد. سیستم الکتریکی توربین‌های بادی با سرعت متغیر، بسیار پیچیده‌تر از توربین‌های سرعت ثابت است. این نوع توربین‌ها، نوعاً دارای ژنراتور القایی یا سنکرون هستند و از طریق یک مبدل به شبکه متصل می‌شوند [۱۲].

مزایای این نوع توربین‌ها عبارت است از افزایش انرژی به دست آمده از باد، بهبود کیفیت توان و کاهش استرس مکانیکی [۱۲].

معایب آنها نیز عبارت است از تلفات در قسمت‌های درایو الکترونیکی، استفاده از اجزا بیشتر و افزایش هزینه ناشی از تجهیزات سیستم‌های الکترونیکی. در این نوع توربین‌ها، نوسانات توان ناشی از نوسانات باد، عمدتاً به صورت تغییرات در سرعت روتور توربین و ژنراتور ظاهر می‌شود [۱۶].

در زیر به معرفی ۲ نوع پیکربندی متفاوت از توربین‌های با سرعت متغیر شامل توربین‌های از نوع DFIG و FRC می‌پردازیم.

۱-۲-۴-۱-۲ توربین‌های بادی سرعت متغیر از نوع ژنراتور القایی تغذیه

دوگانه (DFIG)

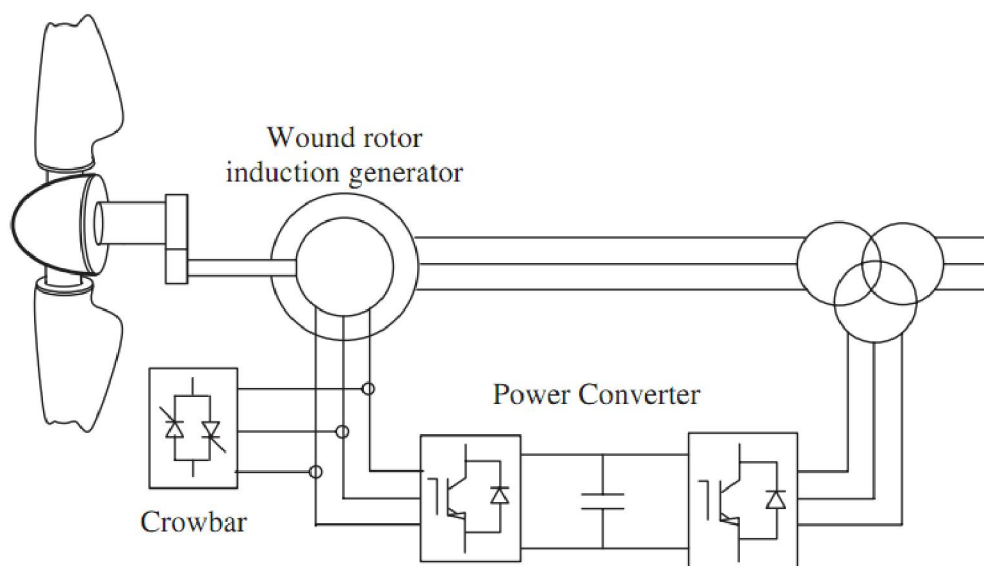
شکل (۲-۷) سیستم توربین بادی بر پایه DFIG^۶ را نشان می‌دهد. در سیستم DFIG از ژنراتور القایی روتور سیم‌پیچی شده استفاده می‌شود. توان تولیدی در این سیستم توسط پایانه‌های استاتور و روتور ژنراتور به شبکه تزریق می‌شود. همچنین روتور می‌تواند از شبکه توان جذب نماید. زمانی که سرعت روتور بیش از سرعت سنکرون باشد، توان از روتور نیز به شبکه تزریق می‌شود و هنگامی که سرعت روتور کمتر از سرعت سنکرون باشد، در این حالت روتور توسط مبدل متصل به سیم‌پیچ‌های روتور از شبکه توان جذب می‌کند.

^۶ Doublely Fed Induction Generator

ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه (DFIG)، گزینه‌ای جالب، با بازاری رو به فزونی و با تقاضای بالا است. همان طور که اشاره شد، DFIG، یک ژنراتور القایی است که استاتور به طور مستقیم به شبکه سه فاز با فرکانس ثابت متصل است و سیم‌پیچی رتور توسط یک مبدل ولتاژ-مرجع با کلیدهای IGBT با طبقات پشت به پشت تک جهت تغذیه می‌شود. سرعت عملکرد این سیستم در یک گستره وسیع اما محدود قرار دارد. هم در طول عملکرد عادی و هم در طول خطاها، رفتار ژنراتور توسط مبدل توان و کنترل‌کننده‌های آن تنظیم می‌شود. مبدل توان، متشکل از دو مبدل است، مبدل سمت شبکه و مبدل سمت روتور، که هر کدام به صورت مستقل کنترل می‌شوند. ایده اصلی این است که مبدل سمت روتور توان‌های اکتیو و راکتیو را با کنترل جریان روتور، کنترل می‌کند، در حالی که مبدل سمت شبکه، ولتاژ ولتاژ لینک DC را کنترل می‌کند تا از عملکرد کانورتر در ضریب توان واحد (توان راکتیو صفر) اطمینان حاصل شود. بسته به شرایط کاری درایو، توان به روتور وارد و یا از آن خارج می‌شود. در شرایط فوق سنکرون توان از رتور به طرف شبکه و در شرایط زیر سنکرون، توان از شبکه به سمت روتور جاری می‌شود. در هر دو حالت، توان از استاتور به طرف شبکه می‌رود [۱۲].

مزایای توربین‌های DFIG عبارت‌اند از [۱۲]:

۱. داشتن توانایی کنترل بر روی توان راکتیو
 ۲. توانایی کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو با کنترل جریان روتور
 ۳. قابلیت مغناطیس شدن از طرف روتور
- همان طوری که اشاره شد، مبدل سمت شبکه در ضریب توان واحد عمل می‌کند و خود را درگیر تبادل توان راکتیو نمی‌کند.



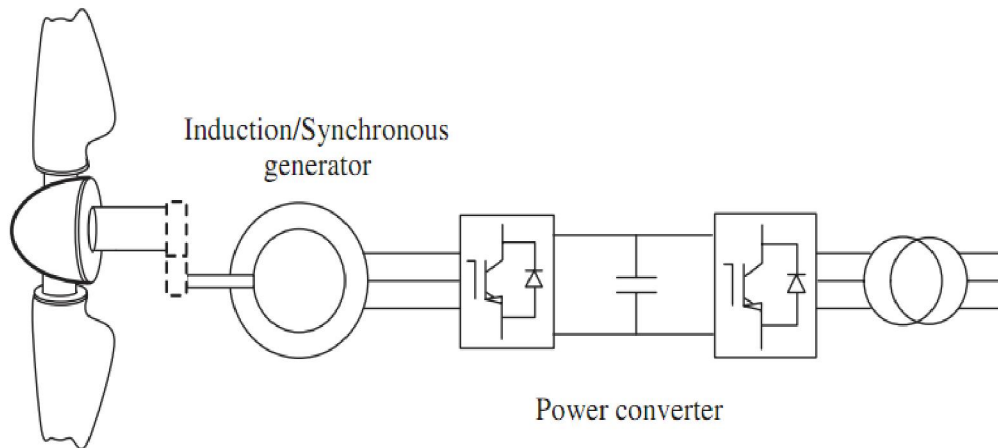
شکل (۷-۲) شمای توربین بادی با سرعت متغیر از نوع DFIG [۱۲]

۲-۲-۴-۱-۲ توربین‌های بادی سرعت متغیر از نوع تمام کنترل شونده

(FRC)

شکل (۸-۲) نیز نشان‌دهنده توربین بادی از نوع FRC^۷ می‌باشد. در سیستم FRC از هر نوع ژنراتوری اعم از سنکرون و آسنکرون می‌توان استفاده نمود. همچنین در این سیستم می‌توان از گیربکس استفاده نکرد. در این سیستم تمام انرژی تولیدی توربین بادی به مبدلی که در مسیر شبکه قرار گرفته انتقال می‌یابد. زیرا فرکانس و توان تولیدی بر اثر تغییرات سرعت باد تغییر می‌کند. بنابراین از این مبدل برای سنکرون کردن شرایط توان تولیدی با شبکه استفاده می‌شود و سپس توان به شبکه تزریق می‌شود. در این سیستم، مبدل سمت ژنراتور یک یکسو کننده بوده و مبدل سمت شبکه یک اینورتر می‌باشد. استراتژی‌های مختلفی برای کنترل این مبدل‌ها وجود دارد [۱۲].

^۷ Fully Rate Converter



شکل (۸-۲) شمای توربین بادی با سرعت متغیر از نوع FRC [۱۲]

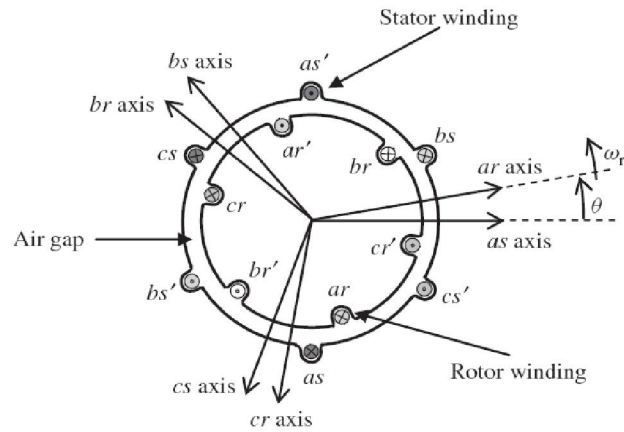
۲-۱-۵ انواع ژنراتورهای مورد استفاده در توربین‌های بادی

در کل دو نوع ژنراتور در توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ژنراتورهای سنکرون و آسنکرون. هر یک از این ژنراتورها دارای ویژگی‌هایی می‌باشند که در ادامه به آنها می‌پردازیم.

۲-۱-۵-۱ ژنراتورهای آسنکرون (القایی)

ژنراتور آسنکرون، متداول‌ترین نوع ژنراتور مورد استفاده در توربین‌های بادی هستند. استحکام و سادگی مکانیکی و قیمت ارزان، جزء مزایای آن و نیاز به جریان مغناطیس‌کنندگی جزء معایب آن است. توان راکتیو مصرفی آنها توسط بانک خازنی و یا توسط شبکه و ادوات الکترونیک قدرت تأمین می‌شود. میدان مغناطیسی به وجود آمده در آنها با سرعتی که توسط قطب‌های سیم‌پیچی و فرکانس شبکه تعیین می‌شود و سرعت سنکرون نام دارد، می‌چرخد. چنانچه رتور با سرعتی بیش از سرعت سنکرون بچرخد، در آن میدان مغناطیسی، ولتاژ القا می‌شود و جریان در سیم‌پیچ‌های آن جاری می‌شود [۱۲].

شکل (۹-۲) مدل ماشین آسنکرون را نشان می‌دهد.



شکل (۹-۲) مدار ماشین آسنکرون [۱۲]

در ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده، مشخصه‌های الکتریکی رتور می‌تواند از بیرون کنترل شود و ولتاژ آن را تحت تأثیر قرار دهند. سیم بندی رتور می‌تواند از طریق جاروبک و حلقه‌های لغزان به بیرون وصل شوند یا از طریق ادوات الکترونیک قدرت، که ممکن است به حلقه‌های لغزان و جاروبک نیاز داشته باشند یا نیاز نداشته باشند [۱۲].

شکل (۱۰-۲) ارتباط بین توان مکانیکی ورودی به ژنراتور و توان الکتریکی خروجی ژنراتور را نشان می‌دهد.

$$P_m = P_{in} = P_{shaft} \quad (۲-۲)$$

$$P_r = P_{loss-rot} \quad (۳-۲)$$

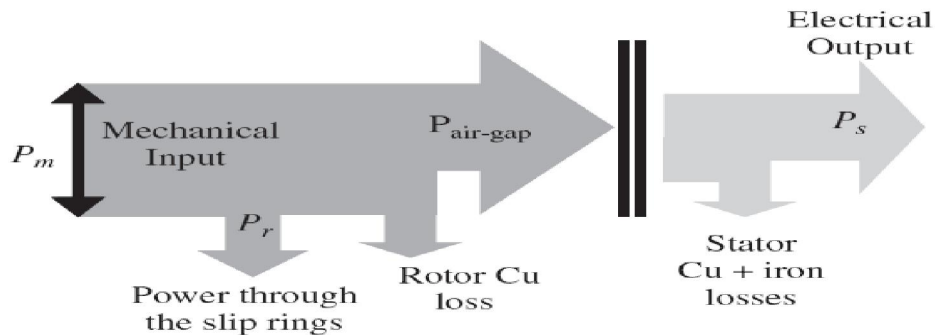
$$P_{r-cu} = 3R_r I_r^2 \quad (۴-۲)$$

$$P_{air-gap} = P_m - P_r - P_{r-cu} \quad (۵-۲)$$

$$P_{s-cu} = 3R_s I_s^2 \quad (۶-۲)$$

$$P_s = P_{elec} = P_{air-gap} - P_{s-cu} \quad (۷-۲)$$

در روابط فوق P_{shaft} , P_{in} , P_m توان مکانیکی وارد شده به ماشین، P_r توان تلفاتی بادخوری روتور، P_{R-cu} توان تلفاتی سیم‌پیچ روتور، $P_{air-gap}$ توان فاصله هوایی، P_{s-cu} توان تلفاتی سیم‌پیچ استاتور و P_{elec} , P_s توان الکتریکی خروجی ژنراتور می‌باشند.



شکل (۲-۱۰) رابطه توان ماشین آسنکرون (القایی) [۱۲]

۲-۱-۵ ژنراتور سنکرون

ژنراتور سنکرون در قیاس با یک ژنراتور آسنکرون با مشخصات مشابه و با اندازه مشابه، بسیار گران‌تر و دارای ساختاری پیچیده‌تر است. کاربرد چنین ژنراتوری، اجازه کار با یک سرعت متغیر را به توربین‌های بادی می‌دهد. این نوع ژنراتورها یا از نوع رتور سیم‌پیچی شده‌اند ($^{\wedge}$ WRS G) یا از نوع رتور مغناطیسی دائم ($^{\wedge}$ PMSG). ژنراتورهای از نوع مغناطیس دائم ($^{\wedge}$ PMSG) نیازی به تحریک ندارند [۱۲].

۲-۱-۶ پیش‌بینی پذیری

با توجه به تغییرات باد، قابلیت پیش‌بینی محدودی (ساعتی یا روزانه) برای خروجی نیروگاه‌های بادی وجود دارد. مانند دیگر منابع انرژی، تولید باد نیز باید از قابلیت برنامه‌ریزی برخوردار باشد اما

[^] Winding Rotor Synchronous Generator

[^] Permanent Magnet Synchronous Generator

طبیعت باد این پدیده را ذاتاً متغیر می‌کند. گرچه از روش‌هایی برای پیش‌بینی تولید توان این نیروگاه‌ها استفاده می‌شود، اما در کل قابلیت پیش‌بینی پذیری این نیروگاه‌ها پایین است.

۲-۱-۷ برق بادی در مقیاس‌های کوچک

تجهیزات تولید برق بادی در مقیاس کوچک (۱۰۰ کیلووات یا کمتر) معمولاً برای تغذیه منازل، زمین‌های کشاورزی یا مراکز تجاری کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در برخی از مکان‌های دورافتاده که مجبور به استفاده از ژنراتورهای دیزلی هستند، مالکان محل ترجیح می‌دهند که از توربین‌های بادی استفاده کنند تا از ضرورت سوزاندن سوخت‌ها جلوگیری شود. در برخی موارد نیز برای کاهش هزینه‌های خرید برق یا برای استفاده انرژی پاک از توربین‌های بادی استفاده می‌شود. برای تغذیه منازل دورافتاده از توربین‌های بادی با اتصال به باتری استفاده می‌شود. در ایالات متحده استفاده از توربین‌های بادی متصل به شبکه در رنج‌های ۱ تا ۱۰ کیلووات برای تغذیه منازل به طور فزاینده‌ای در حال گسترش است. توربین‌های متصل به شبکه در هنگام کار نیاز به استفاده از برق شبکه را از بین می‌برند. در سیستم‌های جدا از شبکه یا باید از انرژی الکتریکی به صورت دوره‌ای استفاده کرد و یا از باتری برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده کرد. در مناطق شهری که امکان استفاده از باد در مقیاس‌های زیاد وجود ندارد نیز ممکن است از انرژی بادی در کاربردهای خاصی مانند پارامترها یا درگاه‌های بی‌سیم اینترنت با استفاده از یک باتری یا یک باتری خورشیدی استفاده شود تا ضرورت اتصال به شبکه از بین برود [۱۳ و ۱۵].

۲-۱-۸ آثار زیست‌محیطی

همان طور که قبلاً اشاره شد، استفاده از انرژی بادی به منظور تولید انرژی الکتریکی آثار بسیار مفیدی در زمینه مسائل زیست‌محیطی دارد. در ادامه مهم‌ترین این آثار مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۴].

۲-۱-۸-۱ انتشار CO₂ و آلودگی:

توربین‌ها بادی برای راه‌اندازی و بهره‌برداری نیاز به هیچ‌گونه سوختی ندارند و بنابراین در قبال انرژی الکتریکی تولید آلودگی مستقیمی ایجاد نمی‌کنند. بهره‌برداری از این توربین‌ها دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسید گوگرد، جیوه، ذرات معلق یا هیچ‌گونه عامل آلوده‌کننده هوا تولید نمی‌کند. اما توربین‌ها بادی در مراحل ساخت از منابع مختلفی استفاده می‌کنند. در طول ساخت نیروگاه‌های بادی باید از موادی مانند فولاد، بتن، آلومینیوم و... استفاده کرد که تولید و انتقال آنها نیازمند مصرف انواع سوخت‌هاست. دی‌اکسید کربن تولیدشده در این مراحل پس از حدود ۹ ماه کار کردن نیروگاه جبران خواهد شد.

نیروگاه‌های سوخت فسیلی که برای تنظیم برق تولیدی در نیروگاه‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند موجب ایجاد آلودگی خواهند شد. بعضی از اوقات به این نکته اشاره می‌شود که نیروگاه‌های بادی نمی‌توانند میزان دی‌اکسید کربن تولیدی را کاهش دهند چراکه برق تولیدی از طریق نیروگاه بادی به دلیل نامنظم بودن همیشه باید به وسیله یک نیروگاه سوخت فسیلی پشتیبانی شود. نیروگاه‌های بادی نمی‌توانند به طور کامل جایگزین نیروگاه‌های سوخت فسیلی شوند اما با تولید انرژی الکتریکی مبنای تولیدی نیروگاه‌های حرارتی را کاهش داده و از تولید آنها می‌کاهند که به این ترتیب میزان انتشار دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد.

۲-۱-۸-۲ تأثیرات بوم‌شناختی:

برخلاف نیروگاه‌های هسته‌ای و نیروگاه‌های سوخت فسیلی که مقدار زیادی آب را برای خنک کردن منتشر می‌کنند، نیروگاه‌های بادی نیازی به آب برای تولید انرژی الکتریکی ندارند.

درباره نشت روغن یا آب سیالی که در نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد حوادث متعددی گزارش شده است. در برخی موارد سیال وارد آب شرب مناطق اطراف نیز می‌شود که خسارت‌هایی را بر

جای خواهد گذاشت. این سیال‌های معمولاً در اثر حرکت در پره توربین موادی را در خود حل کرده و سپس در محیط پراکنده می‌کنند.

۲-۱-۸-۳ استفاده از زمین:

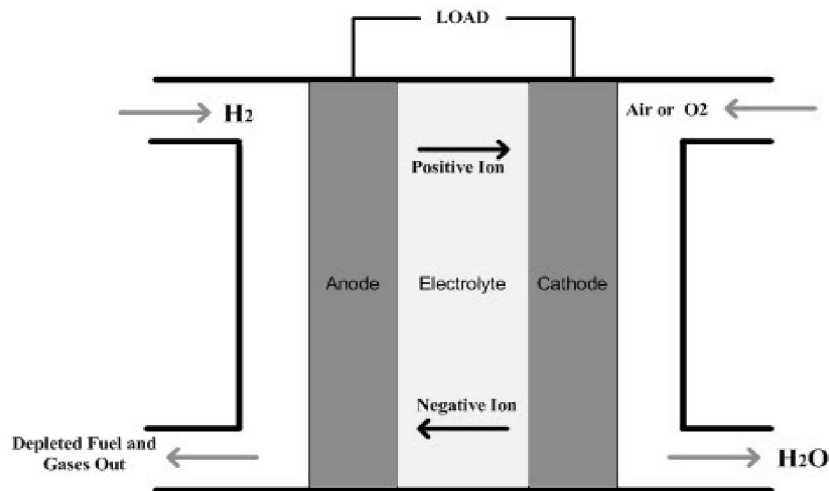
توربین‌های بادی باید ده برابر قطرشان در راستای باد غالب و پنج برابر قطرشان در راستای عمودی از هم فاصله داشته باشند تا کمترین تلفات حاصل شود. در نتیجه توربین‌های بادی تقریباً به ۰.۱ کیلومترمربع مکان خالی به ازای هر مگاوات توان نامی تولیدی نیازمند هستند. معمولاً برای نصب این توربین‌ها نیازی به پاکسازی درختان منطقه نیست. کشاورزان می‌توانند برای ساخت این توربین‌ها زمین‌های خود را به شرکت‌های سازنده اجاره دهند. در ایالات متحده کشاورزان حدود ۲ تا ۵ هزار دلار به ازای هر توربین در هر سال دریافت می‌کنند. زمین‌های مورد استفاده قرار گرفته برای توربین‌های بادی همچنان می‌توانند برای کشاورزی و چرای دام مورد استفاده قرار بگیرند چراکه تنها ۰.۱٪ از زمین برای ساخت پی توربین و راه دسترسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به عبارت دیگر ۹۹٪ زمین هنوز قابل استفاده است. توربین‌های بادی عموماً در مناطق شهری نصب نمی‌شوند چراکه ساختمان‌ها جلوی وزش باد را سد می‌کنند و قیمت زمین نیز عموماً زیاد است.

۲-۲ پیل سوختی چیست؟

پیل سوختی یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت - عموماً هیدروژن (و یا متانول) و هوا- را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. این مولد انرژی دارای بازده بالایی است. در پیل‌های سوختی، هیدروژن در قسمت آند اکسید شده و به پروتون و الکترون تقسیم می‌شود. الکترون تولیدی جریان الکتریسیته را موجب می‌گردد. پروتون با عبور از غشاء تبادل یون به سمت کاتد رفته و در حضور کاتالیزور با اکسیژن هوا و الکترون بازگشتی از پیل به آب تبدیل می‌شود و بدین ترتیب هیچ آلودگی به وجود نمی‌آید. واکنش‌های صورت گرفته در آند، کاتد و ماحصل نهایی به صورت روابط زیر می‌باشند [۲۰-۱۸]:



شکل (۱۱-۲) نشان‌دهنده عملکرد پیل سوختی می‌باشد.



شکل (۱۱-۲) عملکرد پیل سوختی [۱۴]

مزایای پیل‌های سوختی به طور کلی عبارت‌اند از [۲۱]:

- بازده بالا
- سازگاری با محیط‌زیست
- سادگی سیستم از نظر تعمیر و نگهداری
- تنوع در سوخت مصرفی
- عدم آلودگی صوتی به سبب نداشتن قسمت‌های متحرک
- طراحی و ساخت در مقیاس‌های کوچک (میلی وات) و بزرگ (مگاوات)
- قابلیت تولید هم‌زمان حرارت و الکتریسیته (^۱CHP) و استفاده در کاربردهای تولید پراکنده

انرژی

و معایب آن [۲۱]:

- به مواد بیشتر و فرآیندهای سریع‌تری نسبت به دیگر پیل‌ها نیاز دارد.
- ممکن است در مدت طولانی کار و گرما، مشکلاتی چون ناسازگاری عناصر و افت انرژی را موجب شود.
- در صورت استفاده از سوخت ناخالص، کار و گرمای بیش از حد، موجب رسوب کربن و در نهایت مسمومیت پیل می‌گردد.

۲-۲-۱ تاریخچه پیل‌های سوختی

تاریخچه این پیل‌ها به دو دوره متمایز تقسیم می‌شود: دوره اول که حدود صد سال طول کشید، از سال ۱۸۳۹ با ساخت اولین پیل سوختی با الکترولیت اسید سولفوریک توسط آقای گرو آغاز گردید. با

^۱ Combine Heat and Power

تلاش دانشمندان بزرگی مانند جکس، هابر، مون و همکاران و شاگردان آنها منجر به درک علمی از پیل سوختی و شناخت تنگناهای این فن‌آوری تا سال ۱۹۴۰ گردید [۱۷].

دوره دوم از سال ۱۹۴۰ آغاز می‌شود که بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ نمونه‌های تحقیقاتی متعددی از پیل‌های سوختی توسط شرکت‌های بزرگی مانند جنرال الکتریک با ظرفیت ۰/۰۲ وات الی ۱۵ وات ساخته شد. اما هنوز این ظرفیت برای کاربردهای فنی و صنعتی مورد نظر، کافی و قابل قبول نبود. تا اینکه در سال ۱۹۶۵ یک واحد پیل سوختی با ظرفیت یک کیلووات توسط شرکت جنرال الکتریک به منظور استفاده در ماهواره گمینی ۵ ساخته شد و توجه دانشمندان را به خود جلب نمود. این پیل سوختی با ولتاژ ۲۵ ولت و شدت جریان خروجی ۴۰ آمپر توانست در طول ۷ پرتاب ماهواره گمینی ۵، انرژی برابر با ۵۱۹ کیلووات ساعت طی بیش از ۸۴۰ ساعت پرواز را تأمین کند. بدین ترتیب معلوم گردید که پیل‌های سوختی می‌توانند برای بسیاری از مقاصد هوا - فضا مناسب بوده و انرژی مورد نیاز آنها را به صورت پیوسته و پایدار تأمین کنند. این امر موجب گردید تا در سراسر جهان روی توسعه دانش فنی و فناوری ساخت پیل‌های سوختی سرمایه‌گذاری‌های بزرگی صورت گیرد.

امروزه نیز تحقیقات وسیعی در جهت ارتقاء ظرفیت، کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری و توسعه ویژگی‌های کاربردی پیل‌های سوختی در جریان می‌باشد. برق خروجی از پیل‌های سوختی جریان مستقیم (DC) است. بنابراین برای مصرف‌کننده‌های جریان متناوب از مبدل‌های DC به AC استفاده می‌کنند.

از پیل‌های سوختی می‌توان برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز در مناطقی که دور از شبکه‌های سراسری انتقال و توزیع برق هستند و نیز در ایستگاه‌های ماهواره‌ای و مخابراتی و غیره به طور رضایت‌بخشی استفاده نمود [۱۷].

۲-۲-۲ انواع پیل سوختی

پیل‌های سوختی در انواع زیر موجود می‌باشند: پیل‌های سوختی بر اساس نوع الکترولیت استفاده شده در آن‌ها به پنج نوع اصلی طبقه‌بندی می‌شوند [۲۱ و ۲۲]:

- پیل سوختی الکترولیت پلیمر با غشاء مبادله کننده پروتون (PEMFC)
- پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)
- پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)
- پیل سوختی قلبیایی (AFC)
- پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)

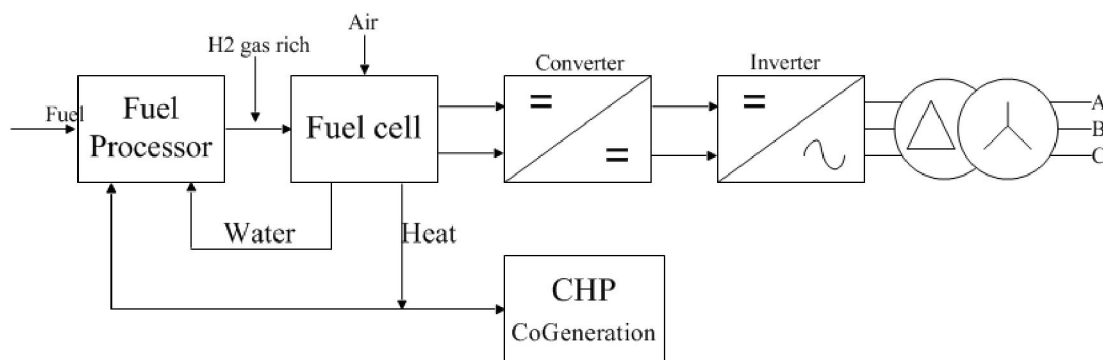
۲-۲-۲-۱ پیل سوختی الکترولیت پلیمر یا غشاء مبادله کننده پروتون

(PEMFC)

در این نوع از پیل‌های سوختی نیاز به هیدروژن خالص جهت عملکرد صحیح می‌باشد. بازده الکتریکی آنها بین ۴۰٪ تا ۶۰٪، زمان راه‌اندازی آنها حدود ۱ دقیقه و دمای عملکرد آنها حدود ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این پیل‌ها چگالی انرژی بالایی دارند و در مقایسه با سایر پیل‌ها، کوچک‌تر و سبک‌ترند [۲۲] و [۲۳].

۲-۲-۲-۲ پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)

این پیل‌ها در دمای حدود ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد عمل کرده و دارای بازدهی حدود ۵۰٪ تا ۶۰٪ می‌باشند. در صورت بهره‌گرفتن از دمای این پیل‌ها می‌توان به بازدهی حدود ۸۵٪ رسید. شکل (۲-۱۲) نمونه‌ای از این حالت می‌باشد [۲۰]-[۲۱].



شکل (۱۲-۲) بهره‌گیری از انرژی الکتریکی و گرمای تولیدی پیل سوختی [۲۲]

محاسبه بازده در حالت استفاده از گرمای پیل‌های سوختی به صورت (۱۱-۲) می‌باشد [۱۷]:

$$\eta_{global} = \frac{Q + E}{Q_0} \quad (11-2)$$

که Q انرژی گرمایی مورد استفاده، E انرژی الکتریکی مورد استفاده، Q_0 انرژی موجود در

سوخت و η_{global} بازده کل سیستم می‌باشد.

۲-۲-۲-۳ پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)

دمای عملکرد این پیل‌ها بین ۷۵۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بازده الکتریکی این پیل-

ها حدود ۵۰٪ تا ۶۰٪ می‌باشد و در صورت بهره‌گیری از گرمای حاصل از آنها، می‌توان تا بازده ۸۵٪

بهره‌برداری نمود. از این نوع پیل‌های سوختی معمولاً در کنار میکرو توربین‌ها استفاده می‌شود [۲۵].

پیل‌های سوختی دمای پایین (PEMFC، PAFC، AFC) دارای حامل‌های یونی H^+ و یا OH^-

هستند که انتقال یون از میان الکترولیت و انتقال الکترون‌ها از طریق مدار خارجی را به عهده دارند، و

در پیل‌های سوختی دمای بالا مانند الکترولیت کربنات مذاب (MCFC) و الکترولیت اکسید جامد

(SOFC)، جریان الکتریکی به ترتیب از طریق یون‌های CO_3^{2-} و O_2^- انتقال می‌یابد [۲۵].

در جدول (۱-۲) مشخصات عملکردی و کاربرد انواع پیل‌های سوختی را مشاهده می‌نماییم [۲۲].

جدول (۱-۲) مشخصات عملکردی انواع پیل‌های سوختی [۲۴]

انواع پیل سوختی	یون متحرک	دمای عملکرد	کاربرد و محدوده توان
پیل سوختی با غشاء تبادل یونی	H ⁺	30-100 °C	خودروها و کاربرد در سیستم‌های توان پایین CHP و منابع تولید پراکنده محدوده توان: 1W-100KW
پیل سوختی کربنات مذاب	CO ₃ ²⁻	~650 °C	کاربرد در سیستم‌های CHP با توان بالا با ظرفیت بالاتر از 1MW
پیل سوختی اکسید جامد	O ²⁻	50-1000 °C	کاربرد در سیستم‌های CHP و منابع تولید پراکنده در محدوده توانی 2KW تا چند 10KW
پیل سوختی قلیایی	OH ⁻	50-200 °C	استفاده در فضاپیماها محدوده توان: 1W-10KW
پیل سوختی اسید فسفریک	H ⁺	~220 °C	سیستم‌های CHP با توان 200KW به بالا محدوده توان: 10KW-1MW

در اینجا به بررسی سوخت‌های اولیه می‌پردازیم که می‌توانند به عنوان منبع تهیه هیدروژن مورد استفاده قرار گیرند.

۲-۲-۳ انواع سوخت مورد استفاده در پیل سوختی

هیدروژن به صورت طبیعی و خالص در طبیعت وجود ندارد به ناچار مجبور به استفاده از سوخت‌هایی هستیم که در دسترس و ارزان هستند. در اینجا به بررسی سوخت‌های اولیه می‌پردازیم که می‌توانند به عنوان منبع تهیه هیدروژن مورد استفاده قرار گیرند [۱۷].

۲-۲-۳-۱ نفت خام

نفت خام مخلوطی از گازها و مایعات و جامدات بر پایه هیدروکربن‌ها است که به صورت خام در اکثر نقاط کره زمین قابل دسترسی است.

نفت خام به تنهایی دارای ارزش نسبتاً کمی است ولی با تبدیل آن به محصولات نظیر مایعات و محصولات پتروشیمی و سوخت‌های دیگر، محصولات باارزشی تولید خواهد شد. هر برش از نفت خام محتوی اجزای مختلف شیمیایی است که پارافین‌ها یا آلکن‌ها، مونوسیکلیک‌ها و پلی‌سیکلیک‌های پارافینی (نفت) و هیدروکربن‌های آروماتیک تک هسته‌ای و چند هسته‌ای را می‌توانیم نام ببریم.

۲-۲-۳-۲ زغال سنگ و گاز زغال سنگ

زغال سنگ فراوان‌ترین سوخت فسیلی است ولی از نظر ساختار شیمیایی بسیار پیچیده است. این سوخت نیز از فشرده شدن باقیمانده گیاهان و گذشت زمان به وجود آمده است. از سوزاندن زغال سنگ مایع و گاز کک حاصل می‌شود که این مواد بستگی زیادی به ماده اولیه زغال سنگ، دما و فشار واکنش و مقادیر نسبی از بخار و اکسیژن تزریق شده به داخل رآکتور دارند.

در کارخانجات بزرگ، زغال سنگ به همراه بخار و اکسیژن (یا هوا) در دمای بالاتر قرار گرفته و محصول در این حالت گاز خواهد بود که به همراه گاز، مقادیری از محصول مایع و جامد حاصل از واکنش نیز تولید خواهد شد.

۲-۲-۳-۳ گاز طبیعی

گاز طبیعی اغلب در نزدیکی مخازن زیرزمینی نفت خام قرار گرفته ولی به تنهایی نیز در نقاط مختلف زمین یافت می‌شود. اتان و پروتان با ترکیب درصد بسیار کم تر در گاز طبیعی وجود دارند. گاز طبیعی بر اساس میزان H_2S موجود در گاز به دو نوع گاز ترش (در صد قابل توجه H_2S) و گاز شیرین (درصد کم از H_2S) طبقه‌بندی می‌شود.

۲-۲-۳-۴ سوخت‌های منشاء زیستی (Biofuel)

بایومس و بایومتر مفهوم عام مواد آلی هستند که از ارگانسیم‌های زنده گرفته شده که شامل گیاهان دریایی و زمینی و همچنین حیوانات و باقیمانده موجودات زنده می‌باشند. تخمین زده می‌شود که حدود ۱۵۰ گیگاتن از سبزیجات و گیاهان بایو در هر سال تولید می‌شود.

با توجه به محتوی انرژی بالای مواد بایومس، این مواد را می‌توان جزو منابع مهم انرژی‌های تجدیدپذیر دانست. انرژی این مواد از چند روش قابل استحصال است.

- سوختن مستقیم
- تبدیل به بایو گاز توسط پیرولیز
- تبدیل به اتانول توسط تبخیر
- تبدیل شدن به متانول یا آمونیاک
- تبدیل شدن به هیدروکربن‌های مایع

منبع دیگر سوخت‌های بایو (Bio-Fuel) زباله‌های شهری است.

۲-۲-۳-۵ تولید هیدروژن از انرژی خورشیدی، آب و باد

از آنجائیکه هیدروژن برای حمل‌ونقل و انبار سازی درازمدت با چگالی‌ای بیش از چگالی گاز در حالت مایع قابل استفاده است، می‌تواند اتکای بشر به سوخت‌های فسیلی را جایگزین نماید. هیدروژن را می‌توان از سیستم‌های فوتوالکتروشیمیایی که هیدروژن و اکسیژن را مستقیماً از آب تولید می‌کنند، به دست آورد.

بهر حال، در این مورد و سایر تحقیقات فوتوالکتروشیمیائی جاری هنوز نیاز به پیشرفت بسیار زیادی احساس می‌شود؛ تا کارایی مکانیزم‌ها افزایش پیدا کند و مسئله خرابی و تجزیه را که هنوز در فصل مشترک جامد و مایع مزاحمت ایجاد می‌کند، حل کند. الکترولیز آب با کمک انرژی برق به طور کامل آزمایش شده است و ساده‌ترین روش برای به دست آوردن هیدروژن است.

دو مشکل اصلی که بر سر راه استفاده از انرژی باد موجود است عبارت‌اند از:

- به علت نامنظم و غیردائمی بودن وزش باد باید انرژی به دست آمده را به طریقی ذخیره نمود.
- انرژی موجود باد بسیار پراکنده است؛ به طوری که وسعت زمین لازم برابر به دست آوردن انرژی از باد پنج برابر وسعت زمین لازم برای به دست آوردن همان مقدار انرژی از خورشید به وسیله سلول‌های خورشیدی می‌باشد. یعنی مواقعی که باد نمی‌وزد و یا سرعت آن کم است نباید در تولید جریان برق و ولتاژ آن اختلالی پیش بیاید و لذا بدین منظور باید یک منبع ذخیره برق به صورت باتری‌های متعدد موجود باشد. ابتدا جریان برق تولیدشده توسط ژنراتور بادی آن را شارژ نموده و سپس این منبع جریان مستقیم به وسیله دستگاهی به جریان متناوب با ولتاژ جریان و فرکانس منظم تبدیل شود و مورد استفاده قرار بگیرد.

برخی از ویژگی‌های انرژی‌های تجدید پذیر (نوین):

- این انرژی‌ها به طور وسیع توزیع شده و نسبتاً پراکنده هستند.
- از نظر تجاری هنوز به طور جزئی توسعه یافته‌اند. مصرف‌کنندگان چنین انرژی‌هایی با شرایط متفاوتی روبرو هستند.
- این منابع اساساً نامحدود هستند لکن با درک موجود، گران و غیرقابل اعتماد تلقی می‌شوند.
- اغلب آنها از نظر زیست‌محیطی بی‌خطر بوده یا می‌توانند بی‌خطر باشند.

فصل سوم

تعیین اندازه بهینه‌ی منابع تولید توان ترکیبی

بادی اپیل سوختی و ذخیره ساز انرژی

۳-۱ مقدمه:

برای پیاده‌سازی و تحقیق بر روی یک سیستم تولید توان و به ویژه سیستم‌های تولید توان ترکیبی و پراکنده، پس از مشخص نمودن سیستم مورد نظر، قبل از هر چیز نیاز به تعیین اندازه مناسب هر یک از منابع و اجزای آن سیستم می‌باشد. این امر باعث افزایش بهره‌وری سیستم مورد نظر و جلوگیری از استفاده نامناسب از اجزاء بکار رفته می‌شود.

برای مثال اگر در یک سیستم تولید توان بادی/ذخیره ساز، انتخاب اجزا بیش از تعداد مورد نیاز باشد، در این صورت عملاً از تعدادی از آن اجزا استفاده نخواهد شد و این کار باعث یک سرمایه‌گذاری بیهوده و غیراقتصادی شده و هیچ توجیه مناسب اقتصادی نخواهد داشت. از طرف دیگر، اگر انتخاب اجزا، برای مثال توربین بادی، کمتر از تعداد مورد نیاز برای تأمین یک بار خاص باشد، در آن صورت در صورت بهره‌برداری از سیستم، همواره بخشی از بار را از دست خواهیم داد. در این صورت قابلیت اطمینان سیستم بسیار پایین و نامناسب خواهد بود.

از طرفی تعیین اندازه‌ی مناسب در سیستم‌های تولید توان پراکنده باعث بهره‌برداری از سیستم در شرایط کاری با بازده مناسب بوده و در این صورت با کمبود یا مازاد توان تولیدی مواجه نخواهیم بود. لذا مطالعه بر روی تعیین اندازه سیستم تولید توان و تک‌تک اجزای بکار رفته در آن امری ضروری می‌باشد.

۳-۲ معرفی نرم‌افزار HOMER

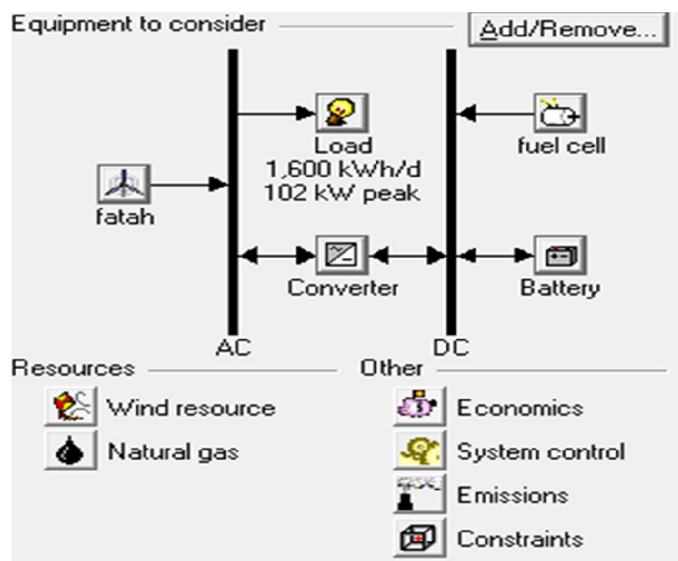
در اینجا به بررسی تعیین اندازه سیستم تولید توان ترکیبی بادی/پیل سوختی/ذخیره ساز انرژی با استفاده از نرم‌افزار HOMER می‌پردازیم. نرم‌افزار HOMER یک نرم‌افزار مناسب برای مدل کردن

منابع تجدیدپذیر انرژی و سوخت، برای انتخاب بهترین حالت اقتصادی از پیکربندی سیستم مورد نظر می‌باشد. این نرم‌افزار ابتدا سیستم مورد نظر را انتخاب کرده و سپس به مشخص نمودن پارامترهای هر یک از اجزاء، شامل هزینه سرمایه‌گذاری، تعداد هر یک از اجزاء، هزینه‌ی جایگزینی، هزینه تعمیر و نگهداری آن، سوخت مورد استفاده در منابع و ... می‌پردازد. در مرحله بعد، اتصالات مناسب اجزاء برای اجرای برنامه صورت می‌گیرد و سپس با اجرای برنامه، حالت‌های مناسب در خروجی ظاهر می‌شود. با بررسی نتایج به دست آمده که به ترتیب بر اساس مسائل اقتصادی که متأثر از سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از سیستم می‌باشد، سیستم مناسب را انتخاب می‌نماییم.

۳-۳ تعیین اندازه مناسب اجزای سیستم تولید توان

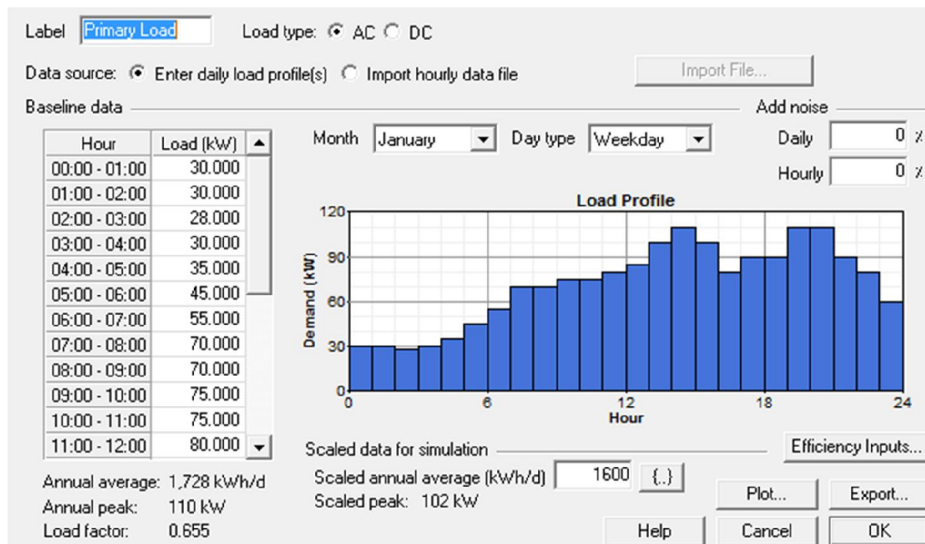
ترکیبی بادی / پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی

ابتدا در محیط HOMER از قسمت add/remove اجزای مورد نیاز شامل توربین بادی، پیل سوختی، باتری، مبدل و بار را انتخاب می‌کنیم. سپس مشخصات ذکر شده در قسمت قبل را برای هر یک از اجزاء وارد می‌کنیم. در شکل (۱-۳) اجزای سیستم در محیط نرم‌افزار مشاهده می‌شوند.

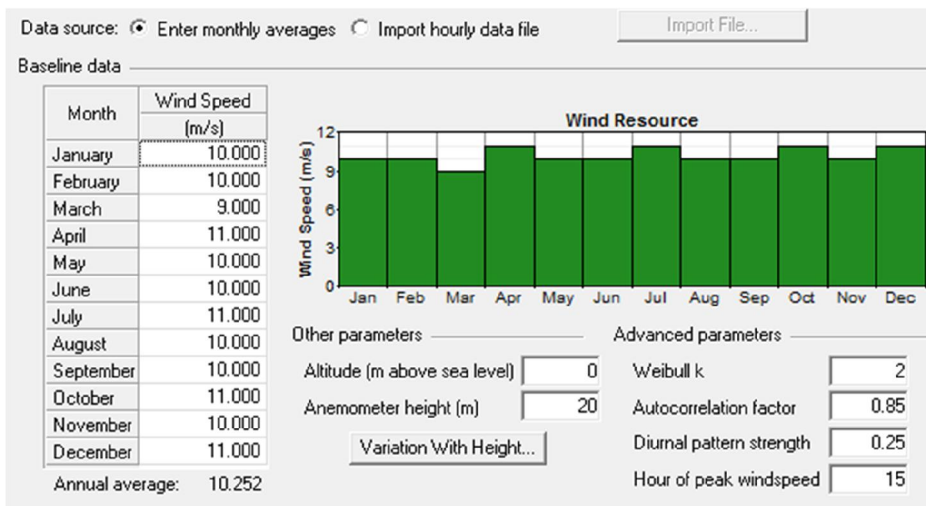


شکل (۱-۳) مدل سیستم مورد نظر

شکل (۳-۳) پروفایل بار مورد نظر را نمایش می‌دهد. این پروفایل برگرفته از پروفایل واقعی بار می‌باشد. اساس تعیین اندازه‌ی اجزاء سیستم، بار سیستم می‌باشد. یعنی با توجه به میزان بار سیستم، اندازه هر یک از منابع بکار رفته تعیین می‌شود. شکل (۳-۳) نیز متوسط سرعت باد می‌باشد.



شکل (۳-۳) پروفایل بار



شکل (۳-۳) متوسط سرعت باد در ماه‌های سال

در مورد پیل سوختی لازم به ذکر است که سوخت این پیل گاز طبیعی در نظر گرفته شده و بنابراین در این سیستم از الکترولایزر و تانک ذخیره هیدروژن استفاده نشده است.

جدول (۱-۳) مشخصات تمام اجزای بکار رفته در سیستم فوق را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۳) مشخصات اجزاء مورد استفاده در سیستم تولید توان ترکیبی بادی/ پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی

توربین بادی	
۲۰۰۰۰۰ \$	هزینه سرمایه‌گذاری
۵۰۰ \$/yr	هزینه تعمیر و نگهداری
۲۵	طول عمر (سال)
پیل سوختی	
۱۵۰۰۰۰ \$	هزینه سرمایه‌گذاری برای ۵۰kw
۱۵۰۰۰۰ \$	هزینه جایگزینی
۴۰۰۰۰	طول عمر (ساعت)
باتری	
Surrette 4Ks25P	مدل بکار رفته
۷.۶ kWh	ظرفیت
۱۹۰۰ Ah	ظرفیت نامی
۴۷	ولتاژ
۱۵۰۰ \$	هزینه سرمایه‌گذاری
۱۵۰۰ \$	هزینه جایگزینی
مبدل الکترونیک قدرت DC/AC	
۵۰ kW	ظرفیت
۲۵۰۰۰ \$	هزینه سرمایه‌گذاری
۲۵۰۰۰ \$	هزینه جایگزینی
۹۴٪	بازده
۲۵	طول عمر (سال)
اطلاعات سیستم	
۲۵	طول عمر پروژه (سال)
Load following & Cycle charging	استراتژی عملکرد
۶	نرخ بهره تورم زدایی شده

۳-۴ تحلیل نتایج

برخی از نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم نشان داده شده در شکل (۳-۱)، به صورت شکل (۳-۳) می‌باشد. همان طور که در شکل (۳-۴) مشاهده می‌شود، بهترین پیکربندی از نظر اقتصادی برای این سیستم استفاده از یک عدد توربین بادی ۱۲۰ کیلووات (مطابق توربین بادی نشان داده شده در شکل (۵-۱) در فصل پنجم)، یک پیل ۷۰ کیلووات، ۸۰ باتری و یک مبدل ۱۱۰ کیلووات می‌باشد. اما از آنجا که در این پروژه به دنبال مدیریت توان می‌باشیم و نه شبیه‌سازی الکتریکی سیستم مورد نظر، از مدل‌سازی مبدل‌های الکترونیک قدرت صرف نظر می‌کنیم.

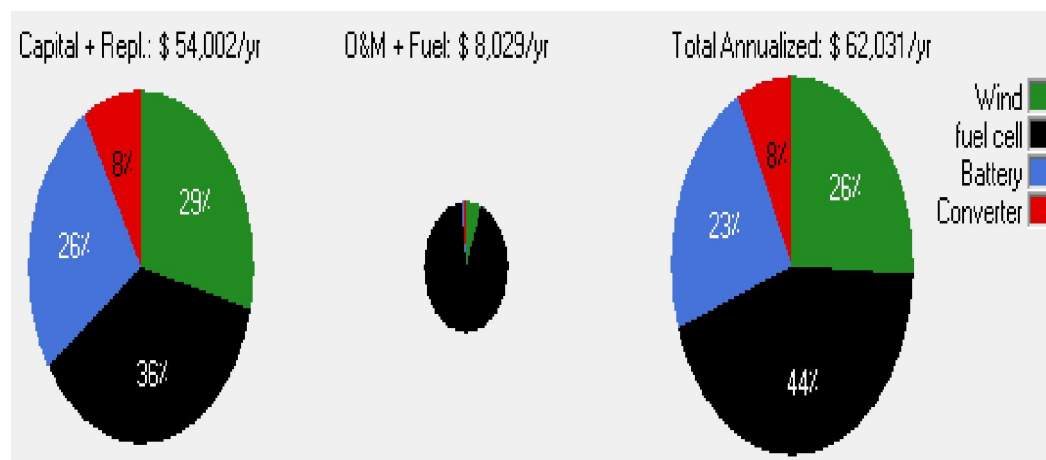
آنالیز اقتصادی این سیستم در شکل (۳-۵) نشان داده شده است. در این شکل $capital+repl$ هزینه سرمایه‌گذاری و جایگزینی اجزاء سیستم، $O\&M+Fuel$ هزینه تعمیر و نگهداری و سوخت مورد استفاده در طول بهره‌برداری از سیستم و $total\ annualized$ هزینه نهایی سیستم در مدت طول عمر سیستم می‌باشند. مشاهده می‌شود که با وجود استفاده از پیل سوختی به عنوان منبع پشتیبان، حدود ۴۴٪ هزینه‌های نهایی سیستم شامل سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از پیل سوختی می‌باشد. این مورد نشان‌دهنده بالا بودن هزینه استفاده از پیل سوختی در مقایسه با توربین بادی می‌باشد.

اما برای انتخاب سیستم مورد نظر علاوه بر مسائل اقتصادی باید مسائل فنی نیز مورد توجه قرار گیرد. جدول (۳-۲) نشان می‌دهد که در این پیکربندی از سیستم ۸۵٪ توان مورد نیاز بار توسط توربین بادی و ۱۵٪ آن توسط پیل سوختی تأمین می‌شود. همچنین میزان توان مازاد تولیدی حدود ۱۳٪ کل توان تولیدی سیستم می‌باشد که مقدار مناسبی می‌باشد. بنابراین سیستم فوق هم از نظر الکتریکی و هم از نظر اقتصادی مناسب می‌باشد.

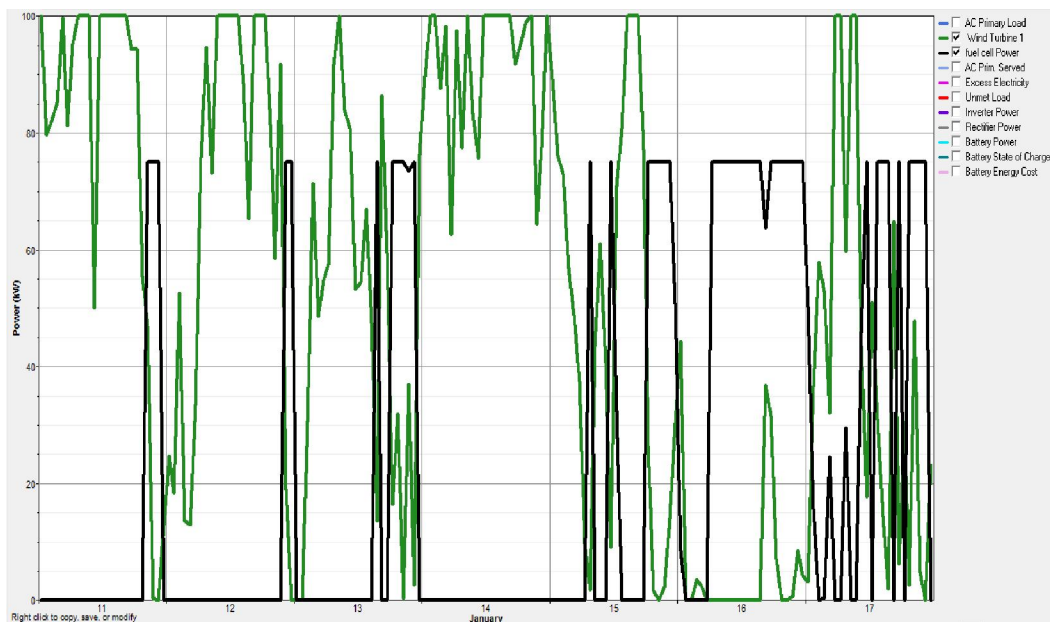
شکل (۳-۶) نیز نشان‌دهنده میزان توان تولیدی توربین بادی و پیل سوختی در یک بازه ۷ روزه می‌باشد که نشان می‌دهد زمانی که توان تولیدی توربین پاسخگوی بار نمی‌باشد، پیل سوختی شروع به تولید توان و تغذیه بار می‌کند.

Icons	WES5	FC (kW)	Batt.	Conv. (kW)	Disp. Strgy	Initial Capital	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Natural gas (m3)	FC (hrs)
☀️🌬️🔋🔌	1	75	80	110	CC	\$ 600,000	\$ 792,969	0.106	0.85	24,271	1,944
☀️🌬️🔋🔌	1	75	80	120	CC	\$ 605,000	\$ 797,994	0.107	0.85	24,271	1,944
☀️🌬️🔋🔌	1	80	80	110	CC	\$ 615,000	\$ 802,862	0.108	0.85	24,440	1,850
☀️🌬️🔋🔌	1	80	80	120	CC	\$ 620,000	\$ 807,887	0.108	0.85	24,440	1,850
☀️🌬️🔋🔌	1	75	80	150	CC	\$ 620,000	\$ 813,071	0.109	0.85	24,271	1,944
☀️🌬️🔋🔌	1	80	80	150	CC	\$ 635,000	\$ 822,964	0.110	0.85	24,440	1,850
☀️🌬️🔋🔌	1	90	80	110	CC	\$ 645,000	\$ 823,318	0.110	0.85	24,793	1,704
☀️🌬️🔋🔌	1	90	80	120	CC	\$ 650,000	\$ 828,344	0.111	0.85	24,793	1,704
☀️🌬️🔋🔌	1	90	80	150	CC	\$ 665,000	\$ 843,420	0.113	0.85	24,793	1,704
☀️🌬️🔋🔌	1	100	80	110	CC	\$ 675,000	\$ 856,283	0.115	0.85	25,965	1,668
☀️🌬️🔋🔌	1	100	80	120	CC	\$ 680,000	\$ 861,308	0.115	0.85	25,965	1,668
☀️🌬️🔋🔌	1	100	80	150	CC	\$ 695,000	\$ 876,385	0.117	0.85	25,965	1,668
☀️🌬️🔋🔌	1	100	80	110	LF	\$ 675,000	\$ 878,071	0.118	0.87	25,691	1,896

شکل (۳-۴) نتایج شبیه‌سازی برای حالت اول



شکل (۳-۵) آنالیز اقتصادی سیستم حالت اول



شکل (۳-۶) توان تولیدی توربین بادی و پیل سوختی در یک بازه ۷ روزه

بنابراین برای تأمین بار فوق به یک توربین بادی ۱۲۰ کیلووات و پیل سوختی ۷۵ کیلووات نیاز داریم. البته با توجه به اینکه در این سیستم پیل سوختی به عنوان سیستم پشتیبان می‌باشد و در نتیجه تعداد ساعاتی کمی از کل سال نیاز به استفاده از حداکثر ظرفیت آن می‌باشد، می‌توان با افزایش ظرفیت باتری‌ها، از پیل سوختی با توان نامی کمتری استفاده نمود. این کار باعث کاهش در هزینه‌ها نیز می‌شود. با توجه به مطالعات مشابه صورت گرفته، پیل سوختی ۵۰ کیلووات برای این امر مناسب می‌باشد.

فصل چهارم

استراتژی کنترل مدیریت توان در سیستم تولید

توان ترکیبی بادی اپیل سوختی

و ذخیره ساز انرژی

در این فصل به بررسی و ارائه یک استراتژی کنترلی با هدف مدیریت توان و بهره‌برداری مناسب از سیستم مورد نظر می‌پردازیم. برای این هدف از کنترل‌کننده فازی بر روی سیستم مورد مطالعه استفاده شده است.

طراحی یک استراتژی کنترلی مناسب برای هر سیستمی، مهم‌ترین بخش مطالعات صورت گرفته بر روی آن سیستم می‌باشد. همواره هدف از کنترل هر سیستمی در راستای بهره‌برداری مناسب و اقتصادی از آن می‌باشد. بنابراین در طراحی کنترل‌کننده، بایستی تا حد امکان تمام مواردی که باعث بهبود عملکرد سیستم مورد مطالعه می‌شود را در نظر گرفته و به درستی بر روی سیستم اعمال شود.

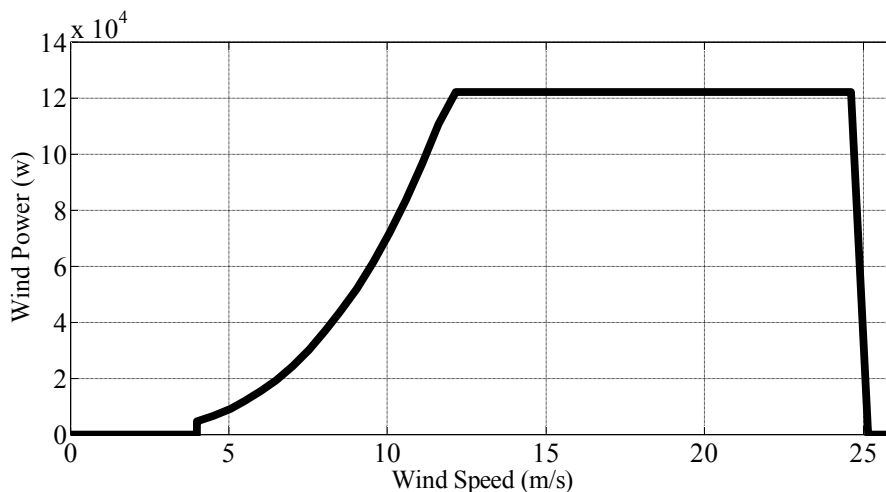
در این پایان‌نامه، هدف طراحی و تعیین قوانین مناسب و کنترل‌کننده مناسب برای مدیریت توان بین منابع تولید توان بکار گرفته‌شده در سیستم ترکیبی مورد مطالعه، با هدف بهره‌برداری مناسب و اقتصادی از آن می‌باشد. برای کنترل سیستم مورد نظر از کنترل‌کننده فازی استفاده شده است. در پیوست ۱ راجع به کنترل فازی توضیحات کاملی ارائه شده است. در ادامه به بررسی استراتژی کنترلی مناسب برای مدیریت توان در سیستم تولید توان ترکیبی بادی، پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی می‌پردازیم.

۴-۱ استراتژی مدیریت توان در سیستم ترکیبی بادی / پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی

همان طور که قبلاً ذکر شد، توان تولیدی توربین بادی به سرعت باد بستگی دارد. با افزایش سرعت باد، توان تولیدی توربین بادی افزایش یافته و با کاهش سرعت باد توان تولیدی توربین کاهش می‌یابد. رابطه (۱-۲) در فصل دوم، نشان‌دهنده رابطه توان تولیدی توربین بادی با سرعت باد می‌باشد.

در فصل سوم مطالعه بر روی تعیین اندازه اجزاء سیستم مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار HOMER صورت گرفت و با استفاده از نتایج حاصل از آن، استفاده از توربین بادی ۱۲۰ کیلووات برای

این سیستم به دست آمد. شکل (۴-۱) نشان‌دهنده مشخصه توربین بادی مورد استفاده در سیستم مورد نظر می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود، در سرعت‌های زیر 4 m/s (به علت عدم توانایی توربین در تولید توان) و بالای 25 m/s (برای حفاظت از توربین و جلوگیری از آسیب‌دیدگی ژنراتور)، توربین متوقف شده و توانی توسط توربین بادی تولید نمی‌شود. همچنین زمانی که سرعت باد بین 12 تا 24 m/s باشد، توربین مقدار توان ثابت و برابر با حداکثر ظرفیت نامی خود تولید می‌کند.



شکل (۴-۱) منحنی مشخصه عملکردی توربین بادی مورد استفاده در این پایان‌نامه

بنابراین توان تولیدی توربین بادی به سرعت باد بستگی داشته و با توجه به تغییرات سرعت باد، توان تولیدی توربین بادی نیز تغییر می‌کند. بنابراین به علت عدم توانایی در کنترل سرعت باد، توان تولیدی توسط توربین بادی غیرقابل کنترل می‌باشد. با توجه به این مورد برای ایجاد تعادل توان بین بار و توان تولیدی منابع انرژی، به کنترل سایر منابع موجود در سیستم فوق می‌پردازیم. استراتژی مدیریت توان در سیستم مورد نظر به شرح زیر می‌باشد.

در این سیستم، عامل اصلی برای کنترل منابع انرژی، توان تولیدی توربین بادی می‌باشد. بدین صورت که زمانی که توان تولیدی توربین بادی بیش از توان مورد نیاز بار باشد، مازاد توان بادی در ذخیره ساز انرژی ذخیره می‌شود و زمانی که توان تولیدی توربین بادی قادر به پوشش کامل بار نباشد، از پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی برای پوشش کمبود توان استفاده می‌کنیم.

در مورد پیل‌های سوختی لازم به ذکر است که راه‌اندازی پی در پی آنها باعث کاهش طول عمرشان می‌شود. همچنین راه‌اندازی پیل سوختی همراه با ثابت زمانی بالایی بوده و دارای دینامیک کندی برای رسیدن به حالت عملکرد پایدار می‌باشد. بنابراین برای جلوگیری از کاهش طول عمر پیل سوختی و رفع اثرات دینامیک کند آن در زمان راه‌اندازی که باعث نارسایی‌هایی در تعادل توان بین تولید و مصرف می‌شود، همواره پیل را در حالت کار نگه می‌داریم. همین امر باعث افزایش قابلیت اطمینان در سیستم ترکیبی فوق در عدم از دست دادن بخشی از بار در زمان نیاز به توان پیل سوختی می‌شود [۲۶].

روش کنترل پیل سوختی برای دستیابی به اهداف فوق بدین صورت است که در زمانی که توان توربین بادی پاسخگوی توان مورد نیاز بار و یا بیش از توان مورد نیاز بار باشد، پیل در حال کار بوده و در این حالت توان تولیدی پیل سوختی در میزان مشخص و پایینی تنظیم می‌شود و از خاموش شدن آن جلوگیری می‌کنیم. حال مازاد توان تولیدی توسط توربین بادی و پیل سوختی در ذخیره ساز انرژی ذخیره می‌شود و در مواقع ضروری از انرژی ذخیره‌شده در باتری‌ها استفاده می‌کنیم.

از آنجا که پیل‌های سوختی در زمان راه‌اندازی و تغییر توان تولیدی خود دارای دینامیک کندی بوده و تغییرات توان تولیدی آنها با چگالی بالایی رخ نمی‌دهد، ذخیره ساز انرژی علاوه بر جذب توان مازاد (حالت شارژ) و انتقال توان ذخیره شده در خود به بار (حالت دشارژ) در مواقع مورد نیاز، به پوشش دینامیک کند پیل سوختی نیز کمک می‌کند.

می‌توان با توجه به توان تولیدی توربین بادی و خروجی کنترل‌کننده که تعیین‌کننده میزان مرجع توان تولیدی پیل سوختی می‌باشد، شارژ و دشارژ شدن باتری‌ها را کنترل نمود.

بدین منظور، توان تولیدی توربین بادی (P_{WT}) و توان تولیدی پیل سوختی (P_{FC}) را با یکدیگر جمع می‌کنیم (P_{gen}) و از مقدار توان مورد نیاز بار (P_{Load}) کم می‌کنیم (ΔP). حاصل این عبارت

نشان‌دهنده نحوه عملکرد باتری‌ها در شارژ و یا دشارژ شدن آنها می‌باشد. در صورتی که ΔP مثبت باشد، نشان‌دهنده این است که این مقدار توان باید توسط ذخیره ساز انرژی جذب شود که به معنای شارژ شدن باتری‌ها می‌باشد؛ و در صورتی که ΔP منفی باشد، این مقدار توان باید توسط ذخیره ساز انرژی برای پوشش توان مورد نیاز بار تأمین شود و به اصطلاح باتری‌ها در حالت دشارژ قرار می‌گیرند.

رابطه‌های (۱-۴) و (۲-۴) نشان‌دهنده این موضوع می‌باشند:

$$P_{gen} = P_{WT} + P_{FC} \quad (1-4)$$

$$\Delta P = P_{gen} - P_{Load} \quad (2-4)$$

در رابطه (۱-۴) و (۲-۴)، P_{WT} نشان‌دهنده توان تولیدی توربین بادی، P_{FC} توان تولیدی پیل سوختی و P_{Load} توان مورد نیاز بار می‌باشند.

در نهایت توان باتری‌ها به همراه توان‌های تولیدی توربین بادی و پیل سوختی باید با توان مورد نیاز بار تطابق داشته و کل بار به طور کامل پوشش داده شود (رابطه (۳-۴)).

$$P_{WT} + P_{FC} + P_{Batt} = P_{Load} \quad (3-4)$$

در رابطه (۳-۴)، P_{Batt} نشان‌دهنده توان جذب‌شده و یا توان ارائه‌شده توسط باتری‌ها می‌باشد.

نکته دیگری که باید در طراحی قوانین کنترلی برای این سیستم در نظر گرفت و از درجه اهمیت بالایی برخوردار است، دقت در عدم تداخل عملکرد ذخیره ساز انرژی و پیل سوختی می‌باشد. منظور این است که قوانین لازم برای نحوه عملکرد پیل سوختی باید به گونه‌ای اتخاذ گردد که پیل سوختی در هر لحظه به اندازه مورد نیاز و در راستای عملکرد بهینه سیستم، توان تولید کند. بدین مفهوم که عملکرد پیل و ذخیره ساز انرژی مکمل یکدیگر باشند. یعنی زمانی که باتری‌ها در سطح مطلوبی از میزان انرژی ذخیره‌شده در خود قرار دارند و بر اثر بیشتر بودن توان تولیدی توربین نسبت به تقاضا در

حال شارژ شدن می‌باشند، در این لحظه با توجه به اینکه تقاضا توسط توان تولیدی توربین بادی پوشش داده می‌شود، توان تولیدی پیل سوختی باید کاهش یابد تا سوخت کمتری مصرف شود. و زمانی که باتری‌ها بر اثر کمبود توان تولیدی توربین نسبت به میزان تقاضا در حال دشارژ شدن می‌باشند، در این لحظه پیل سوختی بایستی تا حد امکان توان تولیدی خود را افزایش دهد تا از تخلیه شدن بیش از حد باتری‌ها جلوگیری شود.

البته در این مورد، بایستی به سطح شارژ باتری‌ها (SOC) نیز توجه شود. موارد ذکر شده مربوط به زمانی است که سطح شارژ باتری‌ها در حد مطلوبی (در حدود بالاتر از ۷۰٪) باشند. در غیر این صورت، زمانی که سطح شارژ باتری‌ها در حد پایینی (در حدود زیر ۴۰٪) باشد، یکی از وظایف پیل سوختی افزایش توان تولیدی خود به منظور شارژ شدن و افزایش سطح شارژ باتری‌ها می‌باشد.

از آنجا که شارژ و دشارژ شدن متوالی و بیش از اندازه باتری‌ها باعث کاهش طول عمر آنها می‌شود [۲۶] و [۲۸]، با اعمال موارد فوق می‌توان به افزایش طول عمر باتری‌ها کمک کرده و همچنین از نظر اقتصادی نیز سیستم در حالت بهینه بهره‌برداری شود. بدین صورت که با عملکرد بهینه پیل سوختی و جلوگیری از تولید بیش از میزان مورد نیاز توان و در نتیجه کاهش میزان سوخت مصرفی پیل سوختی، هزینه‌های ناشی از مصرف سوخت برای تولید توان توسط پیل سوختی کاهش چشمگیری می‌یابد [۳۰] و [۳۱]. با توجه به اینکه در این سیستم، توربین بادی در زمان بهره‌برداری و تولید توان هیچ هزینه‌ای در بر ندارد، میزان مصرف سوخت توسط پیل سوختی تعیین‌کننده غالب هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم می‌باشد و بنابراین با کاهش میزان سوخت مصرفی پیل سوختی، هزینه بهره‌برداری از سیستم نیز کاهش می‌یابد [۳۲].

علاوه بر این مورد، افزایش طول عمر باتری‌ها باعث می‌شود که زمان جایگزینی باتری‌ها در هر دوره طولانی‌تر از حد معمول شده و همین امر باعث کاهش هزینه‌های مربوط به تعمیرات و نگهداری از سیستم فوق می‌شود.

در فصل بعد با بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، این موارد به دقت بررسی می‌شوند.

۴-۲ سیستم فازی و روش فازی اعمال‌شده بر روی سیستم

مورد مطالعه

برای دستیابی به اهداف فوق، نیاز به کنترل‌کننده‌ای می‌باشد که توانایی اعمال موارد ارائه‌شده در قسمت قبل را به سیستم داشته باشد. از طرفی کنترل‌کننده‌های مورد استفاده در موارد مطالعه شده قبلی، که در فصل اول به آنها اشاره نمودیم، با توجه به نتایج به دست آمده در آنها مشاهده می‌شود که هر یک از آنها دارای ایراداتی می‌باشند. کنترل‌کننده‌های قبلی تنها توانایی اعمال قوانین تعیین‌شده برای عملکرد کنترل‌کننده را دارند. در صورتی که سیستم‌های ترکیبی دارای حالت‌های بسیار زیاد و گوناگون عملکردی می‌باشد که نمی‌توان تمام آنها را شناسایی کرده و برای کنترل‌کننده تعریف کرد و تنها می‌توان برخی از آنها را برای کنترل‌کننده مشخص نمود. بنابراین برای کنترل مناسب سیستم باید از کنترل‌کننده‌ای استفاده نمود که توانایی بررسی تمامی حالت‌ها را داشته باشد.

کنترل‌کننده فازی با توجه به قدرت تصمیم‌گیری برای عملکرد سیستم در حالت‌های تعیین‌شده و مهم‌تر از آن برای حالت‌های ما بین حالات در نظر گرفته‌شده برای کنترل‌کننده که در طراحی آن در نظر گرفته نشده‌اند، گزینه مناسبی برای کنترل سیستم فوق و سیستم‌های مشابه می‌باشد

به طور کلی ویژگی‌های کنترل‌کننده فازی را می‌توان به صورت ذیل خلاصه نمود:

- منطق فازی برای فهمیدن ساده است.
- منطق فازی انعطاف‌پذیر است.
- منطق فازی می‌تواند بر اساس تجربیات خبرگان بنا شود.

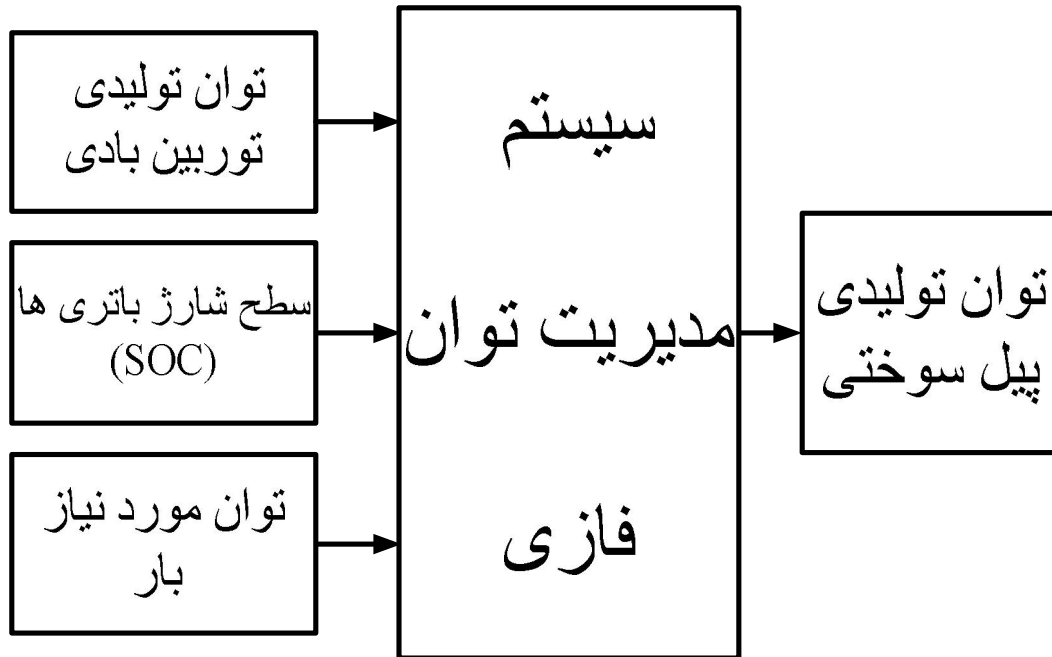
- توانایی کنترل کننده در اعمال قوانین تعیین شده برای حالت‌های موجود.
- توانایی کنترل کننده برای کنترل سیستم در حالت‌های فی مابین، که در تعیین قوانین کنترل کننده در نظر گرفته نشده باشند.
- کنترل کننده فازی سرعت عملکرد نسبتاً بالایی دارد.
- کنترل کننده فازی دقت بالایی در تصمیم‌گیری برای حالت‌های مختلف دارد و....

با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد کنترل فازی در این قسمت و در پیوست ۱، از روش فازی برای کنترل این سیستم استفاده می‌کنیم.

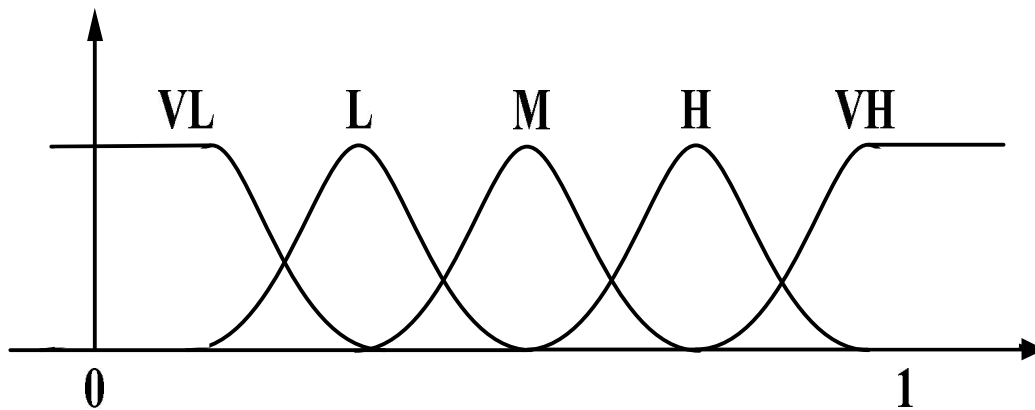
روش کنترل فازی مورد استفاده در این پایان‌نامه از نوع Mamdani بوده و از تابع Gaussian برای تعریف ورودی‌ها و خروجی سیستم استفاده شده است. برای هر یک از ورودی‌های و خروجی مورد نظر، قوانین مورد نیاز را تعیین کرده و به کنترل کننده اعمال می‌کنیم.

شکل (۲-۴) نشان‌دهنده بلوک دیاگرام سیستم فازی اعمال شده بر سیستم مورد مطالعه می‌باشد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مرجع توان تولیدی پیل سوختی به عنوان خروجی کنترل کننده می‌باشد. این خروجی همان طور که از نام آن مشخص است به عنوان مرجع توان به پیل سوختی اعمال می‌شود و لزوماً توان تولیدی پیل سوختی به علت داشتن دینامیک پیل، در زمان تغییر میزان توان مرجع با گذشت مدت زمان معین، به حالت پایدار می‌رسد. البته در این پایان‌نامه با توجه به اینکه هدف مدیریت توان منابع انرژی می‌باشد، بر روی مبدل‌های مورد استفاده در این سیستم، کنترلی صورت نمی‌گیرد.

شکل (۳-۴) نشان‌دهنده یکی از ورودی‌های (خروجی) سیستم فازی می‌باشد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در روش فازی، ورودی (خروجی) را می‌توان به چند بازه تقسیم کرده و با توجه به اهداف کنترلی مد نظر، هر یک از بازه‌ها را در محدوده مناسب تنظیم نمود.



شکل (۲-۴) فلوچارت سیستم مدیریت توان فازی



شکل (۳-۴) نمایشی از ورودی یا خروجی در سیستم فازی

برای افزایش دقت عملکرد سیستم، هر یک از ورودی‌ها و خروجی مورد نظر را به ۵ بازه تقسیم کرده و به کنترل‌کننده اعمال می‌کنیم. این کار باعث تصمیم‌گیری بهتر و دقیق‌تر برای تعیین خروجی کنترل‌کننده شده و در نتیجه باعث افزایش قابلیت اطمینان عملکرد سیستم می‌شود. لازم به ذکر است که این مورد به جلوگیری از عدم تداخل عملکردی بین پیل سوختی و باتری‌ها، که قبلاً مورد بررسی

قرار گرفت، نیز کمک می‌کند. این بازه‌ها با نام‌های خیلی کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و خیلی زیاد (VH) مشخص شده‌اند.

حال به بررسی قوانین عملکردی کنترل‌کننده فازی می‌پردازیم. با توجه به اینکه در این کنترل‌کننده ۳ ورودی داریم، لذا برای نمایش جدولی قوانین به صورت زیر عمل می‌کنیم. قوانین در ۵ حالت از سطح بار و مطابق جدول‌های (۴-۱) تا (۴-۵) می‌باشند. این قوانین با توجه به عملکرد سیستم طی مراحل مختلف و قوانین مختلف به دست آمده و مطابق نتایج حاصل شده، بهترین عملکرد را برای کنترل‌کننده نشان می‌دهند. در زیر یک نمونه از قوانین فازی اعمالی مشاهده می‌گردد.

If LOAD is VL and Pwind is VL and SOC is M then Y is M

...

If LOAD is H and Pwind is M and SOC is L then Y is H

حالت اول: سطح بار خیلی کم (LOAD=VL)، مطابق جدول (۴-۱) می‌باشد.

جدول (۴-۱): قوانین فازی برای حالت اول

SOC P_{WIND}	VL	L	M	H	VH
VL	VH	H	M	L	VL
L	VL	VL	VL	VL	VL
M	VL	VL	VL	VL	VL
H	VL	VL	VL	VL	VL
VH	VL	VL	VL	VL	VL

حالت دوم: سطح بار کم (LOAD=L)، مطابق جدول (۲-۴) می باشد.

جدول (۲-۴): قوانین فازی برای حالت دوم

SOC P _{WIND}	VL	L	M	H	HV
VL	H	M	L	VL	VL
L	VL	VL	VL	VL	VL
M	VL	VL	VL	VL	VL
H	VL	VL	VL	VL	VL
HV	VL	VL	VL	VL	VL

حالت سوم: سطح بار متوسط (LOAD=M)، مطابق جدول (۳-۴) می باشد.

جدول (۳-۴): قوانین فازی برای حالت سوم

SOC P _{WIND}	VL	NL	M	H	HV
VL	VH	VH	VH	VH	H
L	H	H	M	L	VL
M	VL	VL	VL	VL	VL
H	VL	VL	VL	VL	VL
VH	VL	VL	VL	VL	VL

حالت چهارم: سطح بار زیاد (LOAD=H)، مطابق جدول (۴-۴) می باشد.

جدول (۴-۴): قوانین فازی برای حالت چهارم

SOC P _{WIND}	VL	L	M	H	VH
VL	VH	VH	VH	VH	VH
L	VH	VH	H	H	H
M	H	H	M	M	L
H	L	VL	VL	VL	VL
VH	VL	VL	VL	VL	VL

حالت پنجم: سطح بار خیلی زیاد (LOAD=VH)، مطابق جدول (۵-۴) می باشد.

جدول (۵-۴): قوانین فازی برای حالت پنجم

SOC P _{WIND}	VL	L	M	H	VH
VL	VH	VH	VH	VH	VH
L	VH	VH	VH	VH	VH
M	VH	VH	VH	VH	VH
H	VH	H	M	L	H
VH	L	VL	VL	VL	VL

فصل پنجم

تشیه سازی سیستم بر اساس مدل های ارائه شده

۵-۱ شبیه‌سازی اجزای سیستم

در این بخش شبیه‌سازی سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱-۱ توربین بادی

توان تولیدی توربین بادی به سرعت باد وابسته می‌باشد. برای شبیه‌سازی توربین بادی از رابطه توان تولیدی توربین و سرعت باد استفاده می‌کنیم. همان طور که در فصل دوم نیز اشاره شد، رابطه توان تولیدی توربین بادی و سرعت باد به صورت (۵-۱) می‌باشد [۱۶ و ۱۴ و ۱۲].

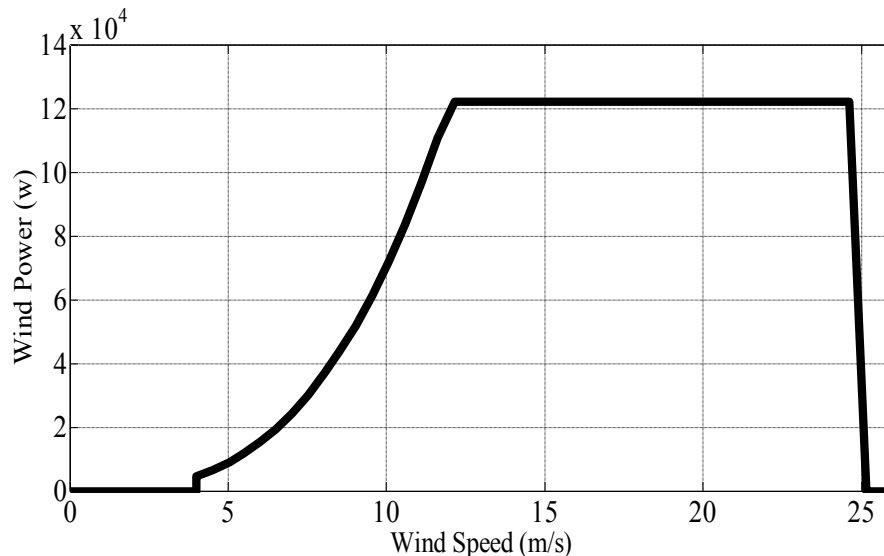
$$\left\{ \begin{array}{l} P_{wt} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \\ C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{16}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \\ OR \quad \lambda = \frac{r w_m}{V} \end{array} \right. \quad (۵-۱)$$

در این معادلات ρ نشان‌دهنده چگالی باد، A مساحت جاروب شده توسط پره‌ها (m^2)، V_w سرعت باد (m/s) و C_p ضریب بهره‌وری (بستگی به طراحی توربین دارد)، β زاویه پره‌ها، λ نرخ سرعت، r شعاع پره‌ها (m) و w_m سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب (rad/sec) می‌باشند.

البته رابطه (۵-۱) نشان‌دهنده توان مکانیکی تولیدی توسط توربین بادی می‌باشد. برای تولید توان الکتریکی توسط توربین بادی، از یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ($PMSG^{11}$) استفاده شده است. با اتصال شفت ژنراتور به شفت توربین بادی، در هنگام وزش باد شفت توربین به حرکت درآمده و

¹¹ Permanent Magnet Synchronous Generator

باعث چرخش ژنراتور می‌شود و بنابراین توان مکانیکی توربین بادی به توان الکتریکی تبدیل می‌شود. از توان الکتریکی تولیدی برای تغذیه بار استفاده می‌شود. در شکل (۵-۱) مشخصه توربین بادی بکار رفته مشاهده می‌شود.



شکل (۵-۱) منحنی مشخصه عملکردی توربین بادی مورد استفاده

۵-۱-۲ ژنراتور PMSG

ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم از جمله ژنراتورهای پر کاربرد در توربین‌های بادی و با توان بالا می‌باشند. کنترل توربین‌های بادی به همراه ژنراتور PMSG چند-قطبی با استفاده از مبدل‌های ولتاژ-مرجع^{۱۲} روشی مناسب است که هنوز به صورت عمومی مورد استفاده قرار نگرفته است [۳۳]. مزایای ژنراتورهای PMSG شامل: (۱) ساختار بدون گیربکس [۳۴] (۲) عدم نیاز به سیستم تحریک DC [۳۵] (۳) کنترل پذیری کامل در راستای استخراج ماکسیمم توان توربین بادی [۳۶] و (۴) سادگی در حذف خطای وارده از سمت شبکه می‌باشند [۳۷]. بنابراین استفاده از سیستم توربین بادی با ژنراتور PMSG نسبت به سایر توربین‌های بادی مناسب‌تر می‌باشد.

¹² Voltage Source Converter

مدل دینامیکی PMSG در قاب- مرجع dqo به صورت (۲-۵) می‌باشد [۳۷] و [۳۸]:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

در معادله‌ی (۲-۵)، R_s مقاومت سیم‌پیچی استاتور، ω_e سرعت زاویه‌ای الکتریکی ژنراتور و v_{sd} ، v_{sq} ، i_{sd} ، i_{sq} ، ψ_{sd} و ψ_{sq} به ترتیب ولتاژ، جریان و شار استاتور در قاب- مرجع dqo می‌باشند. در صورتیکه محور d در راستای شار روتور قرار بگیرد، شارهای پراکندگی استاتور به صورت (۳-۵) می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{dm} & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{qm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

که L_{ls} اندوکتانس پراکندگی سیم‌پیچ استاتور، L_{dm} و L_{qm} به ترتیب اندوکتانس متقابل محور d و q استاتور و روتور، ψ_f شار پراکندگی تولیدی توسط آهنرباها می‌باشند. همچنین گشتاور الکترومغناطیسی برابر است با (۴-۵) [۲۶]:

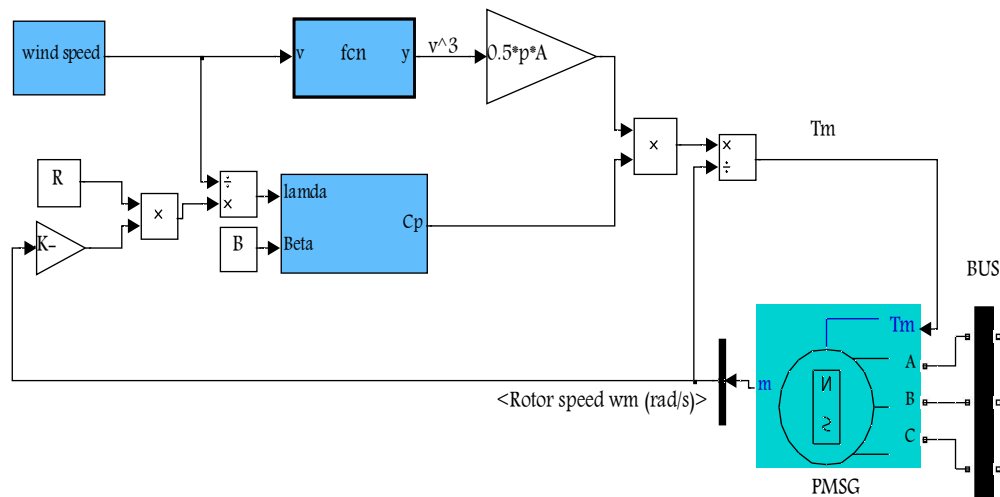
$$\tau_m = p(\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) = p(\psi_f i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \quad (5-4)$$

که $L_d = L_{ls} + L_{dm}$ و $L_q = L_{ls} + L_{qm}$ می‌باشند. معادله‌ی (۲-۵) در حالت ماندگار به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

شکل (۲-۵) نشان‌دهنده توربین بادی شبیه‌سازی شده مطابق رابطه (۵-۱) به همراه ژنراتور

PMSG می‌باشد.



شکل (۲-۵) توربین بادی با ژنراتور PMSG

همان طور که در شکل (۲-۵) مشخص می‌باشد، در هر لحظه با توجه به سرعت باد، با توجه به

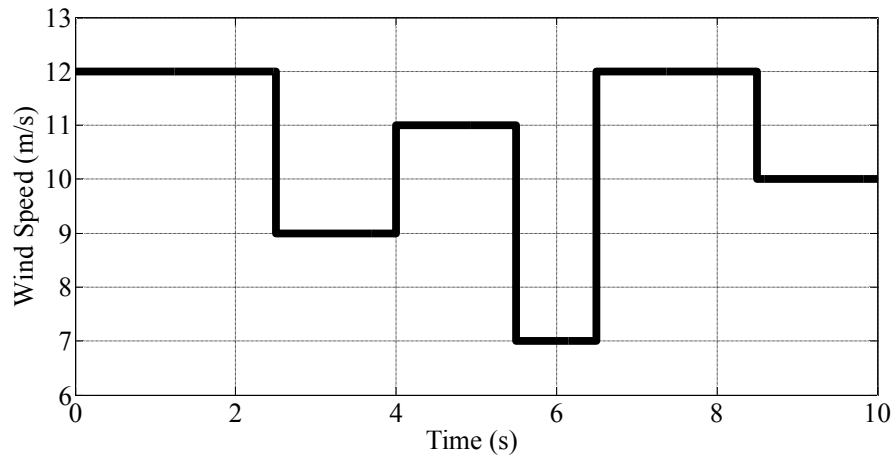
رابطه (۵-۱)، C_p به دست می‌آید و بدین ترتیب توان بهینه توسط توربین بادی تولید می‌شود.

برای سرعت باد نشان داده‌شده در شکل (۵-۳)، C_p و توان تولیدی توربین بادی به ترتیب در

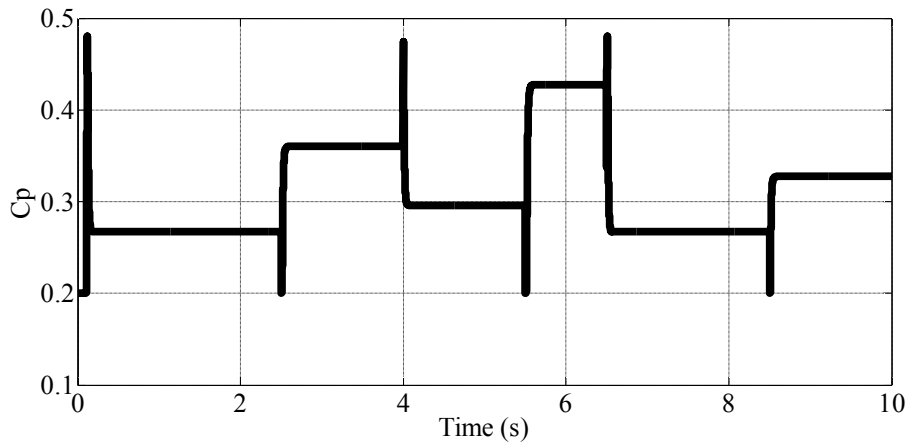
شکل‌های (۵-۴) و (۵-۵) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که حداکثر مقدار C_p طبق نظریه بتز

حدود 0.52 می‌باشد. اما در عمل این ثابت بین 0.2 تا 0.45 می‌باشد. مطابق شکل (۵-۴)، C_p در بازه

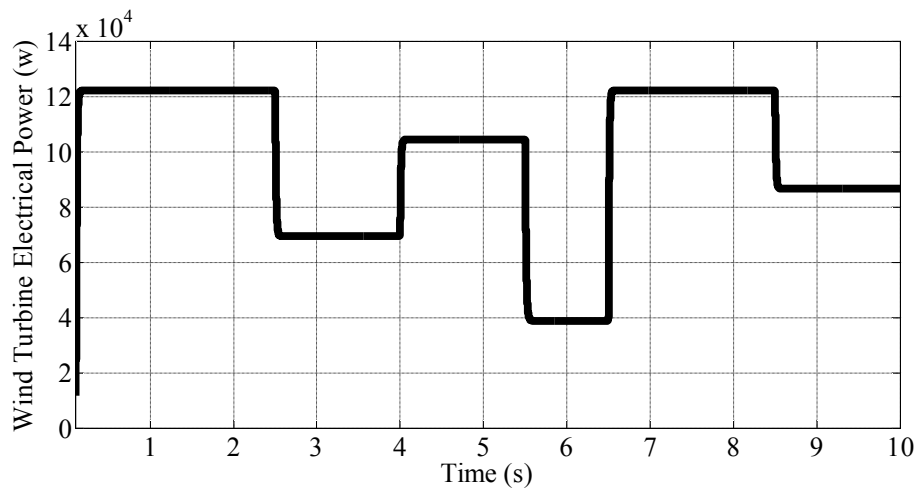
مناسبتی قرار دارد.



شکل (۳-۵) سرعت باد



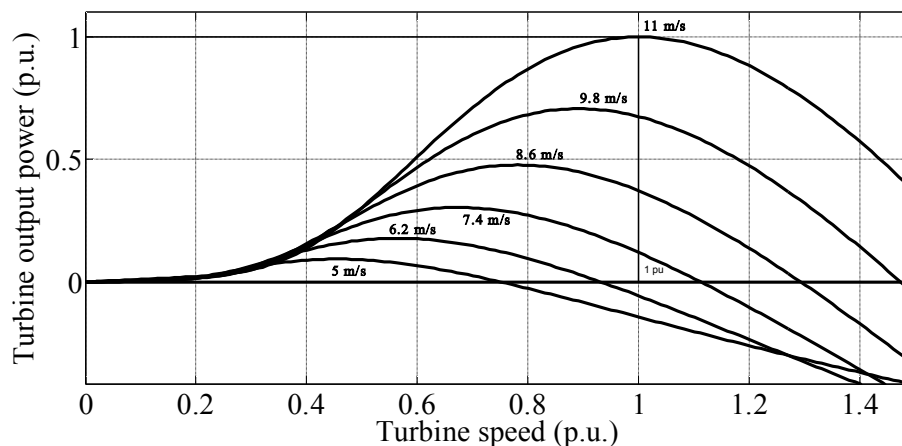
شکل (۴-۵) منحنی Cp با توجه با سرعت باد شکل (۳-۵)



شکل (۵-۵) توان الکتریکی تولیدی توربین بادی با توجه با سرعت باد شکل (۳-۵)

همان طور که مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه C_p در هر لحظه با توجه به سرعت باد تغییر می‌کند، توان تولیدی توربین بادی نیز به طور نرم و با تغییر سرعت باد تغییر می‌کند. این در حالی است که در صورتی که C_p ثابت در نظر گرفته شود، توان تولیدی توربین با تغییر سرعت باد به یک باره و به صورت ناگهانی تغییر می‌کرد.

منحنی آئرودینامیکی توربین بادی که ردیابی ماکزیمم توان تولیدی توربین بادی بر اساس آن می‌باشد به صورت شکل (۵-۶) می‌باشد.



شکل (۵-۶) منحنی آئرودینامیکی توربین بادی

بنابراین توربین بادی طراحی شده هم از نظر عملکرد و هم از نظر توان تولیدی متناسب با سرعت باد، در شرایط مناسبی عمل می‌کند.

۵-۱-۳ پیل سوختی

برای شبیه‌سازی پیل سوختی از روابط مربوط به پیل سوختی که در روابط (۵-۶) تا (۵-۱۰) آورده شده است استفاده می‌کنیم. آنچه در پیل سوختی مهم می‌باشد این است که در حالت بی باری

پس از تثبیت ولتاژ، دیگر نباید افت ولتاژ به وجود بیاید و این نشان‌دهنده عملکرد صحیح پیل می‌باشد
[۲۶] و [۳۲].

$$q_{H_2} = \left[\frac{2k_r I_{fc}}{U} - q_{H_2} \right] \frac{1}{tS} \quad (۶-۵)$$

$$p_{H_2} = \left[\frac{q_{H_2} - 2k_r I_{fc}}{k_{H_2}} \right] \frac{1}{t_{H_2} S + 1} \quad (۷-۵)$$

$$p_{H_2O} = \left[\frac{2k_r I_{fc}}{k_{H_2O}} \right] \frac{1}{t_{H_2O} S + 1} \quad (۸-۵)$$

$$p_{O_2} = \left[\frac{(q_{H_2} / r_{H_2}) - k_r I_{fc}}{k_{O_2}} \right] \frac{1}{t_{O_2} S + 1} \quad (۹-۵)$$

$$V_{FC} = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \log \left(\frac{q_{H_2} \times p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) \right] - R_{int} I_{FC} \quad (۱۰-۵)$$

در روابط فوق، پارامترهای بکار رفته به شرح جدول (۱-۵) می‌باشند.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در این سیستم پیل به عنوان سیستم پشتیبان می‌باشد و بنابراین ظرفیت توان تولیدی پیل سوختی کمتر از میزان بار می‌باشد. طبق نتایج حاصل از فصل سوم، ماکزیمم ظرفیت تعیین‌شده برای پیل سوختی در حدود ۵۰ کیلووات می‌باشد. البته در طی عملکرد سیستم ممکن است هرگز از ظرفیت نامی پیل استفاده نشود و این به علت هم‌پوشانی عملکرد پیل سوختی و ذخیره‌ساز انرژی در راستای عملکرد بهینه سیستم می‌باشد.

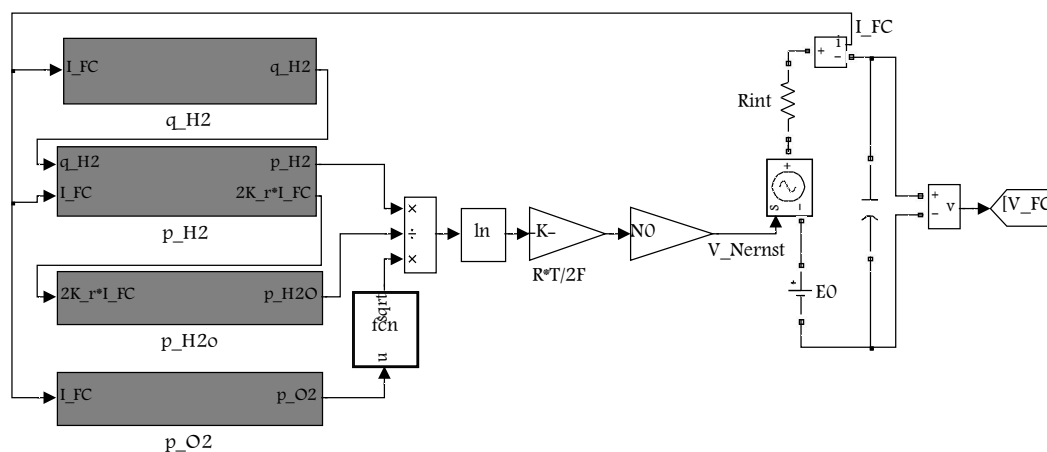
جدول (۵-۱): پارامترهای پیل سوختی

ولتاژ بی باری استاندارد (v)	E_0	۲	تعداد پیل‌های سری شده در یک پشته	N_0	۱
دمای مطلق (T)	T	۴	ثابت جهانی گازها (atm/mol.K)	R	۳
ثابت فارادی (C/mol)	F	۶	جریان پیل سوختی (A)	I_{FC}	۵
ثابت مولار دریاچه آب (mol/atm.s)	K_{H_2O}	۸	ثابت مولار دریاچه هیدروژن (mol/atm.s)	K_{H_2}	۷
ضریب بهره وری	U	۱۰	ثابت مولار دریاچه اکسیژن (mol/atm.s)	K_{O_2}	۹
فشار جزئی هیدروژن (atm)	P_{H_2}	۱۲	ثابت مدلسازی (mol/(s.A))	k_r	۱۱
فشار جزئی اکسیژن (atm)	P_{O_2}	۱۴	فشار جزئی آب (atm)	P_{H_2O}	۱۳
فلوی اکسیژن (mol/s)	Q_{O_2}	۱۶	فلوی هیدروژن (mol/s)	Q_{H_2}	۱۵
ثابت زمانی هیدروژن (s)	T_{H_2}	۱۸	مقاومت داخلی پیل سوختی (اهم)	R_{int}	۱۷
ثابت زمانی آب (s)	T_{H_2O}	۲۰	ثابت زمانی اکسیژن (s)	T_{O_2}	۱۹

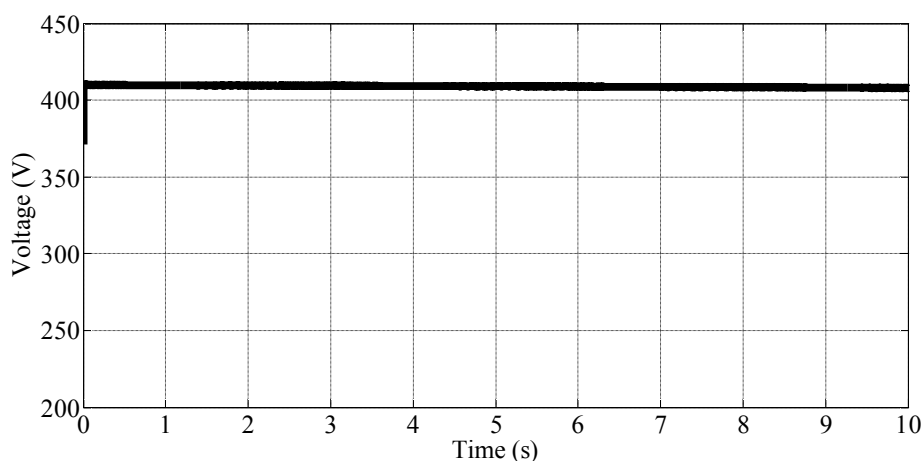
شکل (۵-۷) نشان دهنده مدار شبیه سازی شده پیل سوختی با توجه به روابط فوق می‌باشد.

همچنین شکل (۵-۸) ولتاژ پیل را در شرایط بی باری نشان می‌دهد. مطابق شکل (۵-۸) ولتاژ در حالت

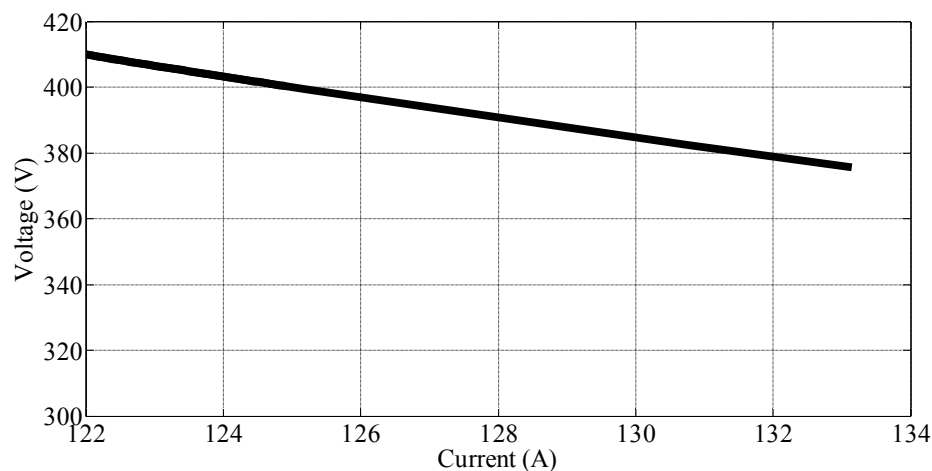
بی باری ثابت بوده و تغییری نمی‌کند. شکل (۵-۹) نیز مشخصه ولتاژ-جریان پیل را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۷) مدار پیل سوختی



شکل (۸-۵) ولتاژ پیل سوختی در شرایط بی باری



شکل (۹-۵) مشخصه ولتاژ-جریان پیل سوختی در شرایط بی باری

۵-۱-۴ ذخیره ساز انرژی (باتری‌ها)

استفاده از ذخیره ساز انرژی می‌تواند در کاهش انحرافات ولتاژ سیستم موثر واقع شود. همچنین در جلوگیری از، از دست دادن بخشی از بار نیز نقش بسزایی ایفا می‌کند. عملکرد سیستم ذخیره ساز انرژی بدین صورت است که در مواقعی که انرژی تولیدی سیستم تولید توان کمتر از میزان بار باشد، از انرژی ذخیره‌شده در سیستم می‌توان برای جبران این کمبود استفاده نمود و در شرایطی که توان تولیدی سیستم بیش از مقدار توان مورد نیاز بار باشد، این مازاد انرژی در سیستم ذخیره ساز انرژی

ذخیره می‌شود تا در زمان مورد نیاز از آن استفاده نمود. انواع ذخیره سازهای انرژی شامل باتری‌ها، ابر خازن‌ها، پمپ آب، ذخیره ساز هیدروژن، کمپرسورهای ذخیره ساز هوا و... می‌باشند.

رایج‌ترین این ذخیره سازها عبارت‌اند از باتری‌ها، ابر خازن‌ها (super capacitors) و ذخیره ساز هیدروژن. در مقایسه بین باتری‌ها و ابر خازن‌ها می‌توان به علت عملکرد دینامیکی سریع، ابر خازن‌ها را بهتر از باتری‌ها ارزیابی نمود. همچنین ابر خازن‌ها قابلیت شارژ و دشارژ سریع‌تری دارند. در کل ابر خازن‌ها بازدهی بیشتری نسبت به باتری‌ها دارند. همچنین دمای عملکرد آنها نسبت به باتری‌ها کمتر می‌باشد. البته می‌توان از flywheel نیز برای پوشش سریع دینامیکی استفاده نمود ولی ابر خازن‌ها ایمنی بیشتری نسبت به flywheel دارند.

البته آنچه که اغلب در مورد انتخاب نوع ذخیره ساز در سیستم مورد توجه قرار می‌گیرد، هزینه سرمایه‌گذاری برای ذخیره ساز انرژی می‌باشد. در این پایان‌نامه از باتری‌های اسید-سرب به عنوان ذخیره ساز انرژی استفاده می‌شود. نکته‌ای که در مورد کنترل ذخیره سازها در این سیستم وجود دارد، این است که کنترل آنها بر اساس سطح شارژ آنها (SOC^{۱۳}) صورت می‌پذیرد. در فرمول (۵-۱۱) رابطه سطح شارژ باتری‌ها نشان داده شده است.

$$SOC = \frac{Q_0 \pm \int i_{battery} dt}{Q_n} \quad (۵-۱۱)$$

در این فرمول Q_0 سطح شارژ اولیه، Q_n ظرفیت باتری‌ها و i جریان باتری و SOC سطح شارژ باتری می‌باشد.

روابط (۵-۱۲) و (۵-۱۳) به ترتیب شارژ و دشارژ باتری‌ها را مدل می‌نماید.

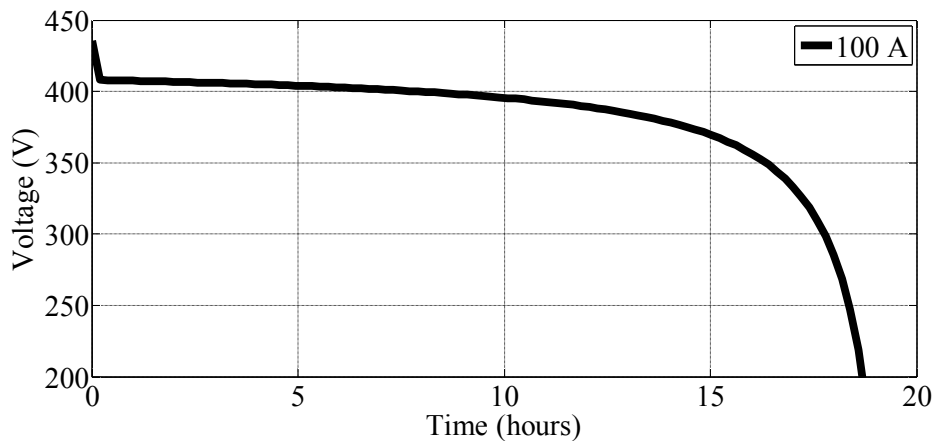
^{۱۳} State of Charge

$$f_1(i^{**}, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{0.1Q + i^{**}} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i^{**}} \cdot i^{**} + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (12-5)$$

$$f_2(i^{**}, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - i^{**}} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i^{**}} \cdot i^{**} + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (13-5)$$

که در این معادلات E_0 ولتاژ ثابت باتری (ولت)، $Exp(s)$ دینامیک نمایی باتری (ولت)، $Sel(s)$ نشان دهنده حالت باتری است که برابر ۱ در زمان شارژ باتری و ۰ در زمان دشارژ باتری، K مقاومت متقابل (اهم)، i^* دینامیک جریان فرکانس پایین (آمپر)، i^{**} ظرفیت خارج شده (آمپرساعت)، i جریان باتری (آمپر) و Q ماکزیمم ظرفیت باتری می‌باشند.

شکل (۱۰-۵) نشان‌دهنده مشخصه دشارژ باتری‌ها می‌باشد. مشاهده می‌شود که پس از مدت زمان معینی سطح شارژ باتری‌ها بسیار افت کرده و ولتاژ آن کاهش می‌یابد و در این حالت دیگر باتری توانایی پاسخ مناسب به عملکرد سیستم را نخواهد داشت.

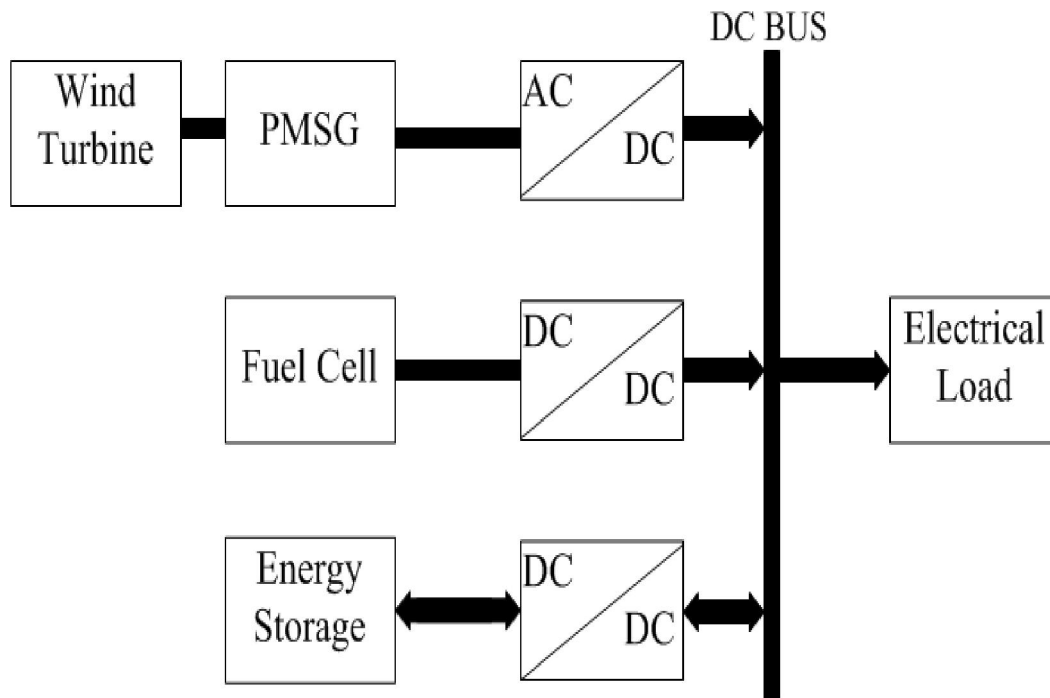


شکل (۱۰-۵) مشخصه دشارژ باتری‌ها

۵-۲ مدل سازی سیستم

سیستم مورد مطالعه شامل توربین بادی، پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی می باشد. با توجه به اینکه در این پایان نامه هدف مدیریت توان در این سیستم در راستای عملکرد بهینه سیستم می باشد، بنابراین وارد بخش های مربوط به کنترل مبدل های الکترونیک قدرت متصل به هر یک منابع تولیدی نمی شویم. این مدیریت توان در راستای تعیین میزان توان تولیدی مرجع توسط پیل سوختی برای پوشش نارسایی های سیستم در مواقع گوناگون از جمله عدم توانایی پوشش بار توسط توربین بادی، کاهش سطح شارژ باتری ها و ... می باشد. بنابراین از توان تولیدی توربین بادی و سطح شارژ باتری ها و همچنین میزان تقاضا به عنوان ورودی های سیستم کنترلی، برای تعیین نحوه عملکرد پیل سوختی استفاده می کنیم. مهم ترین اهداف کنترلی در این سیستم مدیریت بهینه توان در راستای تأمین بار و ایجاد مصالحه بین منابع برای کاهش هزینه ها و عدم تداخل عملکرد آنها می باشند؛ که در بخش چهارم به تفصیل شرح داده شد. شکل (۵-۱۱) نشان دهنده نمایی از اتصال اجزا در سیستم مورد مطالعه می باشد.

لازم به تأکید مجدد می باشد که خروجی کنترل کننده که توان پیل سوختی را تعیین می کند به عنوان توان مرجع برای عملکرد پیل سوختی می باشد و به عنوان خروجی پیل سوختی نمی باشد. با اعمال این توان مرجع به پیل سوختی می توان دینامیک سیستم پیل سوختی را مشاهده نمود که در خروجی کنترل کننده این امر دیده نمی شود. بنابراین رفتار واقعی پیل سوختی در خروجی کنترل کننده مشاهده نمی شود.



شکل (۱۱-۵) سیستم تولید توان ترکیبی بادی- پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی

همان طور که در شکل (۱۱-۵) مشاهده می‌شود، منابع الکتریکی همه به باس DC متصل می‌باشند و بار مورد نظر نیز از نوع DC می‌باشد.

مطابق آنچه که در فصل چهارم ذکر گردید، کنترل‌کننده فازی بکار رفته در این سیستم برای عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف طراحی شده است. این شرایط اعم از متغیر بودن توان تولیدی توربین، متغیر و یا ثابت بودن بار الکتریکی، متغیر بودن هر دو، پیش آمدهای ناگهانی از قبیل قطعی بار و یا قطعی توان تولیدی توربین و ... می‌باشند. در ادامه به بررسی نتایج شبیه‌سازی سیستم فوق تحت شرایط مختلف می‌پردازیم. همچنین اهداف کنترلی مورد نظر نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند.

فصل هشتم

نتایج شبیه‌سازی سیستم در حالت‌های مختلف

عملکردی

در این فصل نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم و اعمال کنترل‌کننده، تحت شرایط عملکردی مختلف مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، کارآمد بودن کنترل‌کننده اعمال‌شده بر روی سیستم مورد نظر، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

همان‌طور که در فصل چهارم ذکر شد، کنترل سیستم در راستای عملکرد بهینه مجموعه برای پوشش بار الکتریکی مورد نظر می‌باشد. ورودی‌ها سیستم کنترلی مورد نظر بار و توان تولیدی توربین بادی و همچنین سطح شارژ باتری‌ها می‌باشد. از آنجا که سیستم کنترلی مورد نظر باید تحت شرایط مختلف باید قادر به عملکرد مناسب باشد، بنابراین حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرند.

حالت‌های (الف) تا (ه) مربوط به مدیریت توان با توجه به توان مرجع پیل سوختی که از خروجی کنترل‌کننده به دست می‌آید بوده و رفتار دینامیکی پیل سوختی در آن نشان داده نمی‌شود. البته این موضوع به دلیل عدم بررسی مبدل‌های مورد نیاز می‌باشد. حالت (و) نشان‌دهنده رفتار دینامیکی پیل سوختی با توجه به توان مرجع پیل سوختی می‌باشد. البته لازم به ذکر است از آنجا در این پایان‌نامه کنترل بر روی مبدل‌های الکترومیک قدرت صورت نگرفته است، لذا حالت (و) تنها برای نشان دادن دینامیک پیل سوختی می‌باشد و مطابق نتیجه این قسمت ردیابی دقیق صورت نگرفته است. انواع حالت‌های مورد بررسی به شرح ذیل می‌باشد:

الف) سرعت باد ثابت - بار متغیر

ب) سرعت باد متغیر - بار ثابت

ج) سرعت باد متغیر - بار متغیر

د) قطع ناگهانی توربین بادی

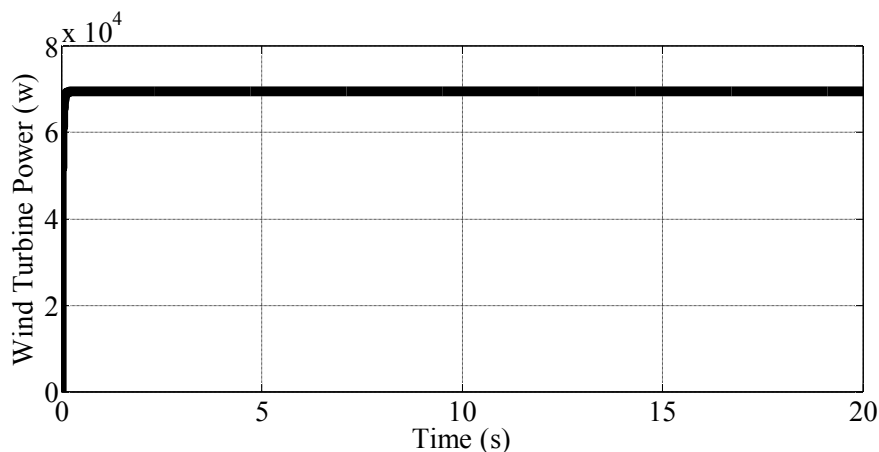
ه) سرعت باد متغیر - بار متغیر با سطح شارژ پایین باتری‌ها

و) بررسی پاسخ دینامیکی پیل سوختی

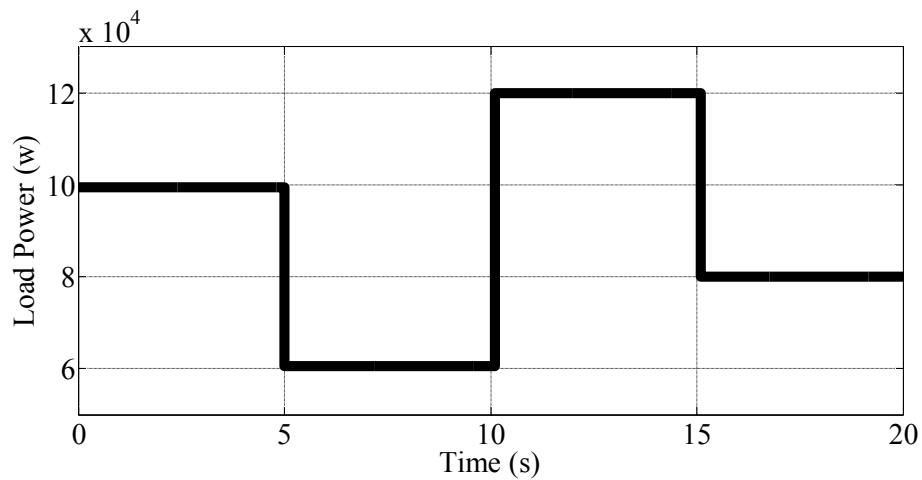
۱-۶ حالت اول: سرعت باد ثابت – بار متغیر

در این حالت سرعت باد را ثابت و برابر با ۹ متر بر ثانیه در نظر می‌گیریم. بنابراین توان تولیدی توربین بادی نیز مطابق شکل (۱-۶) ثابت و برابر با ۷۰ کیلووات می‌باشد. سطح شارژ اولیه باتری‌ها ۷۰٪ می‌باشد. بار متصل به سیستم در این حالت متغیر و مطابق شکل (۲-۶) می‌باشد.

با مقایسه شکل (۱-۶) و شکل (۲-۶) مشاهده می‌شود که در بازه‌های زمانی مختلفی توان تولیدی توربین بادی قادر به تأمین تقاضای بار نمی‌باشد. بنابراین در این زمان‌ها باید پیل سوختی و باتری‌ها با پوشش مناسب مانع از دست دادن بار و یا بخشی از آن شوند. این پوشش باید به گونه‌ای باشد که پیل سوختی با عملکرد مناسب خود در هر لحظه به میزان مورد نیاز توان تولید کند و از تولید توان اضافی خودداری کند. البته با توجه به دینامیک کند پیل سوختی در هنگام راه‌اندازی، همواره پیل را در حال کار نگه می‌داریم و مقدار توان تولیدی آن در این لحظات حدود ۸ کیلووات می‌باشد. بنابراین در برخی زمان‌ها که نیاز به توان پیل سوختی نداریم، توان تولیدی پیل به همراه مازاد توان تولیدی توربین بادی در باتری‌ها ذخیره می‌شوند.

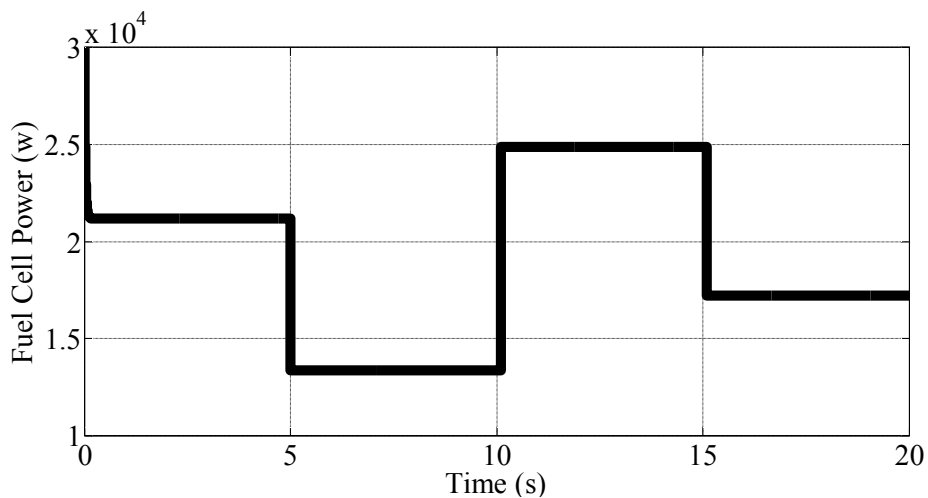


شکل (۱-۶) توان تولیدی توربین بادی

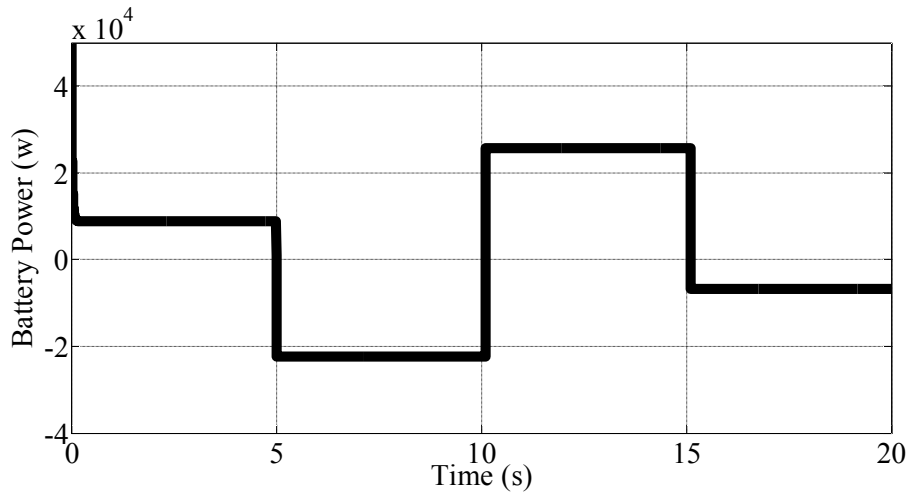


شکل (۲-۶) بار الکتریکی

شکل (۳-۶) نشان دهنده توان تولیدی پیل سوختی یا همان خروجی کنترل کننده و شکل (۴-۶) نشان دهنده توان باتری ها می باشد. در شکل (۴-۶) در زمان هایی که توان منفی می باشد نشان دهنده جذب توان مازاد تولیدی توسط توربین و پیل و یا همان حالت شارژ می باشد و زمانی که توان مثبت می باشد نشان دهنده تزریق توان به بار و یا همان دشارژ باتری ها می شود.

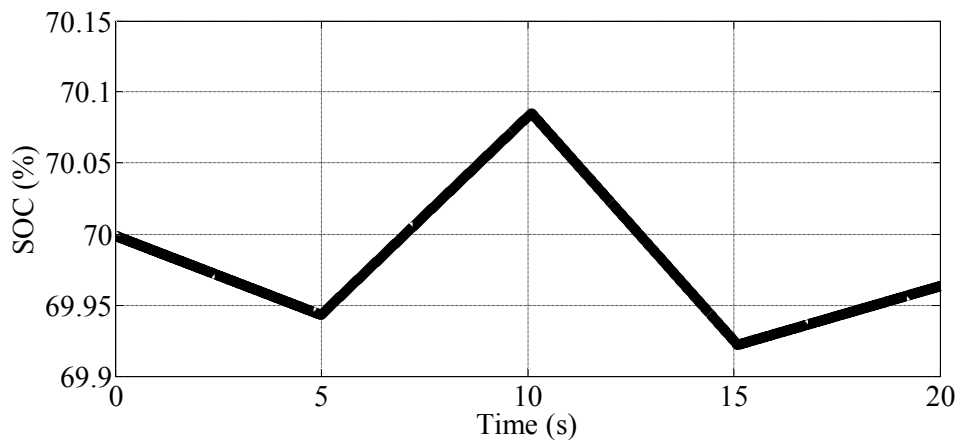


شکل (۳-۶) توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل کننده)



شکل (۴-۶) توان ذخیره ساز انرژی

همچنین شکل (۵-۶) نشان دهنده سطح شارژ باتری می باشد. با توجه به این شکل مشاهده می شود که عملکرد سیستم به گونه ای بوده که همواره در راستای حفظ سطح مناسب شارژ باتری ها نیز بوده است. البته باید توجه کرد که زمان شبیه سازی کوتاه بوده و بنابراین زمان کافی برای نشان دادن عملکرد باتری ها نمی باشد. اما با توجه به نتیجه حاصله می توان عملکرد سیستم را در راستای توجه به سطح شارژ باتری ها نیز مناسب ارزیابی نمود.

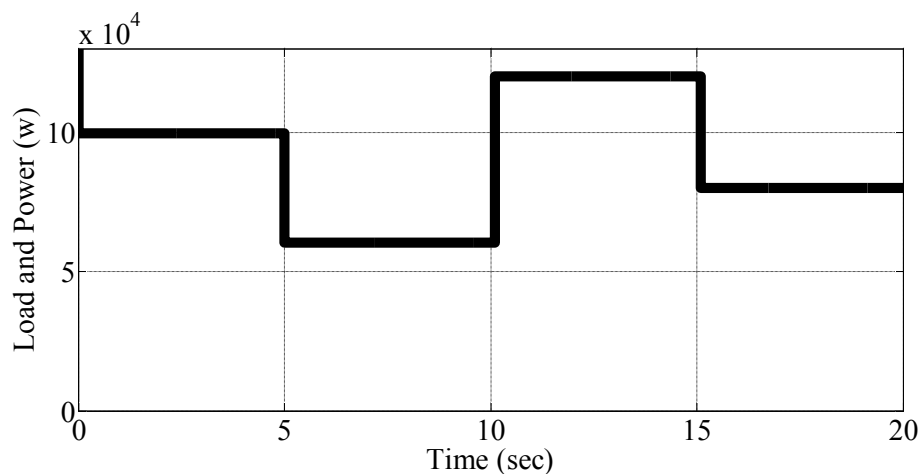


شکل (۵-۶) سطح شارژ باتری ها (SOC)

با توجه به شکل های (۳-۶) تا (۵-۶) مشاهده می شود که باتری ها و پیل سوختی مکمل یکدیگر بوده و تداخل در عملکرد بین آنها مشاهده نمی شود. برای مثال در زمان ۰ تا ۵ ثانیه که بار بیش از توان

تولیدی توربین است، هم باتری و هم پیل سوختی برای جبران کمبود توان به کمک توربین بادی می-آیند و در بازه ۵ تا ۱۰ ثانیه که بار کاهش می‌یابد، توان تولیدی پیل کاهش چشمگیری داشته و در این لحظه توان مازاد توسط باتری‌ها جذب می‌شود. همچنین در بازه ۱۰ تا ۱۵ ثانیه که بار دوباره افزایش می‌یابد، جبران کمبود توان تنها بر عهده پیل نبوده و باتری نیز با توجه به SOC خود به کمک سیستم برای جبران کمبود بار می‌آید. همین عامل باعث کاهش سوخت مصرفی پیل شده و صرفه اقتصادی بهره‌برداری از سیستم را افزایش می‌دهد.

و اما آنچه در کنترل سیستم مورد نظر مهم می‌باشد تطابق توان تولیدی توسط منابع انرژی با بار الکتریکی مورد تقاضا در سیستم می‌باشد. این مطابقت باید به گونه‌ای باشد که تا حد امکان هیچ قسمتی از بار از دست نرود و تمام بار به طور کامل تأمین شود. شکل (۶-۶) نشان‌دهنده بار و توان تولیدی سیستم می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود، تمام بار به طور کامل و بدون کوچک‌ترین نارسایی و از دست دادن حتی بخش کوچکی از آن تأمین شده است.



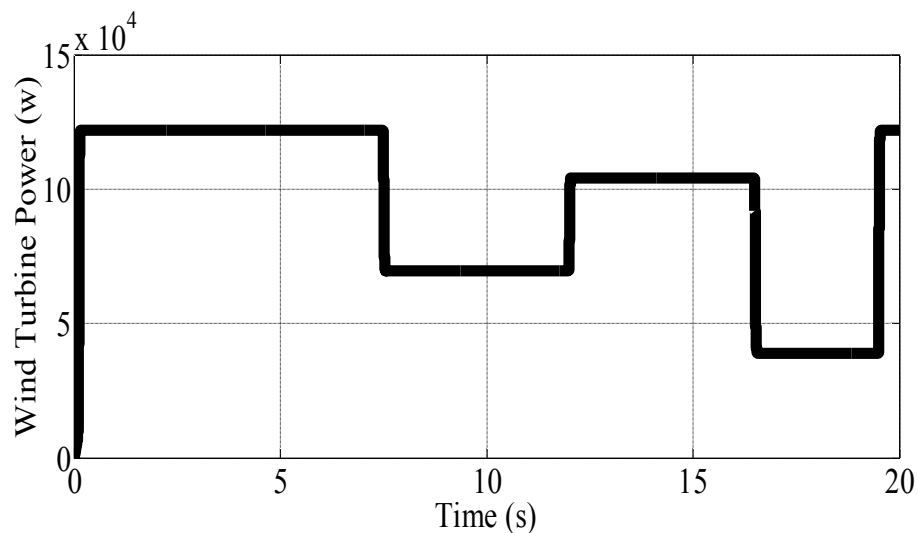
شکل (۶-۶) مطابقت توان تولیدی و بار

بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده اعمالی تحت شرایط فوق عملکرد مناسبی داشته و تمام اهداف مورد نظر را تحقق بخشیده است.

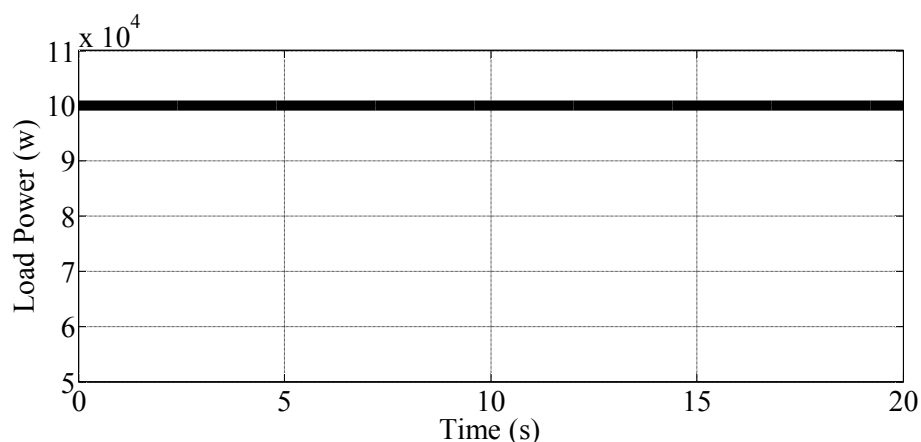
۶-۲ حالت دوم: سرعت باد متغیر – بار ثابت

در این حالت سرعت باد را متغیر در نظر می‌گیریم. بنابراین توان تولیدی توربین بادی نیز با توجه به سرعت باد مطابق شکل (۶-۷) خواهد بود. همچنین برای بار الکتریکی در این حالت مقدار ثابت و برابر با ۱۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است که در شکل (۶-۸) مشاهده می‌شود. سطح شارژ اولیه باتری‌ها نیز برابر ۷۰٪ می‌باشد.

با مقایسه شکل (۶-۷) و شکل (۶-۸) مشاهده می‌شود که در برخی بازه‌ها بین بار و توان تولیدی توربین عدم تطابق وجود دارد. بنابراین از سیستم پشتیبان که شامل پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی می‌باشد برای برقراری تعادل بین بار و توان تولیدی استفاده می‌شود.



شکل (۶-۷) توان تولیدی توربین بادی



شکل (۶-۸) بار الکتریکی

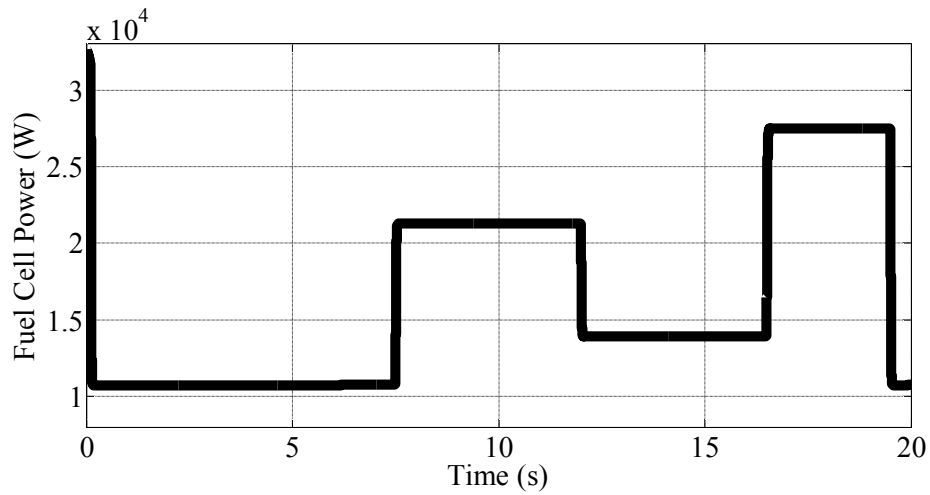
در شکل (۶-۹) توان تولیدی پیل سوختی و در شکل (۶-۱۰) توان ذخیره ساز انرژی نشان داده شده است. مجموع این دو شکل برابر اختلاف بین بار و توان تولیدی توربین بادی در بازه‌های زمانی مختلف می‌باشد. همان طور که در این دو شکل مشاهده می‌شود، باز هم عدم تداخل در عملکرد این دو سیستم به وضوح مشاهده می‌شود. در بازه زمانی ۰ تا ۵ ثانیه توان توربین بیشتر از توان مورد تقاضای بار می‌باشد و بنابراین با توجه به SOC پیل سوختی در پایین‌ترین حد خود توان الکتریکی تولید می‌کند و سپس مجموع این توان و توان مازاد تولید شده توسط توربین در باتری‌ها ذخیره می‌شود. سپس در بازه ۵ تا ۱۰ ثانیه، با توجه به اینکه بار از توان تولیدی توربین بادی بیشتر است، هم پیل سوختی و هم باتری در تأمین کمبود توان مورد تقاضا مشارکت می‌کنند و بنابراین تمام مسئولیت جبران کمبود توان به عهده یکی از منابع پشتیبان نباشد. این کار باعث کاهش هزینه‌ی سوخت مصرفی پیل و همچنین افزایش طول عمر باتری‌ها (با توجه به رعایت سطح شارژ باتری‌ها) شود.

همچنین نحوه عملکرد سیستم به گونه‌ای است که توجه به سطح شارژ باتری‌ها در راستای نگهداشتن SOC در بازه‌ی مناسب شده است. در شکل (۶-۱۱) سطح شارژ باتری‌ها نشان داده شده است.

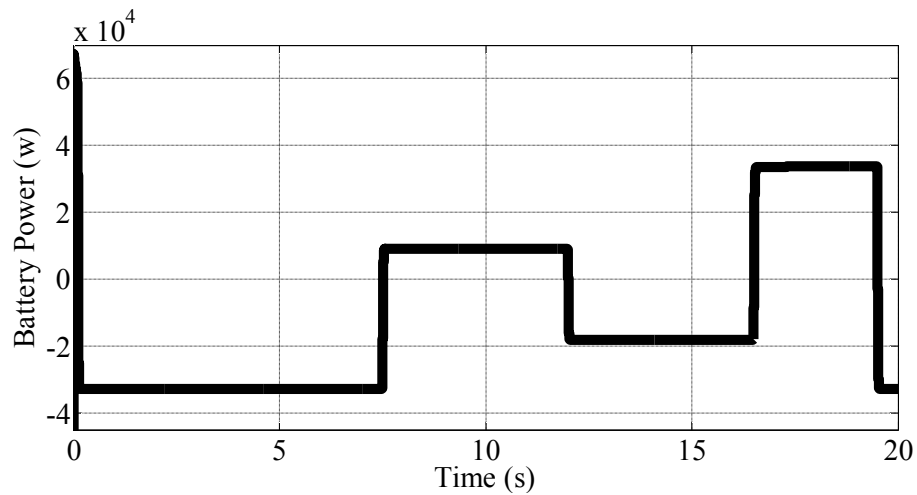
شکل (۶-۱۲) نیز نشان‌دهنده تطابق کامل بین توان تولیدی سیستم و بار الکتریکی می‌باشد.

مطابق این شکل در تمام لحظات بار الکتریکی بدون کوچک‌ترین کمبود توان الکتریکی تأمین شده

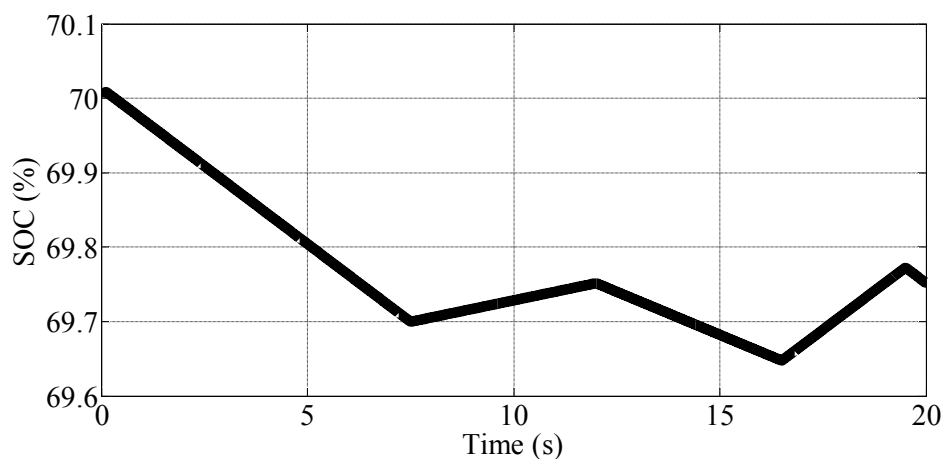
است.



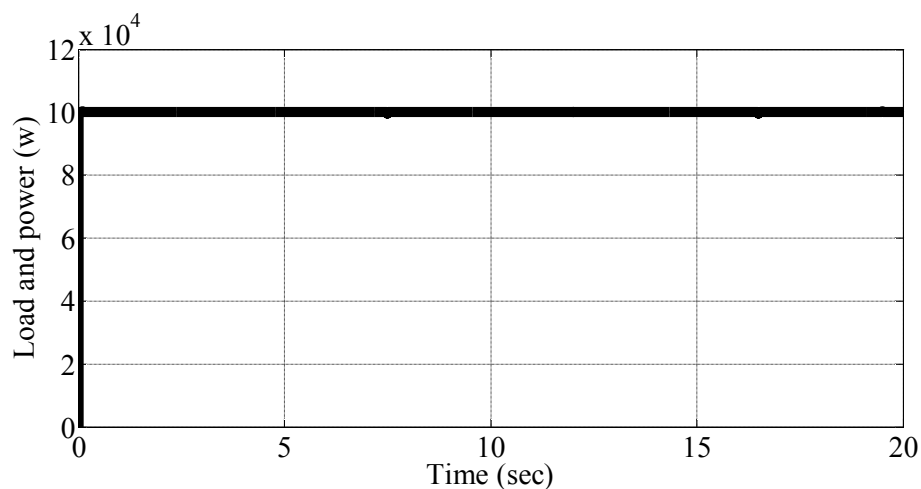
شکل (۶-۹) توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل‌کننده)



شکل (۶-۱۰) توان ذخیره ساز انرژی



شکل (۱۱-۶) سطح شارژ باتری‌ها (SOC)



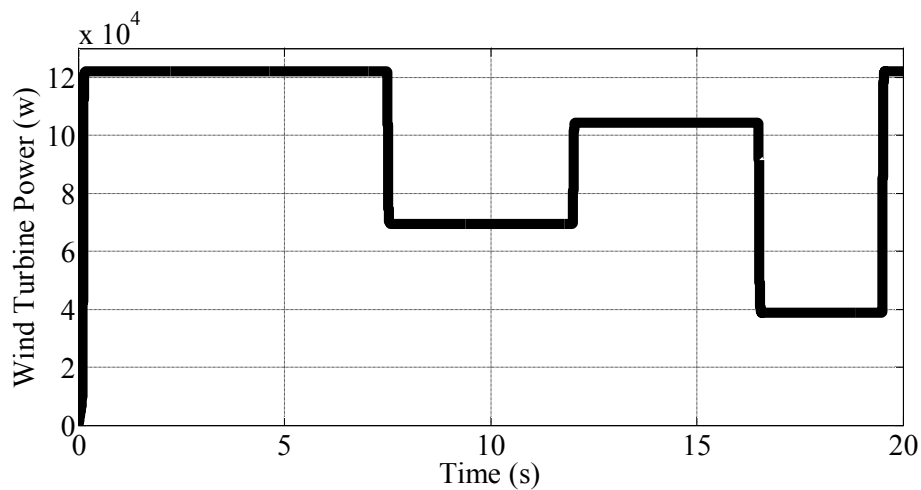
شکل (۱۲-۶) مطابقت توان تولیدی و بار

بنابراین با توجه به نتایج این قسمت مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده تحت این شرایط نیز عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهد.

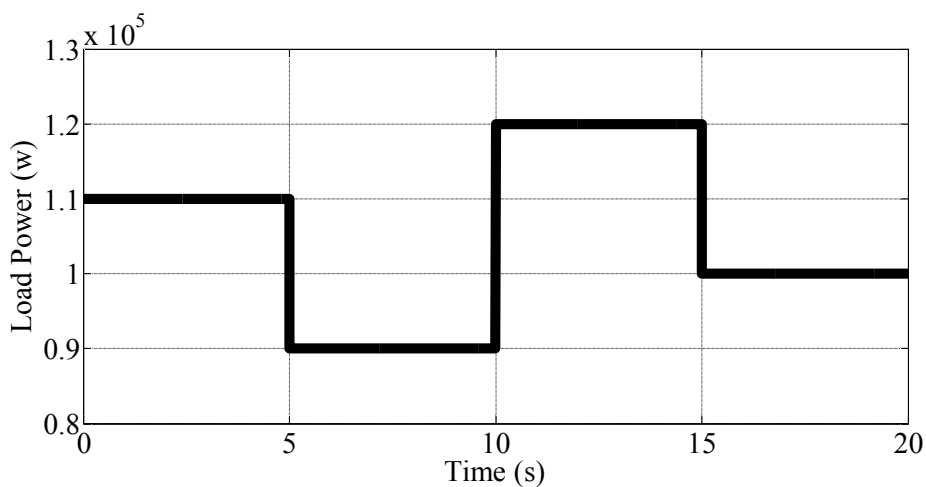
۶-۳ حالت سوم: سرعت باد متغیر – بار متغیر

در این حالت هم توان تولیدی توربین بادی، به علت متغیر بودن سرعت باد، مطابق شکل (۶-۱۳) و هم بار الکتریکی مطابق شکل (۶-۱۴) متغیر می‌باشند. در این مورد تمامی حالات ممکن بررسی شده و به نوعی هر دو حالت ۶-۲ و ۶-۳ را پوشش می‌دهد.

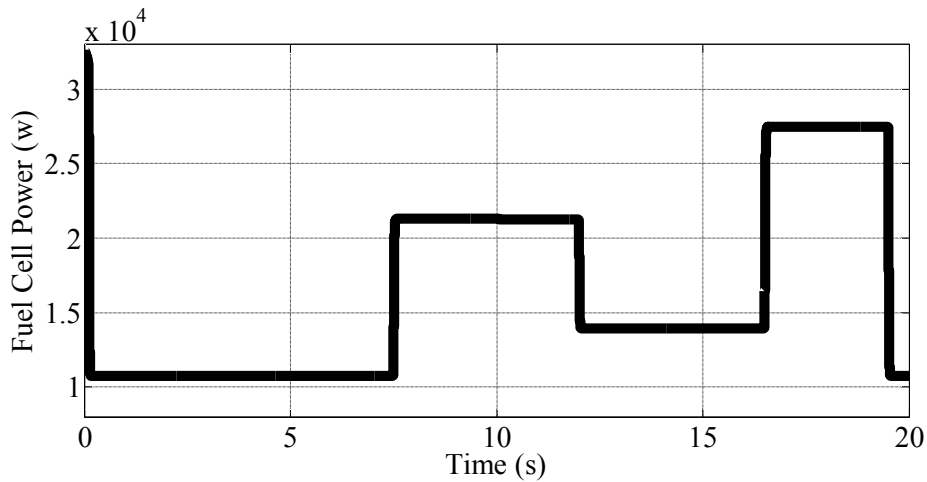
با توجه به توان تولیدی توربین و بار الکتریکی مشاهده می‌شود که بین این دو مطابقت وجود ندارد. بنابراین وظیفه سیستم پشتیبان برقراری تعادل توان بین بار و توان تولیدی سیستم می‌باشد. در این حالت پیل سوختی و باتری‌ها با تولید کمبود توان مورد نیاز بار (توسط پیل و باتری‌ها) و جذب مازاد توان (توسط باتری‌ها) به برقراری تعادل بین تولید و مصرف کمک می‌کنند. شکل (۶-۱۵) و شکل (۶-۱۶) به ترتیب توان پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی را نشان می‌دهند.



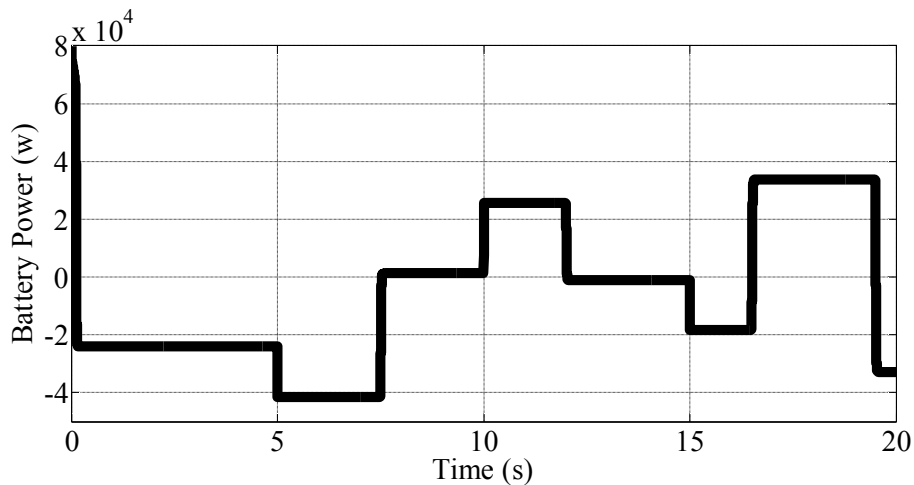
شکل (۶-۱۳) توان تولیدی توربین بادی



شکل (۶-۱۴) بار الکتریکی



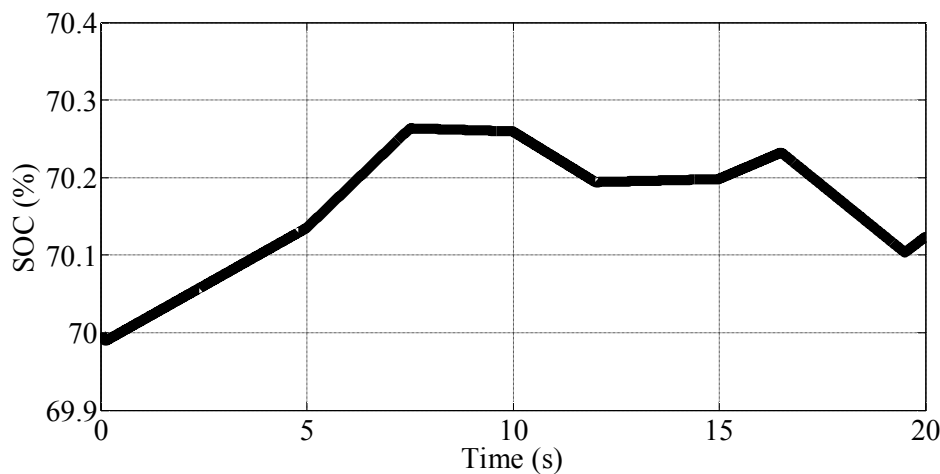
شکل (۱۵-۶) توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل کننده)



شکل (۱۶-۶) توان ذخیره ساز انرژی

با توجه به شکل‌های (۱۳-۶) و (۱۴-۶) مشاهده می‌شود که در بازه ۰ تا ۷/۵ ثانیه توان تولیدی توربین بادی بیش از توان مورد نیاز بار می‌باشد. بنابراین در این بازه توان تولیدی پیل سوختی در کمترین مقدار ممکن می‌باشد. این توان به همراه مازاد توان تولیدی توربین در درون باتری‌ها ذخیره می‌شود. در لحظه ۵ ثانیه، بار الکتریکی بر خلاف توان تولیدی توربین تغییر کرده و کاهش می‌یابد. در همین لحظه میزان توان مازاد تولیدی توسط توربین افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۱۶-۶) در همین لحظه مقدار توان شارش یافته به باتری برای جذب افزایش یافته است. همچنین در بازه ۷/۵ تا ۱۰ ثانیه، توان تولیدی توربین کمتر از بار الکتریکی می‌باشد. بنابراین مطابق شکل‌های (۱۵-۶) و (۱۶-۶)

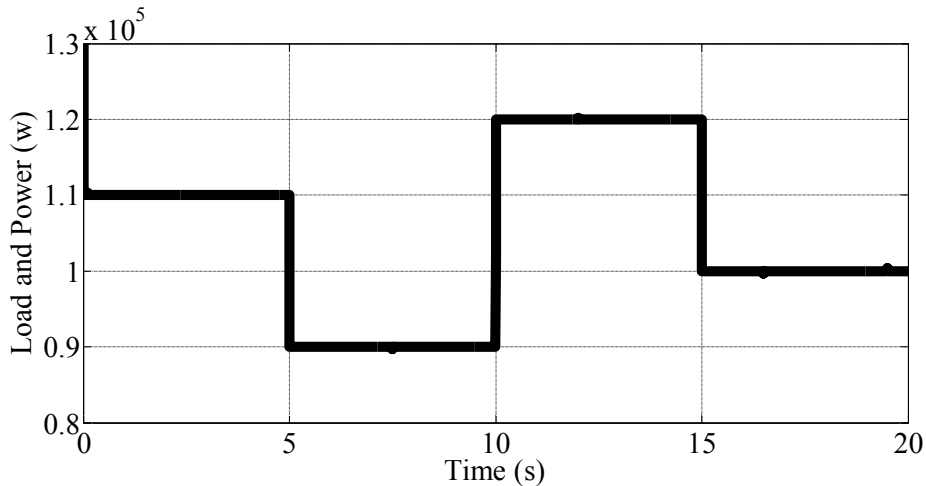
مشاهده می‌شود که در این بازه توان تولیدی پیل سوختی به اندازه مناسب افزایش می‌یابد. این افزایش توان نه تنها به اندازه‌ای است که هیچ مقدار مازادی برای ذخیره شدن در باتری‌ها باقی نمی‌ماند، بلکه خود باتری‌ها نیز در این بازه به مقدار کمی در تأمین بار مشارکت می‌نمایند. بنابراین با توجه به توضیحات فوق مشاهده می‌شود که عملکرد پیل سوختی و باتری‌ها در راستای بهره‌برداری مناسب بوده و به طور مکمل با یکدیگر و با سیستم، تبادل توان می‌کنند. همین تعامل آثار بسیار مفیدی از جمله افزایش طول عمر اجزا و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری دارد. یکی دیگر از مسائلی که باید مورد بررسی قرار گیرد بحث SOC می‌باشد. با دقت به شکل (۶-۱۷) مشاهده می‌شود که این فاکتور نیز به دقت مورد توجه قرار گرفته است.



شکل (۶-۱۷) سطح شارژ باتری‌ها (SOC)

و اما در انتها به بررسی برقراری تعادل توان تولیدی سیستم و بار الکتریکی می‌پردازیم. شکل (۶-۱۸) نشان‌دهنده مطابقت توان تولیدی سیستم و بار الکتریکی دارد.

بنابراین کنترل‌کننده طراحی شده برای این حالت نیز به درستی عمل کرده و با برقراری تعامل مناسب بین منابع به تأمین توان الکتریکی مورد تقاضا می‌پردازد.



شکل (۶-۱۸) مطابقت توان تولیدی و بار

با بررسی و دقت در نتایج این حالت، مشاهده می‌شود که سیستم مورد نظر توانایی پاسخ به انواع حالت‌های ممکن عملکردی را با دقت بالایی دارا می‌باشد. عملکرد سیستم به گونه‌ای است که در هر لحظه بهترین تصمیم را برای برقراری تعادل توان و بار و تعامل بین منابع پشتیبان می‌گیرد. حاصل این تصمیم‌گیری مناسب بهبود در بهره‌برداری از سیستم نسبت به روش‌های قبلی بکار گرفته شده می‌باشد. برای مثال در فصل اول به معرفی چند روش اعمالی بر روی سیستم‌های مشابه که شامل مراجع [۱]- [۴] می‌شود، پرداختیم. با دقت در نتایج ارائه شده در این مراجع مشاهده می‌شود که عملکرد سیستم ترکیبی و به ویژه سیستم ترکیبی پیل سوختی ذخیره ساز انرژی به گونه‌ای است که تعامل بین منابع به درستی برقرار نشده است.

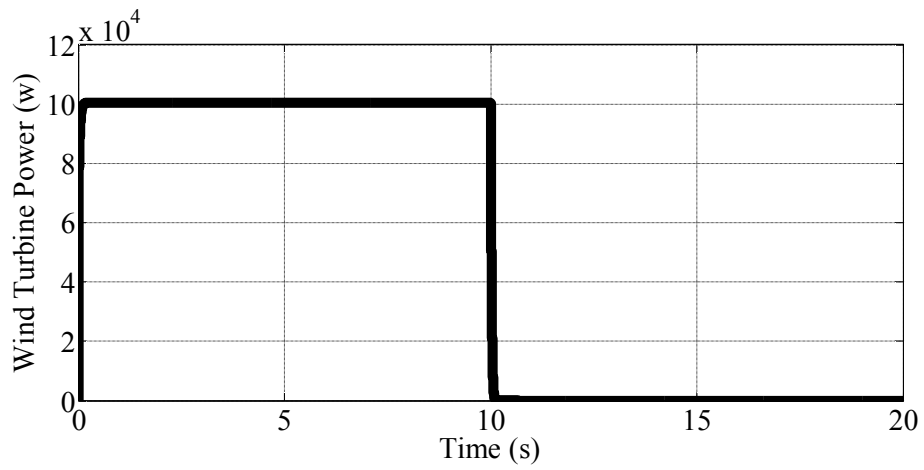
به عنوان مثال با دقت به نتایج ارائه شده در مرجع [۲] می‌توان عدم هماهنگی در عملکرد پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی را مشاهده کرد. این عدم هماهنگی به گونه‌ای است که در برخی مواقع که نیاز به افزایش توان تولیدی پیل سوختی می‌باشد، این مقدار افزایش توان بیش از مقدار مورد نیاز بوده و در برخی زمان‌ها به حد ماکزیمم ظرفیت خود شروع به تولید کرده و در این حالت توان مازاد بر توان مورد تقاضا افزایش زیادی دارد. این توان مازاد با توجه به اینکه سطح شارژ ذخیره ساز انرژی در سطح بالایی قرار دارند، در آنها ذخیره می‌شود. این بدین معناست که در این حالت بایستی پیل سوختی به

اندازه‌ای توان تولید کند که جبران کمبود توان مورد نیاز را کند و بیش از مقدار مورد نیاز توان تولید نکند. اما این مورد در نتایج این سیستم دیده نمی‌شود. این نوع عملکرد در درجه اول باعث افزایش هزینه بهره‌برداری از سیستم، به علت مصرف بالای سوخت، شده و سپس باعث کاهش طول عمر پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی می‌شود.

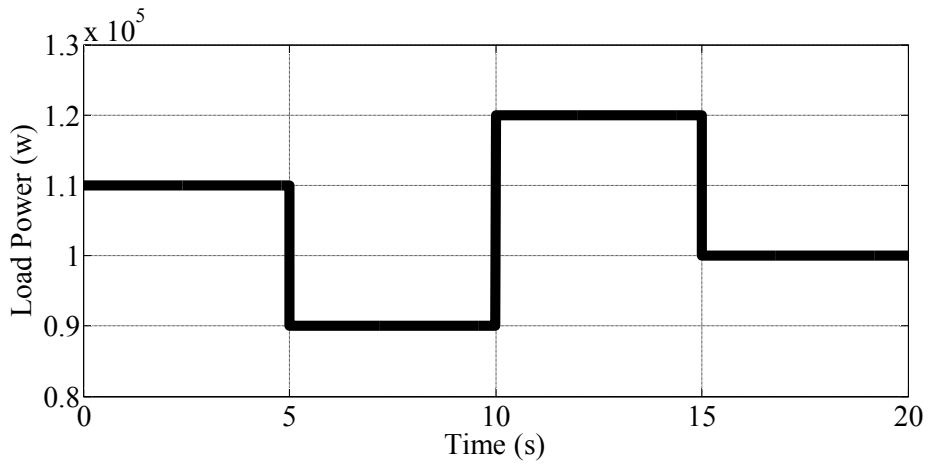
۶-۴ حالت چهارم: خروج توربین از مدار

در این حالت به بررسی خروج ناگهانی توربین بادی از مدار به واسطه افزایش سرعت باد از مقدار حد بالای سرعت مجاز برای توربین می‌پردازیم. مطابق شکل (۶-۱۹) بر اثر افزایش ناگهانی سرعت باد به بالاتر از ۲۴ متر بر ثانیه، توان تولیدی توربین به علت خروج توربین از مدار و ترمز پره‌ها به صفر کاهش می‌یابد. در این حالت به بررسی عملکرد پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی برای تأمین بار موجود در شکل (۶-۲۰) می‌پردازیم. مطابق شکل (۶-۲۰)، بار بر خلاف توان توربین نوسانات زیادی در مدت زمان ارائه‌شده دارد. انتظار می‌رود که در این شرایط به علت محدود بودن توان تولیدی پیل سوختی، ذخیره ساز انرژی حجم بیشتری از بار را بر عهده بگیرد. حال با توجه به شکل‌های فوق به بررسی عملکرد پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی می‌پردازیم.

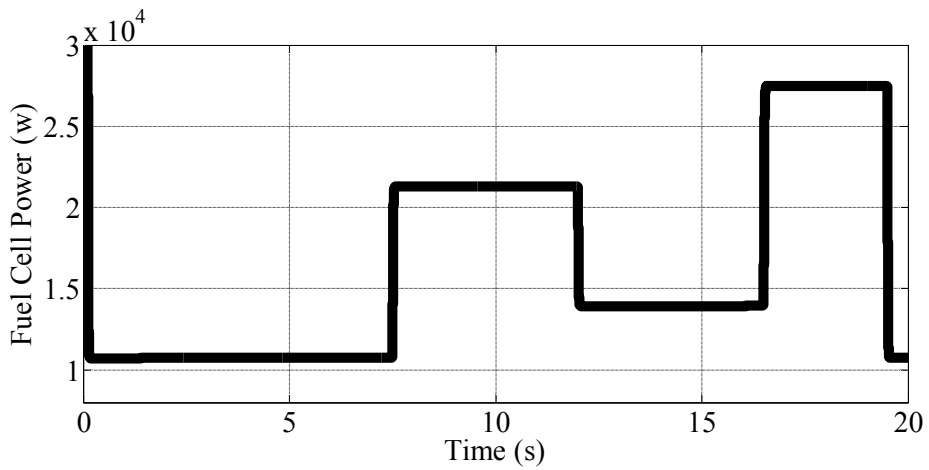
در شکل‌های (۶-۲۱) و (۶-۲۲) مشاهده می‌شود که تا قبل از خروج توربین از سیستم مطابق حالت‌های فوق که بررسی گردید، سیستم به کار خود ادامه می‌دهد. در حالتی که توربین از مدار خارج می‌شود، پیل سوختی و باتری‌ها به تأمین توان می‌پردازند. از آنجا که در هنگام طراحی و تعیین اندازه سیستم ترکیبی مورد نظر حالت قطع ناگهانی توربین بادی در نظر گرفته شده است، بنابراین از یک سیستم ذخیره ساز با قدرت بالا استفاده شده است. بنابراین در این حالت، اکثر سهم تأمین توان به عهده آن بوده و مابقی آن را پیل سوختی تأمین می‌کند.



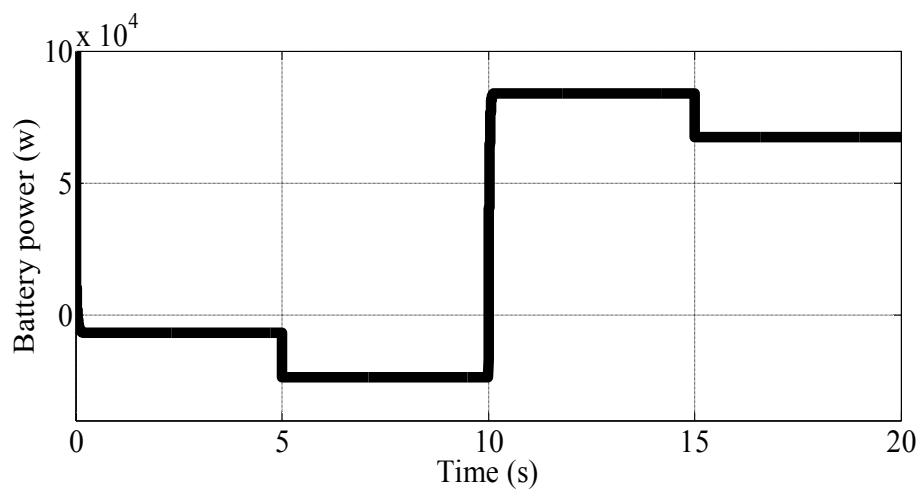
شکل (۱۹-۶) توان تولیدی توربین بادی



شکل (۲۰-۶) بار الکتریکی

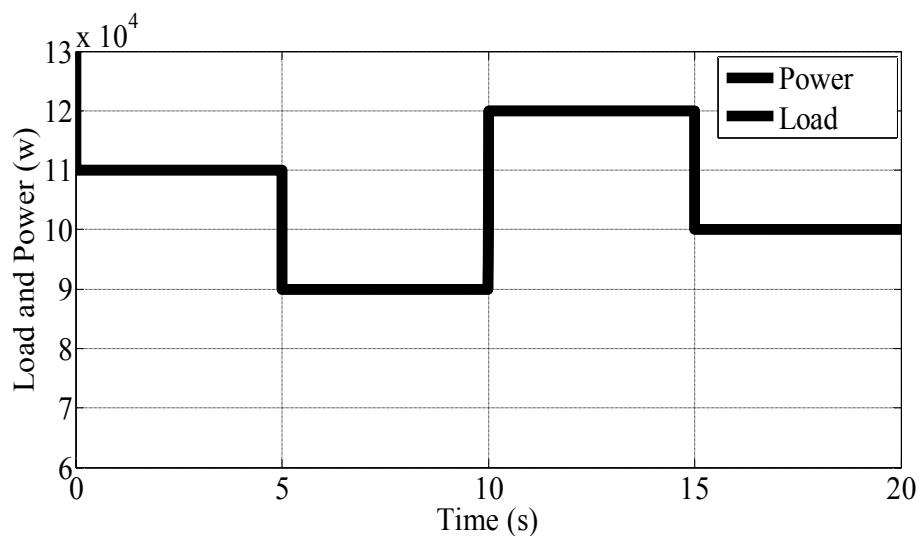


شکل (۲۱-۶) توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل کننده)



شکل (۶-۲۲) توان ذخیره ساز انرژی

با توجه به تغییرات بار سیستم، توان سیستم پشتیبان نیز در راستای تأمین بار تغییر می‌کند. در این حالت مشاهده می‌شود که مطابق شکل (۶-۲۳) بار توسط سیستم در طول بازه‌ی خروج توربین از مدار، توسط پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی تأمین می‌شود.

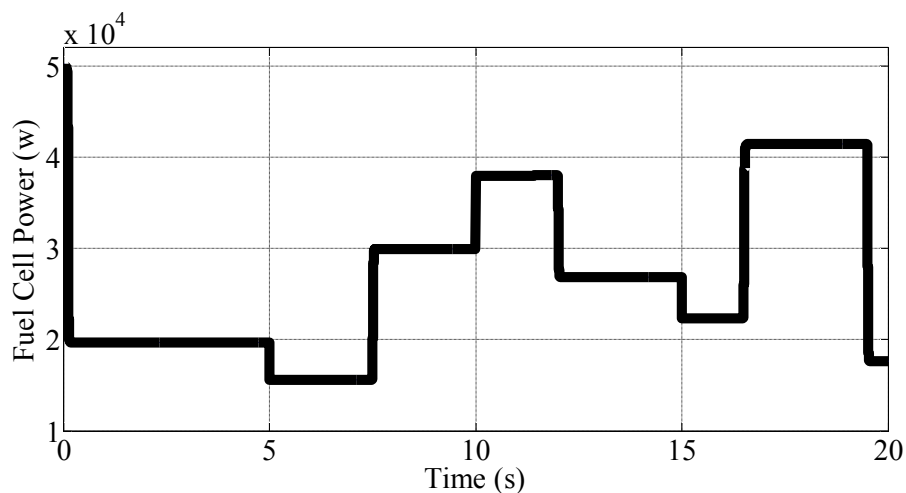


شکل (۶-۲۳) مطابقت توان تولیدی و بار

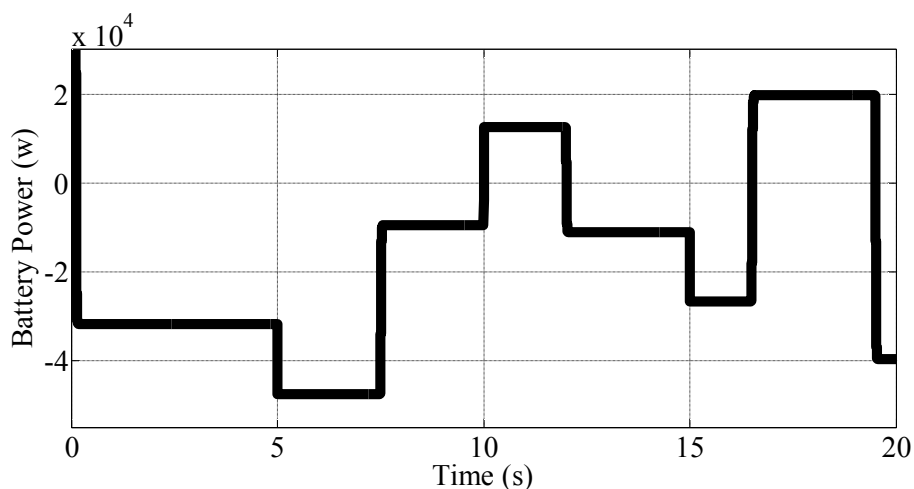
بنابراین مطابق نتایج به دست آمده سیستم به طور کامل پاسخگوی این حالت می‌باشد. البته زمانی که باتری‌ها در سطح مطلوبی از شارژ نباشند ممکن است قسمتی از بار تأمین نشود.

۵-۶ حالت پنجم: باد متغیر – بار متغیر با سطح شارژ باتری پایین

در این حالت سیستم دارای شرایط سرعت باد متغیر و بار متغیر مشابه حالت سوم می‌باشد. بنابراین توان تولیدی توربین بادی و مقدار بار در این حالت مشابه شکل‌های (۶-۱۳) و (۶-۱۴) می‌باشد. تفاوت این حالت با حالت سوم در سطح شارژ باتری‌ها می‌باشد. در حالت سوم شارژ اولیه باتری‌ها ۷۰٪ در نظر گرفته شده است؛ اما در این حالت شارژ اولیه باتری‌ها ۲۰٪ در نظر گرفته شده است. هدف در این حالت بررسی و مقایسه عملکرد سیستم پشتیبان نسبت به حالت سوم می‌باشد.

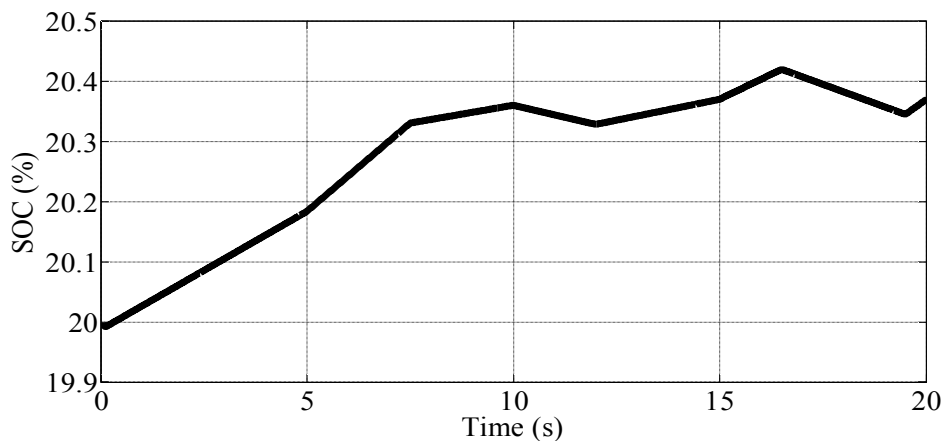


شکل (۶-۲۴) توان مرجع تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل‌کننده)

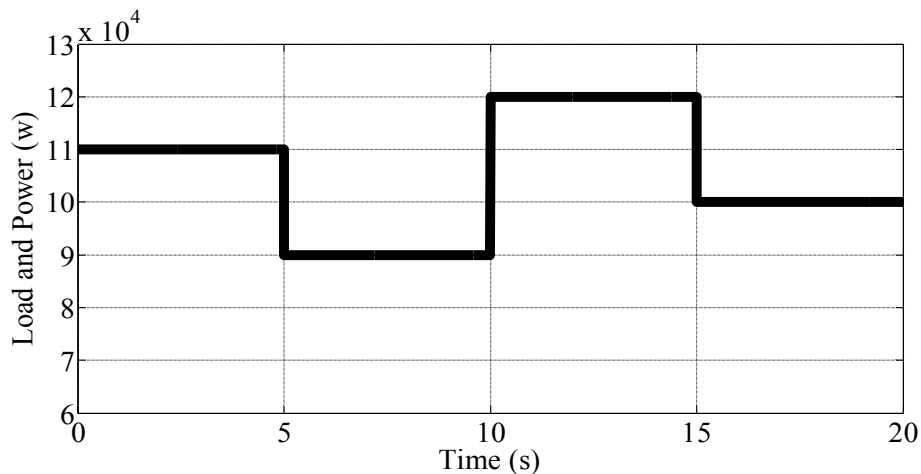


شکل (۶-۲۵) توان ذخیره ساز انرژی

در این حالت مقدار توان تولیدی پیل سوختی به صورت شکل (۶-۲۴) و توان باتری‌ها به صورت شکل (۶-۲۵) می‌باشد. با مقایسه این شکل‌ها با شکل‌های (۶-۱۵) و (۶-۱۶) مشاهده می‌شود که در این حالت به علت کاهش سطح باتری‌ها توان تولیدی پیل سوختی نسبت به حالت سوم افزایش می‌یابد و بنابراین باتری‌ها بیشتر به جذب توان می‌پردازند. همچنین با مقایسه منحنی شارژ باتری‌ها در این حالت که در شکل (۶-۲۶) نشان داده شده است با سطح شارژ باتری‌ها در حالت سوم، شکل (۶-۱۷)، مشاهده می‌شود که هم شیب شارژ باتری‌ها و هم سطح شارژ آنها نسبت به سایر حالت‌ها افزایش یافته است و این به دلیل جذب توان با چگالی بالاتر و به میزان بیشتر می‌باشد. مطابقت توان نیز در این حالت در شکل (۶-۲۷) مشاهده می‌شود.



شکل (۶-۲۶) سطح شارژ باتری‌ها (SOC)

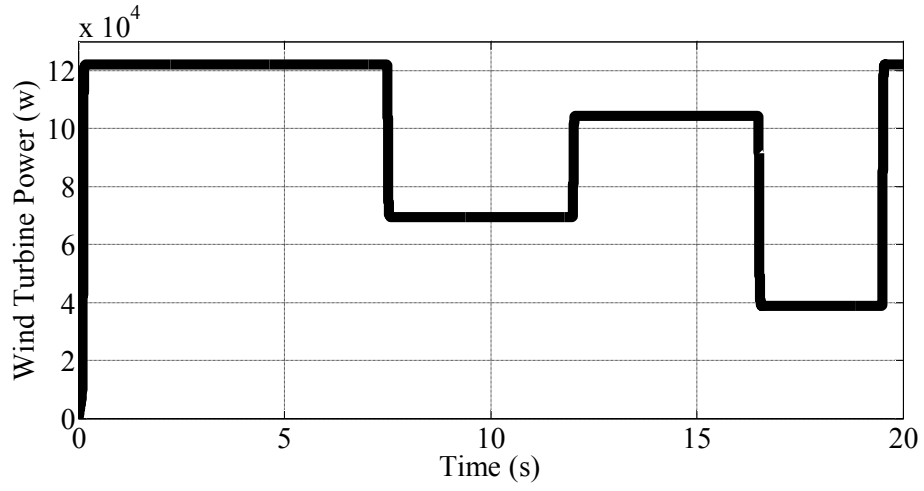


شکل (۶-۲۷) مطابقت توان تولیدی و بار

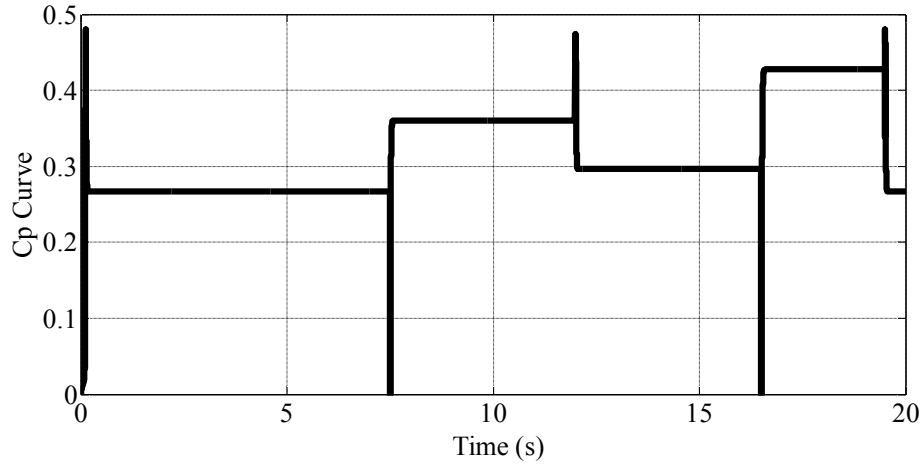
۶-۶ حالت ششم: بررسی پاسخ دینامیکی پیل سوختی

در این حالت با توجه به پاسخ کنترل‌کننده در حالت سوم، به بررسی پاسخ دینامیکی پیل سوختی و توان ذخیره ساز انرژی در تحت شرایط خروجی واقعی پیل سوختی می‌پردازیم. لازم به ذکر است از آنجا در این پایان‌نامه کنترل بر روی مبدل‌های الکترونیک قدرت صورت نگرفته است، لذا این حالت تنها برای نشان دادن دینامیک پیل سوختی می‌باشد و مطابق نتیجه این قسمت ردیابی دقیق توان مرجع پیل سوختی توسط خود پیل صورت نمی‌گیرد. دلیل این امر عدم کنترل بر روی مبدل‌های الکترونیک قدرت می‌باشد. همچنین یکی دیگر از دلایل عدم تطابق توان تولیدی پیل سوختی و توان مرجع، محدودیت در اجرای شبیه‌سازی و زمان آن می‌باشد.

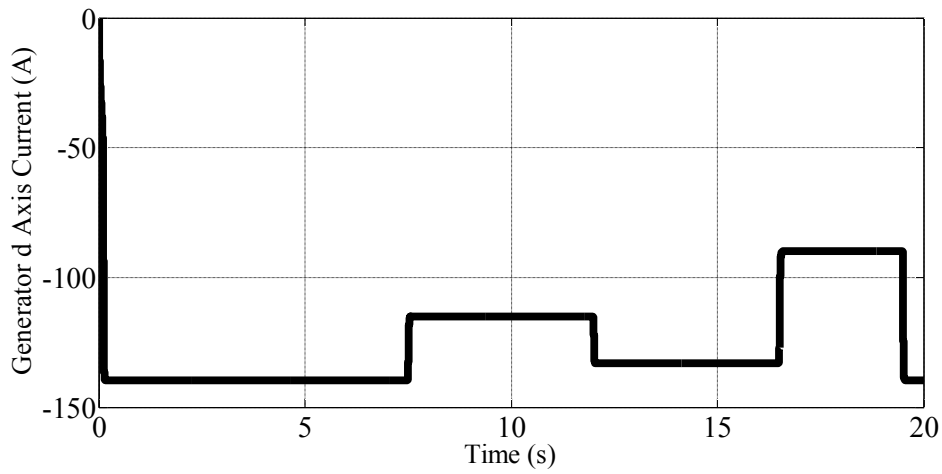
توان تولیدی توربین بادی و میزان بار و توان مرجع پیل سوختی که در شکل‌های (۶-۲۸) و (۶-۳۱) نشان داده شده است. همچنین منحنی C_p و جریان محور d ژنراتور که رابطه مستقیم با توان اکتیو تولیدی دارد، به ترتیب در شکل‌های (۶-۲۹) و (۶-۳۰) نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، پاسخ دینامیکی پیل سوختی و توان ذخیره ساز انرژی به ترتیب به صورت شکل‌های (۶-۳۲) و (۶-۳۵) می‌باشند. شکل‌های (۶-۳۳) و (۶-۳۴) به ترتیب نشان‌دهنده هیدروژن جذب‌شده توسط پیل سوختی و جریان باتری‌ها می‌باشند. هدف از ارائه این شکل‌ها در این قسمت، نشان دادن رفتار اجزاء بکار رفته در سیستم می‌باشد. سطح شارژ باتری‌ها نیز به صورت شکل (۶-۳۶) می‌باشد.



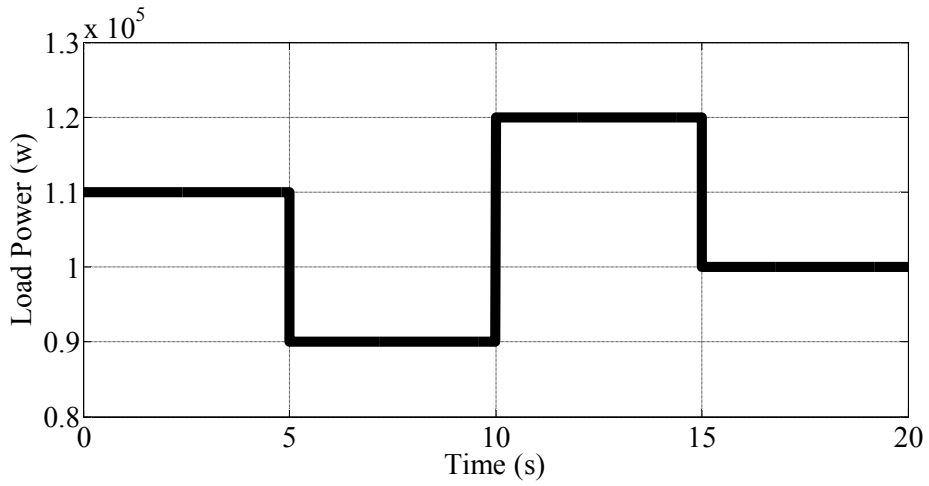
شکل (۶-۲۸) توان تولیدی توربین بادی



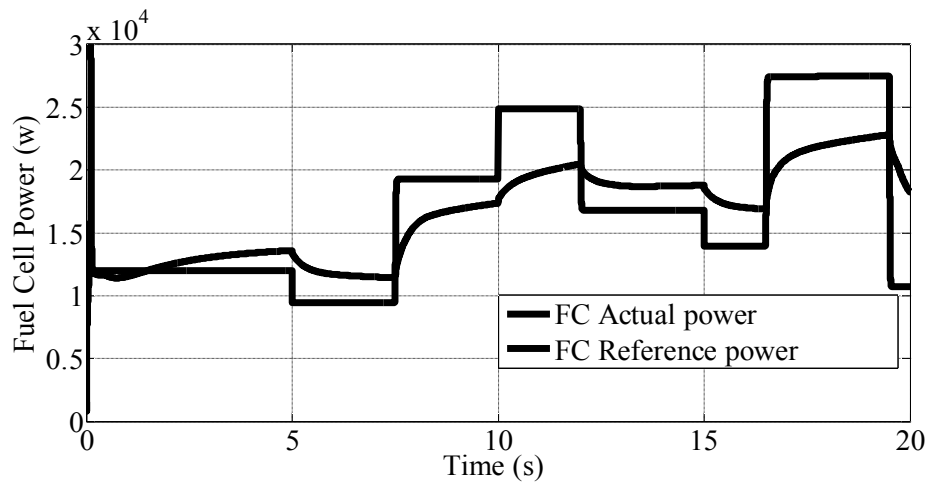
شکل (۶-۲۹) منحنی C_p توربین بادی



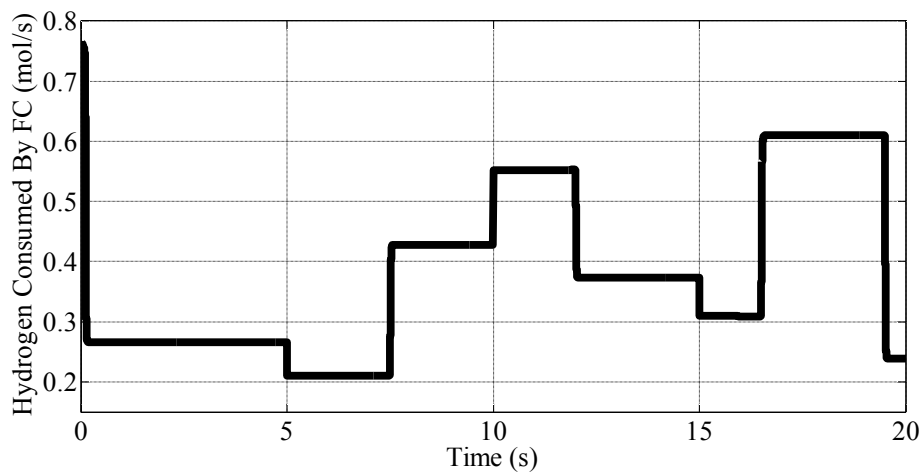
شکل (۶-۳۰) جریان محور d ژنراتور



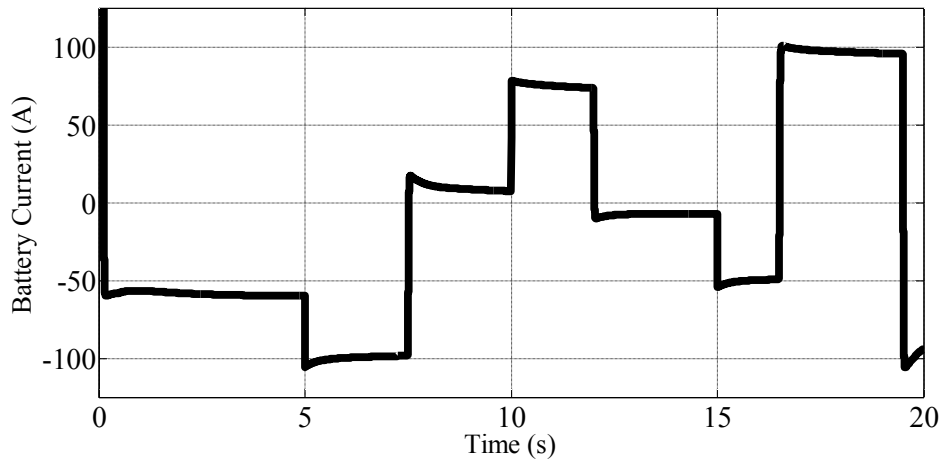
شکل (۳۱-۶) بار الکتریکی



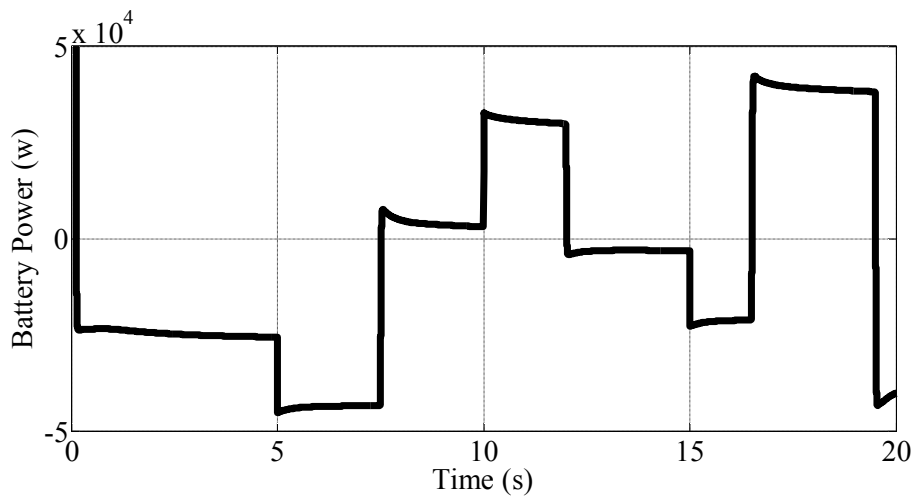
شکل (۳۲-۶) توان مرجع و توان واقعی تولیدی پیل سوختی (خروجی کنترل کننده و پیل سوختی)



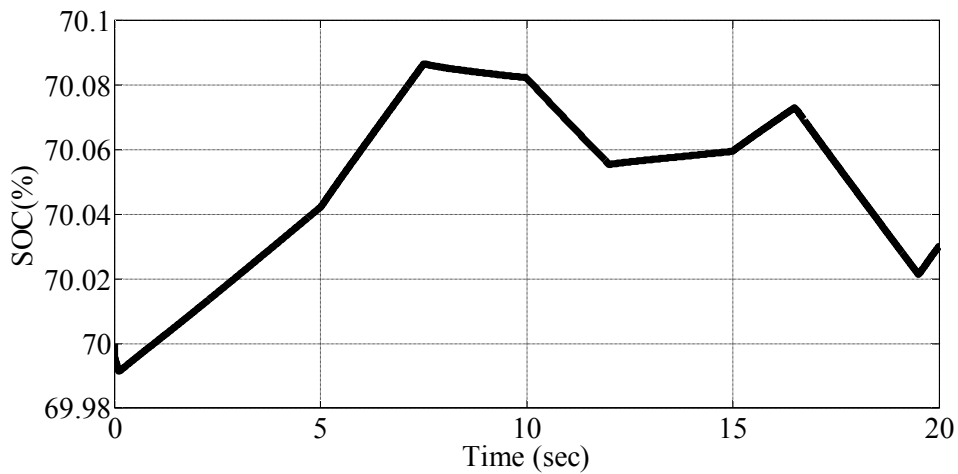
شکل (۳۳-۶) هیدروژن جذب شده توسط پیل سوختی



شکل (۳۴-۶) جریان شارژ و دشارژ باتری‌ها

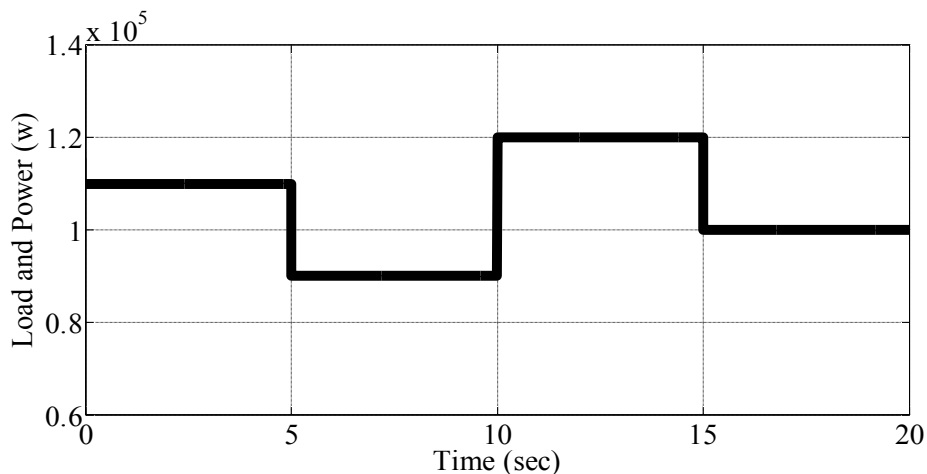


شکل (۳۵-۶) توان ذخیره ساز انرژی (باتری‌ها)



شکل (۳۶-۶) سطح شارژ باتری‌ها (SOC)

مطابق شکل (۳۲-۶) مشاهده می‌شود که پیل سوختی برای رسیدن به مقدار توان مرجع و حالت پایدار که توسط کنترل‌کننده تعیین می‌شود، به علت دینامیک کندی که دارد نیاز به زمان دارد. بنابراین ابتدا کمتر از مقدار مرجع توان تولید می‌کند و سپس به آرامی توان خود را به مقدار پایدار نزدیک می‌کند. شکل (۳۰-۶) نیز نشان‌دهنده هیدروژن جذب‌شده توسط پیل سوختی برای تولید توان الکتریکی می‌باشد. مطابق شکل (۳۵-۶) باتری‌ها در لحظه ابتدایی تغییری در توان پیل سوختی، که به علت دینامیک ذاتی پیل پس از گذشت مدت زمان معین به حالت پایدار می‌رسند، توان بیشتری به سیستم انتقال می‌دهند و رفته‌رفته که پیل توان تولیدی خود را افزایش می‌دهد، باتری‌ها توان کمتری را به سیستم انتقال می‌دهند. در واقع در لحظات ابتدایی تغییرات توان صورت گرفته در باتری‌ها، مشاهده می‌شود که باتری‌ها به صورت سوزنی عمل می‌نمایند. در صورتی که منبعی مانند باتری‌ها، که دارای چگالی بالایی می‌باشند وجود نداشته باشد، قسمتی از بار تا زمانی که توان تولیدی پیل سوختی به مقدار مرجع نرسد، تأمین نمی‌شود و بنابراین بخشی از بار از دست می‌رود و این مورد باعث کاهش ضریب اطمینان سیستم می‌شود. بنابراین نقش باتری‌ها در بالا بردن قابلیت اطمینان سیستم در این قسمت به وضوح دیده می‌شود. مطابق موارد ذکرشده، در شکل (۳۶-۶) مشاهده می‌شود که باتری‌ها در ابتدا با شیب بیشتری شارژ یا دشارژ می‌شوند و رفته‌رفته شیب آنها کاهش می‌یابد. مطابقت توان نیز در شکل (۳۷-۶) نشان داده شده است که بر اساس آن توان سیستم مطابقت کامل با بار سیستم دارد.



شکل (۳۷-۶) مطابقت توان تولیدی و بار

خلاصه فصل ششم:

در این فصل با توجه به ۶ حالت فوق که نتایج آن به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت پی می‌بریم که کنترل‌کننده مورد نظر برای تمامی حالات و همچنین برای شرایط واقعی سیستم بهترین پاسخ را به همراه کمترین تداخل بین عملکرد سیستم‌های پشتیبان ارائه می‌دهد. بنابراین سیستم فوق تحت کنترل‌کننده ارائه‌شده می‌تواند به طور عملی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

لازم به ذکر است که با توجه به عدم کنترل دقیق بر روی مبدل‌ها نتایج حالت ششم صرفاً برای نشان دادن رفتار دینامیکی سیستم بوده و همچنین تعامل مناسب بین پیل سوختی و باتری‌ها می‌باشد. با توجه به نتایج این بخش به ضرورت وجود سیستم پشتیبان با چگالی توان بالا برای پیل سوختی پی می‌بریم. البته با این وجود باز هم شاهد مطابقت توان تولیدی و بار سیستم می‌باشیم.

فصل ہفتم

نتیجہ گیری و پیشہ اداات

۷-۱ نتیجه گیری

همان طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، افزایش جمعیت در جهان باعث افزایش نیاز به انرژی برای مصارف صنعتی، خانگی و ... را در پی دارد. متداول‌ترین راه برای تولید انرژی در جهان استفاده از سوخت‌های فسیلی و انرژی اتمی می‌باشد. از طرفی مسائل مختلفی مانند محدود بودن این منابع و مهم‌تر از آن آلودگی‌های ناشی از این منابع، نیاز به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را بیش از پیش ضروری کرده است. از جمله این انرژی‌های پاک و در دسترس می‌توان به انرژی بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی، بیومس و ... اشاره نمود. این منابع علاوه بر عدم آلاینده‌گی همواره قابل‌دسترسی و موجود می‌باشند.

علاوه بر موارد فوق، نیاز به ایجاد منابع تولید پراکنده دلایل گوناگون از جمله ارزان‌تر بودن نسبت به احداث شبکه و همچنین سهولت بهره‌برداری در حال افزایش می‌باشد. از منابع تجدیدپذیر انرژی، که در بالا به چند مورد از آنها اشاره کردیم، با توجه به مزایای آنها می‌توان به عنوان منابع تولید انرژی در منابع تولید پراکنده استفاده نمود.

در بهره‌برداری از سیستم‌های تولید توان، مهم‌ترین موردی که باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد، مبحث امنیت سیستم و قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد. از آنجا که منابع فوق به میزان معین در هر لحظه وجود ندارد، لذا بهره‌برداری از این منابع به تنهایی برای تأمین بار سیستم مورد نظر از نظر قابلیت اطمینان مناسب نمی‌باشند. به عنوان مثال در سیستم تولید توان بادی به علت نوسانات سرعت باد توان تولیدی توربین بادی نیز دچار تغییرات خواهد شد و به همین دلیل در برخی موقع ممکن است به علت تولید توان کمتر نسبت به بار، بخشی از بار از دست برود و تأمین نشود. لذا این موضوع می‌تواند باعث آسیب رسیدن به سیستم و زیان اقتصادی بشود. همچنین در سیستم تولید توان خورشیدی نیز به همین صورت می‌باشد.

برای رفع مشکل فوق می‌توان از ترکیب این منابع و یا استفاده از منابع پشتیبان در کنار این منابع استفاده نمود. این کار باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم تولید توان می‌شود.

در این پایان‌نامه سیستم تولید توان پراکنده ترکیبی شامل توربین بادی/ پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار HOMER به تعیین اندازه بهینه هر یک از منابع پرداختیم. سپس استراتژی کنترلی مناسبی برای کنترل‌کننده فازی بکار رفته برای این سیستم تعیین کردیم. این استراتژی در مرحله اول با هدف بهره‌برداری بهینه از منابع موجود در سیستم فوق صورت گرفته است. این بهره‌برداری به گونه‌ای است که در آن هر یک از منابع سیستم با یکدیگر تعامل داشته و با همکاری یکدیگر به تأمین بار مورد نظر می‌پردازند. آنچه در این میان مهم می‌باشد، عملکرد سیستم پشتیبان، شامل پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی، می‌باشد.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی سیستم که در شش حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت، مشاهده گردید که در عملکرد این دو منبع تداخلی وجود ندارد. این بدین معنی است که پیل سوختی در هر لحظه تنها به اندازه مورد نیاز توان تولید می‌کند و از تولید بیش از اندازه توان جلوگیری می‌کند. همین موضوع باعث بهره‌برداری بهینه از سیستم فوق می‌باشد. زیرا در این سیستم هزینه بهره‌برداری از سیستم، مربوط به هزینه سوخت مورد نیاز برای پیل سوختی می‌باشد. در صورتی که از این منبع بهره‌برداری بهینه صورت گیرد، بدین معنی است که به اندازه مورد نیاز سوخت مصرف شده است و از مصرف بیش از اندازه مورد نیاز پیل جلوگیری شده است. همین مورد، باعث برتری این کنترل‌کننده نسبت به سایر کنترل‌کننده‌هایی که بر روی این نوع سیستم‌ها پیاده شده‌اند، می‌باشد.

با بررسی نتایج صورت گرفته بر روی این سیستم در حالات مختلف، مشاهده می‌شود که اهداف مورد نظر در این سیستم که قبلاً به آنها اشاره نمودیم، تحقق یافته است. از مهم‌ترین این اهداف علاوه بر مورد فوق که تعامل بین منابع پشتیبان می‌باشد، تأمین توان مورد نیاز سیستم و تطابق توان تولیدی سیستم با توان مورد تقاضا می‌باشد. با بررسی نتایج حاصل مشاهده می‌شود که این مورد نیز به درستی

و با دقت بسیار بالا صورت گرفته است و در هیچ حالتی حتی بخش کوچکی از بار نیز از دست نرفته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سیستم از نظر قابلیت تأمین بار شرایط بسیار مطلوبی دارد.

در مجموع کنترل‌کننده مورد استفاده و طراحی شده از نظر عملکرد، در بهترین حالت خود قرار دارد.

با توجه به مطالعات صورت گرفته می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از سیستم تولید توان با منابع تجدیدپذیر انرژی به منظور تأمین بار معین (سیستم تولید پراکنده) به صورت ترکیبی، باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم تولید توان پراکنده می‌شود. همچنین کنترل‌کننده مورد استفاده و طراحی شده برای این نوع سیستم‌ها نقش بسیار مهمی در تعیین بهره‌برداری مناسب از سیستم ترکیبی دارند.

۷-۲ پیشنهادات:

- با توجه به گستردگی سیستم مورد مطالعه، موارد ذیل برای ادامه این موضوع پیشنهاد می‌گردد:
۱. کنترل میدل‌های الکترونیک قدرت در سیستم تولید توان ترکیبی بادی- پیل سوختی و ذخیره ساز انرژی با هدف بهره‌برداری از سیستم تحت مدیریت توان ارائه شده در این پایان‌نامه.
 ۲. بررسی عملکرد سیستم مطالعه شده در حالت اتصال به شبکه.
 ۳. بررسی سیستم تولید توان ترکیبی خورشیدی- پیل سوختی و ذخیره‌ساز انرژی با هدف مدیریت توان بهینه.
 ۴. امکان‌سنجی اقتصادی سیستم تولید توان ترکیبی بادی/ پیل سوختی/ ذخیره ساز انرژی.

پیوست‌ها

پیوست ۱: سیستم های فازی و کنترل فازی

دانش مورد نیاز برای بسیاری از مسائل مورد مطالعه به دو صورت متمایز ظاهر می شود:

۱. دانش عینی مثل مدل ها، و معادلات، و فرمول های ریاضی که از پیش تنظیم شده و برای حل و فصل مسائل معمولی فیزیک، شیمی، یا مهندسی مورد استفاده قرار می گیرند.

۲. دانش شخصی مثل دانستنی هایی که تا حدودی قابل توصیف و بیان زبان شناختی بوده، ولی، امکان کمی کردن آن ها با کمک ریاضیات سنتی معمولاً وجود ندارد. به این نوع دانش، دانش ضمنی یا دانش تلویحی (Tacit knowledge) گفته می شود.

از آن جا که در عمل هر دو نوع دانش مورد نیاز است منطق فازی می کوشد آن ها را به صورتی منظم، منطقی و ریاضیاتی با یکدیگر هماهنگ گرداند.

منطق فازی از جمله منطق های چند ارزشی بوده، و بر نظریه مجموعه های فازی تکیه می کند. مجموعه های فازی خود از تعمیم و گسترش مجموعه های قطعی به صورتی طبیعی حاصل می آیند.

برای مقابله مؤثر با پیچیدگی روزافزون در بررسی، مطالعه، مدل سازی و حل مسائل جدید در فیزیک، مهندسی، پزشکی، زیست شناسی و بسیاری از امور گوناگون دیگر ایجاد و ابداع روش های محاسباتی جدیدی مورد نیاز است که بیش از پیش به شیوه های تفکر و تعلم خود انسان نزدیک باشد. هدف اصلی آن است که تا حد امکان، رایانه ها بتوانند مسائل و مشکلات بسیار پیچیده علمی را با همان سهولت و شیوایی بررسی و حل و فصل کنند که ذهن انسان قادر به ادراک و اخذ تصمیمات سریع و مناسب است.

در جهان واقعیات، بسیاری از مفاهیم را آدمی به صورت فازی (به معنای غیر دقیق، نا واضح و مبهم) درک می کند و به کار می بندد. به عنوان نمونه، هر چند کلمات و مفاهیمی همچون گرم، سرد، بلند، کوتاه، پیر، جوان و نظیر این ها به عدد خاص و دقیقی اشاره ندارند، اما ذهن انسان با سرعت و با

انعطاف‌پذیری شگفت‌آوری همه را می‌فهمد و در تصمیمات و نتیجه‌گیری‌های خود به کار می‌گیرد. این در حالی است که ماشین فقط اعداد را می‌فهمد و اهل دقت است. اهداف شیوه‌های نو در علوم کامپیوتر آن است که اولاً رمز و راز این‌گونه توانایی‌ها را از انسان بیاموزد و سپس آن‌ها را تا حد امکان به ماشین یاد بدهد.

قوانین علمی گذشته در فیزیک و مکانیک نیوتونی همه بر اساس منطق قدیم استوار گردیده‌اند. در منطق قدیم فقط دو حالت داریم: سفید و سیاه، آری و خیر، روشن و تاریک، یک و صفر و درست و غلط.

متغیرها در طبیعت یا در محاسبات بر دو نوع‌اند: ارزش‌های کمی که می‌توان با یک عدد معین بیان نمود و ارزش‌های کیفی که بر اساس یک ویژگی بیان می‌شود. این دو ارزش قابل تبدیل‌اند. مثلاً در مورد قد افراد، اگر آن‌ها با ارزش عددی (سانتی‌متر) اندازه‌گیری نماییم و افراد را به دسته‌های قد کوتاه و قد بلند تقسیم‌بندی کنیم و در این دسته‌بندی، حد آستانه ۱۸۰ سانتی‌متر برای بلندی قد مدنظر باشد، در این صورت تمامی افراد زیر ۱۸۰ سانتی‌متر براساس منطق قدیم قد کوتاه‌اند. حتی اگر قد فرد ۱۷۹ سانتی‌متر باشد. ولی در مجموعه فازی هر یک از این صفات بر اساس تابع عضویت تعریف و بین صفر تا یک ارزش‌گذاری می‌شوند.

از آن جا که ذهن ما با منطق دیگری کارهایش را انجام می‌دهد و تصمیماتش را اتخاذ می‌کند، جهت شروع، ایجاد و ابداع منطق‌های تازه و چند ارزشی مورد نیاز است که منطق فازی یکی از آن‌ها می‌باشد.

واژه فازی در لغت به معنای مبهم و گنگ می‌باشد. اگرچه سیستم‌های فازی پدیده‌های غیرقطعی و نامشخص را توصیف می‌کنند، با این حال خود تئوری فازی یک تعریف دقیق می‌باشد. سیستم‌های

فازی، سیستم های مبتنی بر دانش یا قواعد^{۱۴} می باشند. قلب یک سیستم فازی، پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر- آنگاه تشکیل شده است. یک قاعده اگر - آنگاه فازی یک عبارت اگر- آنگاه بوده که بعضی از کلمات آن به وسیله تابع عضویت پیوسته مشخص شده اند. به عنوان مثال عبارت فازی ذیل را در نظر بگیرید:

اگر سرعت اتومبیل بالا است، آنگاه نیروی کمتری به پدال گاز وارد کنید.

در عبارت فوق ، کلمات کم و بالا ، متغیرهای زبانی^{۱۵} هستند . در صحبت های عامیانه، اگر یک متغیر بتواند واژه هایی از زبان طبیعی را به عنوان مقدار بپذیرد، یک متغیر زبانی نامیده می شود.

در سیستم های عملی اطلاعات مهم از دو منبع سرچشمه می گیرند. یکی از منابع مهم افراد خبره می باشند که دانش و آگاهی شان را در مورد سیستم با زبان طبیعی توصیف می کنند. منبع دیگر اندازه گیری ها و مدل های ریاضی هستند که از قواعد فیزیکی مشتق شده اند. بنابراین یک مسئله مهم ترکیب این دو نوع اطلاعات در طراحی سیستم ها است. برای انجام این ترکیب سوال کلیدی این است که چگونه می توان دانش بشری را در چهارچوبی مشابه مدل های ریاضی فرموله کرد. به عبارت دیگر سوال اساسی این است که چگونه می توان دانش بشری را به یک فرمول ریاضی تبدیل کرد. اساساً آنچه که یک سیستم فازی انجام می دهد، همین تبدیل است. برای اینکه بدانیم این تبدیل چگونه صورت می گیرد، ابتدا باید بدانیم سیستم های فازی چگونه سیستم هایی هستند.

همان طور که قبلاً ذکر شد، سیستم های فازی، سیستم های مبتنی بر دانش یا قواعد می باشند. قلب یک سیستم فازی یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر - آنگاه فازی تشکیل شده است. یک قاعده اگر- آنگاه فازی یک عبارت اگر- آنگاه بوده که بعضی کلمات آن به وسیله توابع تعلق پیوسته

^{۱۴} Rule base

^{۱۵} Linguistic Variables

مشخص شده‌اند. بنابراین نقطه شروع ساخت یک سیستم فازی به دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر و آنگاه فازی می‌باشد. مرحله بعدی ترکیب این قواعد در یک سیستم واحد می‌باشد.

صفت عدم قطعیت، به صورت گوناگون در همه زمینه‌ها و پدیده‌ها صرف‌نظر از روش‌شناسی مورد کاربرد جهت مطالعه، طراحی، و کنترل پدیدار می‌شود.

مفاهیم نادقیق بسیاری در پیرامون ما وجود دارند که آن‌ها را به صورت روزمره در قالب عبارت‌های مختلف بیان می‌کنیم. به عنوان مثال: «هوا خوب است.» هیچ کمیتی برای خوب بودن هوا مطرح نیست تا آن را به طور دقیق اندازه‌گیری نماییم، بلکه این یک حس کیفی است. در واقع مغز انسان با در نظر گرفتن عوامل گوناگون و بر پایه تفکر استنتاجی جملات را تعریف و ارزش‌گذاری می‌نماید که الگوبندی آن‌ها به زبان و فرمول‌های ریاضی اگر غیرممکن نباشد، کاری بسیار پیچیده خواهد بود. منطق فازی فناوری جدیدی است که شیوه‌هایی را که برای طراحی و مدل‌سازی یک سیستم نیازمند ریاضیات پیچیده و پیشرفته است، با استفاده از مقادیر زبانی و دانش فرد خبره جایگزین می‌سازد.

به طور کلی مزایای منطق فازی را می‌توان به صورت ذیل بیان نمود:

- منطق فازی برای فهمیدن ساده است.
- منطق فازی انعطاف‌پذیر است.
- منطق فازی تحمل اطلاعات غیر دقیق را دارد.
- منطق فازی می‌تواند اعمال پیچیده اختیاری غیرخطی را مدل کند.
- منطق فازی می‌تواند بر روی قله تجربیات خبرگان بنا شود.
- منطق فازی می‌تواند با تکنیک‌های کنترلی شرطی مخلوط شود.

• منطق فازی بر اساس زبان ساده محاوره‌ای است.

شاید آخرین جمله مهم‌ترین و نیازمند بحث بیشتری باشد. زبان معمولی و محاوره‌ای که توسط مردم عادی روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرد، در طی هزاران سال تاریخ بشری شکل گرفته است و بسیار ساده و کارساز بوده و برای ارتباطات مکفی می‌باشد. ما معمولاً از این امر آگاه نمی‌باشیم، زیرا این زبان را هر روز مورد استفاده قرار می‌دهیم. از آنجا که منطق فازی بر اساس تعاریف کیفی که روزانه مورد استفاده قرار می‌دهیم پایه‌ریزی شده است، برای استفاده بسیار ساده می‌باشد.

معمولاً سه نوع سیستم فازی صحبت به میان می‌آید:

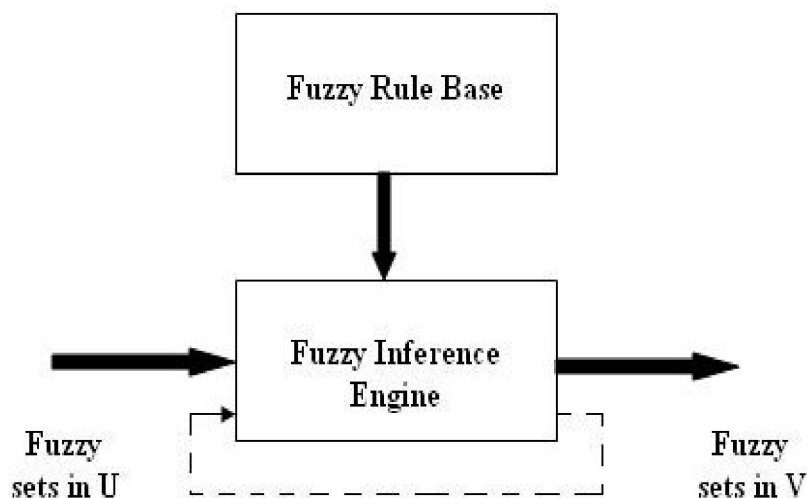
(۱) سیستم‌های فازی خالص

(۲) سیستم‌های فازی تاکاگی - سوگنو و کانگ (TSK)

(۳) سیستم‌های با فازی ساز و غیر فازی ساز

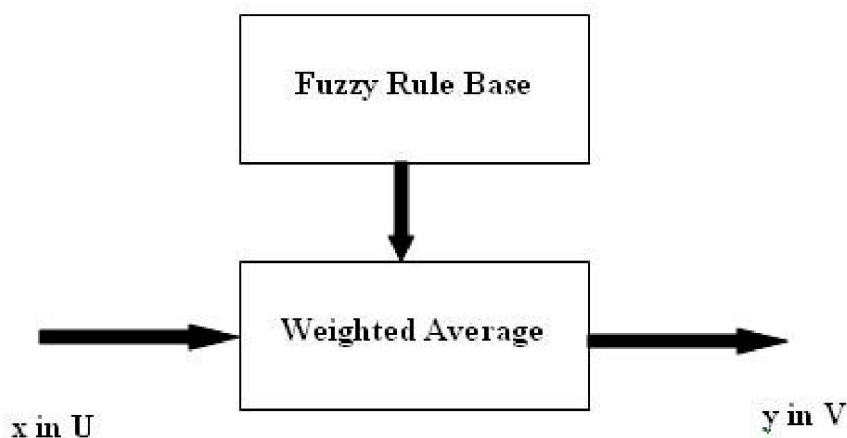
سیستم فازی خالص مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه فازی است و موتور استنتاج فازی این قواعد را به یک نداشت از مجموعه‌های فازی در فضای ورودی به مجموعه‌های فازی در فضای خروجی بر اساس اصول منطق فازی ترکیب می‌کند.

ساختار اصلی یک سیستم فازی خالص در شکل (پ-۱) نشان داده شده است. پایگاه قواعد فازی مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه را نشان می‌دهد. موتور استنتاج فازی این قواعد را به یک نداشت از مجموعه‌های فازی در فضای ورودی به مجموعه‌های فازی در فضای خروجی بر اساس اصول منطق فازی ترکیب می‌کند. در شکل (پ-۱) اگر خط نقطه‌چین وجود داشته باشد، چنین سیستمی سیستمی فازی دینامیک نامیده می‌شود.



شکل (پ-۱) ساختار یک سیستم فازی خالص

مشکل اصلی در رابطه با سیستم های فازی خالص این است که ورودی ها و خروجی های آن مجموعه های فازی می باشند. در حالی که در سیستم های مهندسی، ورودی ها و خروجی ها با متغیرهایی با مقادیر حقیقی می باشند. برای حل این مشکل، تاکاگی- سوگنو و کانگ نوع دیگری سیستم های فازی معرفی کرده اند که ورودی ها و خروجی های آن متغیرهایی با مقادیر واقعی هستند. شکل (پ-۲) ساختار اصلی سیستم فازی TSK را نشان می دهد.



شکل (پ-۲) ساختار اصلی سیستم فازی TSK

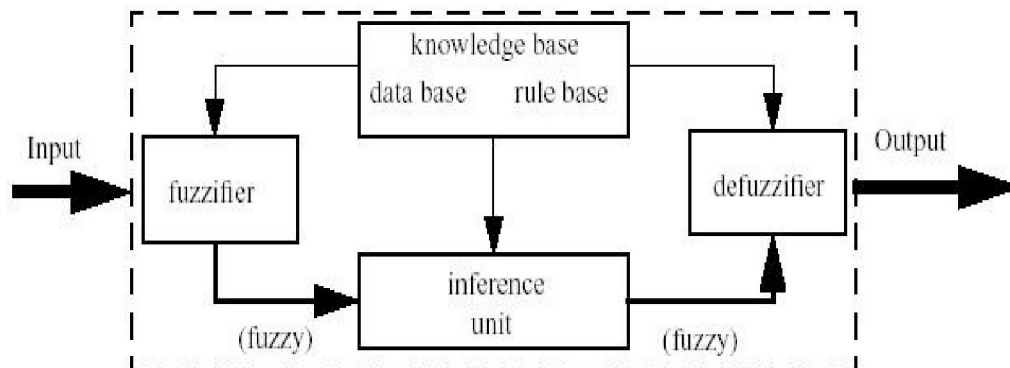
به عنوان نمونه، قانون ذیل مثالی از این قواعد مربوط به این سیستم می باشد.

اگر سرعت اتومبیل (x) بالاست، آنگاه نیروی وارد بر پدال گاز برابر است با $y=cx$.

عبارت فوق نشان می‌دهد که بخش آنگاه قاعده فازی از یک عبارت توصیفی با مقادیر زبانی به یک رابطه ریاضی ساده تبدیل شده است. این تغییر، ترکیب قواعد فازی را ساده‌تر می‌سازد. در حقیقت سیستم فازی TSK یک میانگین وزنی از مقادیر بخش‌های آنگاه قواعد می‌باشد.

مشکلات عمده سیستم فازی TSK عبارت‌اند از : (۱) بخش آنگاه قاعده یک فرمول ریاضی بوده و بنابراین چهارچوبی را برای نمایش دانش بشری فراهم نمی‌کند. (۲) این سیستم دست ما را برای اعمال اصول مختلف منطق فازی باز نمی‌گذارد و در نتیجه انعطاف‌پذیری سیستم‌های فازی در این ساختار وجود ندارد، برای حل این مشکلات ما از نوع سومی از سیستم‌های فازی یعنی سیستم‌های فازی سازها و غیرفازی سازها استفاده می‌کنیم.

به منظور استفاده از سیستم‌های فازی خالص در سیستم‌های مهندسی، یک روش ساده اضافه کردن یک فازی ساز در ورودی که متغیرهایی با مقادیر حقیقی را به یک مجموعه فازی تبدیل کرده و یک غیر فازی ساز که یک مجموعه فازی را به یک متغیر با مقدار حقیقی در خروجی تبدیل می‌کند. شکل (پ-۳) ساختار اصلی یک سیستم فازی با فازی ساز و غیر فازی ساز را نشان می‌دهد. با توجه به شکل چهار مرحله قابل تفکیک است.

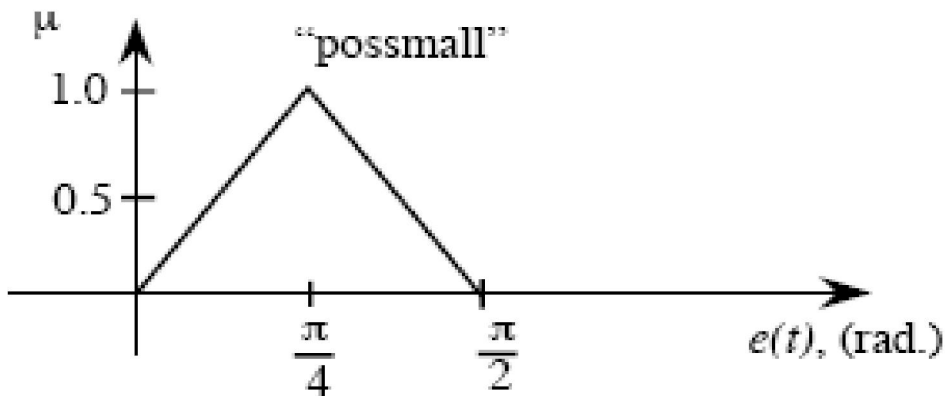


شکل (پ-۳) ساختار اصلی یک سیستم فازی با فازی ساز و غیر فازی ساز

الف) مشابه هر سیستم کنترلی، ناچار به اخذ اطلاعات از سیستم کنترل هستیم. این اطلاعات شامل مقادیری است که توسط واحد تصمیم‌گیری فازی مورد نیاز است.

ب) در مرحله فازی کردن، اطلاعات اخذشده به عنوان ورودی به واحد تصمیم‌گیری بایستی فازی شود. که در این رابطه به هر مقدار عددی یا فازی یک یا چند مجموعه فازی با درجه خاصی از عضویت نسبت داده می‌شود.

برای مقداردهی به متغیرهای زبانی از توابع عضویت استفاده می‌گردد. برای مثال شکل (پ-۴) تابع عضویت μ را بر حسب $e(t)$ نشان می‌دهد.



شکل (پ-۴) تابع عضویت μ را بر حسب $e(t)$ نشان می‌دهد.

در واقع شکل (پ-۴) برای مقداردهی به متغیر زبانی (possmall) بکار رفته است. برای فهم این موضوع به عبارات زیر توجه نمایید:

اگر $e(t) = -\pi/2$ باشد در این صورت $\mu(-\pi/2) = 0$ است.

اگر $e(t) = \pi/8$ باشد، در این صورت $\mu(\pi/8) = 0.5$ است.

در واقع تابع عضویت، درجه عضویت هر یک از متغیرهای زبانی را به صورت پیوسته نشان می‌دهد. در حالت کلی اگر X یک مجموعه جهانی و A یک مجموعه فازی باشد، برای هر مقدار $x \in X$ ، تابع

$\mu A(x)$ به عنوان تابع عضویت می‌باشد و هر عضو X را بین ۰ و ۱ مقداردهی می‌کند. در جعبه‌ابزار Fuzzy در نرم‌افزار Matlab، ۱۱ نوع تابع عضویت وجود دارد.

ج) در مرحله تصمیم‌گیری یا استنتاج^{۱۶}، کمیت فازی شده از یک مجموعه قوانین با ساختار کنترلی زیر عبور می‌کند:

If x_1 is A_{11} and (or) x_2 is A_{12} ... and (or) x_n is A_{1n} then y_1 is B_{11} ... and (or) y_m is B_{1m} .
...
If x_r is A_{r1} and (or) x_2 is A_{r2} ... and (or) x_n is A_{rn} then y_1 is B_{r1} ... and (or) y_m is B_{rm} .
B_{rm}.

در اینجا x_1, x_2, \dots, x_n متغیرهای زبانی ورودی و y_1, y_2, \dots, y_m متغیرهای زبانی خروجی واحد تصمیم‌گیری هستند. مقادیر A_{ij} و B_{ij} زیر مجموعه‌های فازی و نشان‌دهنده ارزش متغیرها هستند. در واقع قوانین $1 \dots r$ قوانینی هستند که باتجربه و یا مدل سیستم پایه‌گذاری شده‌اند و بر اساس A_{ij} ها که شرایط موجود در سیستم هستند، تصمیم‌گیری می‌شوند. این تصمیم‌گیری بر اساس درجات عضویت سیگنال ورودی در زیرمجموعه‌های A_{ij} صورت می‌گیرد و لذا نوع خروجی را مشخص می‌کند. البته برای این منظور از قاعده‌های استنتاج استفاده شده است.

د) برای اعمال کنترل به سیستم، ناچار به تبدیل کمیت‌های فازی به دست آمده به کمیت‌های اصلی هستیم. در اکثر موارد روش‌هایی نیاز است تا مقداری به عنوان کمیت قطعی خروجی انتخاب شود، بطوریکه به بهترین نحو نمایشگر مجموعه‌های عضویت خروجی باشند. به این روش‌ها، فازی زدایی^{۱۷} گفته می‌شود. اصولاً روش‌های متفاوتی برای فازی زدایی وجود دارد که در اینجا به دو نمونه که در این پایان‌نامه استفاده شده، اشاره می‌کنیم.

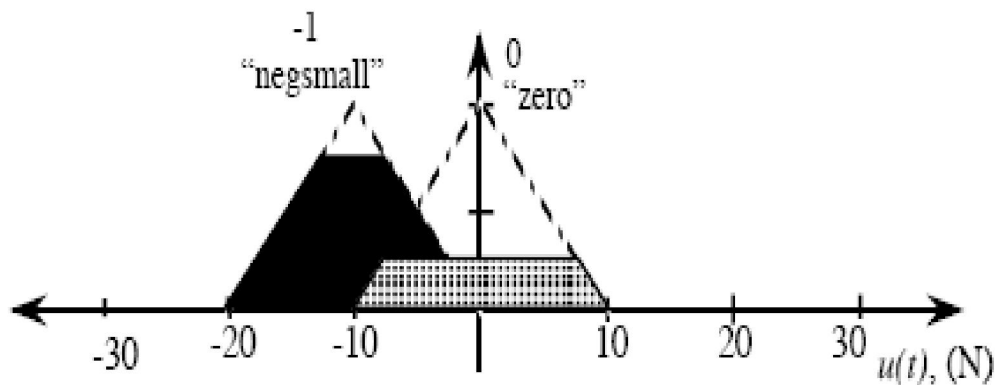
^{۱۶} Inference

^{۱۷} Difuzzification

روش مرکز ثقل^{۱۸}: اگر n تعداد قواعد فازی باشد و y_i وسط هر تابع عضویت و S_i سطح زیر منحنی هر تابع عضویت باشد در این صورت مقدار خروجی غیر فازی یک مقدار عددی است که از رابطه (پ-۱) به دست می‌آید:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n S_i y_i}{\sum S_i} \quad (\text{پ-۱})$$

شکل (پ-۵) نمایش گرافیکی غیر فازی ساز مرکز ثقل را نشان می‌دهد.



شکل (پ-۵) نمایش گرافیکی غیر فازی ساز مرکز ثقل

روش میانگین مراکز^{۱۹}:

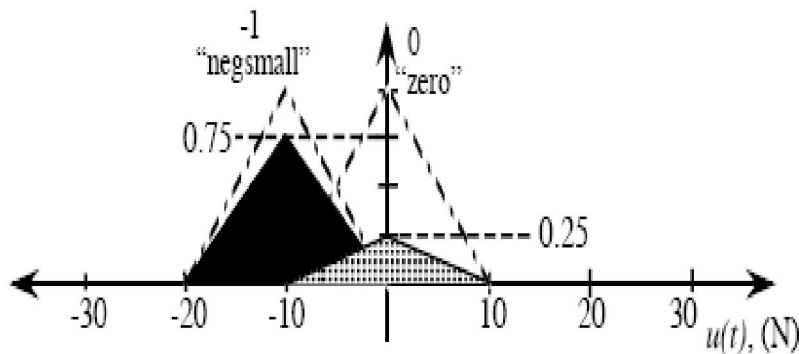
اگر M مجموعه فازی داشته باشیم و y_i مرکز مجموعه فازی l_i و w_i درجه ارتفاع آن باشد، غیر فازی ساز میانگین مراکز به صورت (پ-۲) تعریف می‌شود:

^{۱۸} Center of gravity

^{۱۹} Weighted Average

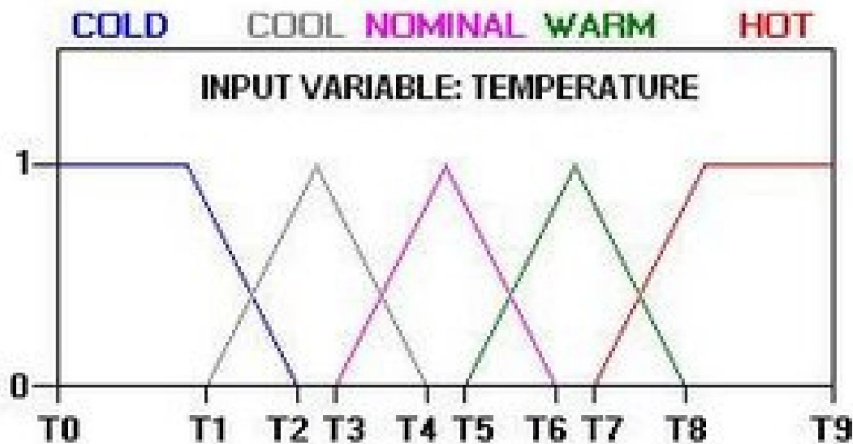
$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M y^l w_l}{\sum_{l=1}^M w_l} \quad (\text{پ-۲})$$

شکل (پ-۶) نمایش گرافیکی غیر فازی ساز میانگین مراکز را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌گردد، $y^* = -7.5$ می‌باشد.



شکل (پ-۶) نمایش گرافیکی غیر فازی ساز میانگین مراکز

منطق فازی را از طریق قوانینی که "عملگرهای فازی" نامیده می‌شوند، می‌توان به کار گرفت. این قوانین معمولاً بر اساس مدل IF variable IS set THEN action تعریف می‌شوند. به عنوان مثال فرض کنید می‌خواهیم یک توصیف فازی از دمای یک اتاق ارائه دهیم. در این صورت می‌توانیم چند مجموعه فازی تعریف کنیم که از الگوی تابع $u(x)$ تبعیت کند. شکل (پ-۷) نموداری از نگاشت متغیر "دمای هوا" به چند مجموعه فازی با نام‌های "سرد"، "خنک"، "عادی"، "گرم" و "داغ" است. چنان که ملاحظه می‌کنید، یک درجه حرارت معین ممکن است متعلق به یک یا دو مجموعه باشد.



شکل (پ-۷) مجموعه فازی

به عنوان نمونه، درجه حرارت‌های بین دمای $T1$ و $T2$ هم متعلق به مجموعه "سرد" و هم متعلق به مجموعه "خنک" است. اما درجه عضویت یک دمای معین در این فاصله، در هر یک از دو مجموعه متفاوت است. به طوری که دمای نزدیک $T2$ تنها به اندازه چند صدم در مجموعه "سرد" عضویت دارد، اما نزدیک نود درصد در مجموعه "خنک" عضویت دارد.

مراحل حاکم بر یک کنترل‌کننده فازی به این ترتیب است که متغیرهای دنیای واقعی به عنوان ورودی دریافت می‌شوند. قوانین فازی آن‌ها را به متغیرهای معنایی تبدیل می‌کند. فرآیند فازی این ورودی را می‌گیرد و خروجی معنایی تولید می‌کند و سرانجام خروجی‌ها به زبان دنیای واقعی ترجمه می‌شوند.

اکنون می‌توان بر اساس مدل فوق قانون فازی زیر را تعریف کرد:

اگر دمای اتاق "خیلی گرم" است، سرعت پنکه را "خیلی زیاد" کن.

اگر دمای اتاق "گرم" است، سرعت پنکه را "زیاد" کن.

اگر دمای اتاق "معتدل" است، سرعت پنکه را در "همین اندازه" نگاه‌دار

اگر دمای اتاق "خنک" است، سرعت پنکه را "کم" کن.

اگر دمای اتاق "سرد" است، پنکه را "خاموش" کن.

اگر این قانون فازی را روی یک سیستم کنترل دما اعمال کنیم، آن گاه می‌توانیم دماسنجی بسازیم که دمای اتاق را به صورت خودکار و طبق قانون ما، کنترل می‌کند.

روش چهار مرحله‌ای استفاده از منطق فازی به شرح ذیل می‌باشد:

(۱) فازی کردن: در این مرحله واقعیات بر اساس سیستم فازی تعریف می‌شوند. ابتدا باید ورودی و خروجی سیستم معرفی شده، سپس قوانین اگر- آنگاه مناسب به کار گرفته شوند. برای ساخت تابع عضویت بایستی از داده‌های خام استفاده شود. حال سیستم برای اعمال منطق فازی آماده است.

مثالی برای فازی کردن: دستگاه تهویه‌ای را در نظر بگیرید که با اندازه‌گیری دما و رطوبت اتاق میزان به جریان در آوردن هوا را مشخص می‌کند. در این مورد ورودی عبارت است از دما و میزان رطوبت و خروجی نیز سطح جریان هوای خروجی از دستگاه تهویه مطبوع است که شامل سه حالت، خاموش، کم و زیاد می‌باشد. همچنین این قوانین اگر- آنگاه استفاده می‌شوند:

(۱) اگر اتاق گرم باشد آنگاه هوای زیادی منتشر کن.

(۲) اگر اتاق خنک باشد، آنگاه هیچ هوایی منتشر نکن.

(۳) اگر اتاق سرد و مرطوب است، آنگاه کمی هوا را به جریان بینداز.

در آخر، متخصص باید دو تابع عضویت تعیین کند. یکی برای اینکه دما را به مقدار فازی تبدیل کند و دیگری برای تبدیل میزان رطوبت به مقدار فازی.

۲) استنتاج: هنگامی که ورودی‌ها به سیستم می‌رسند، استنتاج همه قوانین اگر-آنگاه را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و "درجه درستی" آنها را مشخص می‌کند. اگر یک ورودی داده‌شده به طور صریح با یک قانون اگر-آنگاه مشخص نشده باشد، آنگاه تطابق بخشی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا جوابی مشخص شود. راه‌های متعددی برای پیدا کردن پاسخ بخشی وجود دارد که خارج از این بحث است.

مثالی برای استنتاج: فرض کنید دستگاه تهویه مطبوع دما و درجه رطوبت را اندازه‌گیری کرده و به آنها به ترتیب مقادیر فازی ۰٫۷ و ۰٫۱ را نسبت داده باشد. حال این سیستم بایستی درستی هر یک از قوانین فازی را که در بالا بحث شد مورد بررسی قرار دهد. برای این منظور روش‌های استنتاج بسیاری وجود دارد. این مثال ساده‌ترین روش را مورد استفاده قرار می‌دهد که روش ماکسیمم-مینیمم نامیده می‌شود. این روش مقدار فازی قسمت آنگاه (نتیجه) را به قسمت اگر نسبت می‌دهد. بنابراین این روش مقادیر فازی ۰٫۷ و ۰٫۱ و ۰٫۱ را به ترتیب به قوانین ۱، ۲ و ۳ نسبت می‌دهد.

۳) ساخت: در این قسمت برای به دست آوردن یک نتیجه کلی تمامی مقادیر به دست آمده از قسمت استنتاج باهم ترکیب می‌شوند. قوانین فازی مختلف نتایج مختلفی خواهند داشت. بنابراین ضروری است تا همه قوانین در نظر گرفته شوند. برای این منظور روش‌های متعددی وجود دارند که توضیح همه آنها در این بحث نمی‌گنجد.

مثالی برای ساخت: هر نتیجه استنتاجی درباره سیستم تهویه مطبوع عمل خاصی را پیشنهاد می‌کند. در مثال فوق قانون اول، سطح گردش هوای زیاد را پیشنهاد می‌کند. قانون دوم، خاموش کردن، و قانون سوم، سطح گردش هوای کم را بیان می‌کند. تکنیک‌های متعددی برای به دست آوردن نتیجه کلی وجود دارند. این مثال از روش ماکزیمم-مینیمم که روش ساده‌ای است استفاده

می‌کند. این روش ماکزیمم مقدار فازی قسمت استنتاج به عنوان نتیجه در نظر می‌گیرد. یعنی در عمل، قسمت ساخت مقدار ۰,۷ را انتخاب می‌کند چون مقدار بیشتری را بین مقادیر فازی دارا است.

۴) بازگرداندن از حالت فازی: در این مرحله مقدار فازی به دست آمده از قسمت ساخت به یک داده قابل استفاده تبدیل می‌شود. این قسمت از کار اغلب پیچیده است چون مجموعه فازی نبایستی مستقیماً به داده قابل استفاده تبدیل شود. از آنجا که کنترل‌کننده‌های سیستم های فیزیکی به سیگنال های گسسته نیاز دارند، این مرحله بسیار مهم می‌باشد.

مثالی برای باز گرداندن از حالت فازی: به خاطر دارید که مقدار فازی به دست آمده از مرحله قبل ۰,۷ بود. این مقدار عددی برای سیستم تهویه مطبوع قابل فهم نیست. باید مشخص شود که دستگاه کدامیک از فرمان‌ها کم، زیاد یا خاموش را به جریان بیندازد. مرحله بازگرداندن از حالت فازی بایستی عدد ۰,۷ را به یکی از فرمان‌ها فوق تبدیل کند. در این مثال واضح است که مقدار خروجی ۰,۷ بیانگر این است که سیستم تهویه مطبوع بایستی در حالت زیاد باشد.

پیوست ۲: مشخصات ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG)

جدول (پ-۱)

پارامترهای PMSG

پارامتر	مقدار	واحد
S_g (Generator rated power)	1500	KVA
F (frequency)	50	Hz
V_g (Generator rated voltage)	575	V
R_s (Stator resistance)	0.24	Ω
Matual Inductance in d-axis, L_{dm}	0.0052	mH
Matual Inductance in q-axis, L_{qm}	0.0052	mH
Permanent magnet flux	2.1669	V.s
C (dc link capacitor)	6800	μF
R_f (Grid filter resistance)	0.0001	Ω
L_f (Grid filter inductance)	1	mH

مراجع

- [1] O.C. Onar, M. Uzunoglu, M.S. Alam. (2006) "Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system" **Journal of Power Sources** 161, pp 707–722
- [2] M. Nayeripour, M. Hoseintabar, T. Niknam and J. Adabi. (2010) "Power management, dynamic modeling and control of wind/FC/battery-bank based hybrid power generation system for stand-alone application" **Euro. Trans. Electr. Power** 20 pp 1–22
- [3] Mendis N., Muttaqi K. M., Sayeef S., Perera S., (2010) "Autonomous Operation of Wind-Battery Hybrid Power System with Maximum Power Extraction Capability" **International Conference on Power System Technology**
- [4] Sercan Teleke, Mesut E. Baran, Alex Q. Huang, Subhashish Bhattacharya & Loren Anderson,(2009) "Control Strategies for Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 24, No. 3, pp. 725-732, Sep.
- [5] Shuhui Li, Timothy A. Haskew, Richard P. Swatloski, and William Gathings, (2012) "Optimal and Direct-Current Vector Control of Direct-Driven PMSG Wind Turbines" **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, VOL. 27, NO. 5 pp 1365-1380
- [6] Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir, Steven R. Shaw, (2005) "Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits," **IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION**, VOL. 20, NO. 2, pp 442-451.
- [7] Zehra Ural, Muhsin Tunay Gencoglu, (2010) "Mathematical Models of PEM Fuel Cells," **5th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-5)**, 27-35, Pamukkale University, Denizli, Turkey.
- [8] Abdorreza Rabiee, Hossein Khorramdel, Jamshid Aghaei, (2013) "A review of energy storage systems in microgrids with wind turbines" **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 18 pp 316–326.
- [9] Mendis N., Muttaqi K. M., Sayeef S., Perera S., (2010) "Autonomous Operation of Wind-Battery Hybrid Power System with Maximum Power Extraction Capability" **International Conference on Power System Technology**

- [10] Hajizadeh A., (2011) "Control of Hybrid Wind/ Energy Storage Power Generation Systems during Voltage Disturbance" **2nd power Electronics Drive System and Technologies Conference**
- [11] Sercan Teleke, Mesut E. Baran, Alex Q. Huang, Subhashish Bhattacharya & Loren Anderson, (2009) "Control Strategies for Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 24, No. 3, pp. 725-732, Sep. 2009
- [12] Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Phill Cartwright, Mike Hughes, (2009) "**WIND ENERGY GENERATION, Modelling and Control**" A John Wiley and Sons Publication, 2nd Lt.
- [13] Sun H., Luo X., Wang J., (2011) "Management and Control Strategy Study for a New Hybrid Wind Turbine System" **IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando, FL, USA**, pp 12-15,
- [۱۴] حسن‌زاده ف.، حاجی‌زاده ا.، عباسی ف.، (۱۳۹۲) " تحلیل شرایط عملکردی مختلف در تعیین اندازه اجزاء سیستم تولید توان ترکیبی بادی/پیل سوختی/ذخیره ساز انرژی " کنفرانس انرژی‌های تجدید پذیر و تولید پراکنده ایران، ۱-۶، اصفهان
- [15] (2009), "**Wind Energy-The Facts**", European Wind Energy Association, 1nd Lt,
[۱۶] سایت کمیته راهبردی پیل سوختی <http://www.fcc.gov.ir/FAQ3.aspx>
- [17] Ghanavati G, Esmaeili S, (2009) "Dynamic Simulation of a Wind Fuel Cell Hybrid Power Generation System" **978-1-4244-4702-2/09/\$25.00 ©IEEE**
- [18] Sachin Tiwari, Sushma Gupta, Shailendra Jain, (2011) "Different Topology of Hybrid Wind-Fuel Cell Power Generation" **978-1-4673-0136-7/11/©IEEE**
- [19] R. Chedid, F. B. Chaaban, R. Shihab, (2007) "A Simplified Electric Circuit Model for the Analysis of Hybrid Wind-Fuel Cell Systems" **IEEE 1-4244-1298-6/07**.
- [۲۰] فرخزاد ارشاد ن.، پور موسوی کانی ع.، (۱۳۸۶) "مدلسازی و شبیه سازی دینامیکی سیستم پیل سوختی جهت کاربردهای تولید پراکنده " ششمین همایش ملی انرژی،
- [۲۱] اسماعیل ساعی ور ایرانی زاد (۱۳۹۰) "هیدروژن، پیل سوختی و محیط زیست" دانشگاه تربین مدرس و سازمان انرژی اتمی ایران.
- [۲۲] امیری نژاد م.، روشن ضمیر س.، ایکانی م.، مدائنی س.، (۱۳۸۶) " تاثیر فشار عملیاتی بر عملکرد پیل سوختی پلیمری " ششمین همایش ملی انرژی،

- [23] Goodarz Ghanavati, Saeid Esmaeili, (2009) “Dynamic Simulation of a Wind Fuel Cell Hybrid Power Generation System” **IEEE 978-1-4244-4702-2/09** .
- [24] Hajizadeh A., Golkar M. A., (2009) “Hybrid Control of Combined Solid Oxide Fuel Cell and Battery Energy Storage System in Distribution Systems” **The First National Conference on Hydrogen and Fuel cell**
- [25] Hajizadeh A., Golkar M.A., (2008) “Control of Hybrid Fuel Cell/Battery Distributed Power Generation System with Voltage Sag Ride-Through Capability” **2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, , Johor Baharu, Malaysia**
- [26] M. Khalid & A.V. Savkin, (2010) “A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage”, **Renewable Energy**, Vol 35, Issue 7, pp. 1520-1526
- [27] Tao Zhou, Bruno François, (2010) “Energy Management and Power Control of a Hybrid Active Wind Generator for Distributed Power Generation and Grid Integration” **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS** vol 20 pp 158-165
- [28] K. Sahay and B. Dwivedi, (2009) “Energy storage technology for performance enhancement of power systems,” **Electr. Power Qual. Util. Mag.**, vol. 4, pp. 1–12,.
- [29] Uzunoglu M, Alam MS, (2009) “Dynamic modeling, design and simulation of a combined PEM fuel cell and ultra-capacitor system for stand-alone application”. **IEEE Transactions on Energy Conversion**; 21(3):767–775.
- [30] Uzunoglu M, Alam MS. (2008) “Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a novel wavelet based load sharing algorithm”. **IEEE Transactions on Energy Conversion**; 23(1):263–272.
- [31] Khan MJ, Iqbal MT. (2005) “Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system”. **Journal of Renewable Energy**; 30(3):421–439.
- [32] Thounthong P, Rael S, Davat B.(2009) “Analysis of super capacitor as second source based on fuel cell power generation”. **IEEE Transactions on Energy Conversion**; 24(1):247–255.
- [33] M. I. Marei, H. S. K. El-Goharey,(2012) “Modeling and Dynamic Analysis of Gearless Variable-Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Based Wind Energy Conversion System,” **International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ’12) Santiago de Compostela (Spain)**.

- [34] Y. Chen, P. Pillary, and A. Khan,(2005) “PM wind generator topologies,” **IEEE Trans. Ind. Appl.**, vol. 41, no. 6, pp. 1619–1626.
- [35] H. Polinder, S.W. H. de Haan,M. R. Dubois, and J. Sloopweg,(2004) “Basic operation principles and electrical conversion systems of wind turbines,”**presented at the Nordic Workshop Power Ind. Electron., Trondheim, Norway.**
- [36] G. Michalke, A. D. Hansen, and T. Hartkopf,(2007) “Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator,” **presented at the 2007 Eur.Wind Energy Conf. Exhib.**, Milan, Italy.
- [37] A. R. Bergen andV.Vittal, *Power System Analysis*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2000.

Abstract:

Recently, using of renewable energies such as wind energy, solar energy and etc, due to their many advantages, such as not pollution, accessibility, economic benefits and ..., was grown. Wind turbines are one of the high usages of these resources. In other hand, these resource outputs change at different conditions. So, we have to combine these resources with together or with others resources, like fuel cells and energy storages.

In this thesis, we study on a control strategy for power management of a hybrid wind turbine/ fuel cell/ energy storage power generation system. The main purposes in this work are, increasing security of wind system, load securement and optimal operation of system.

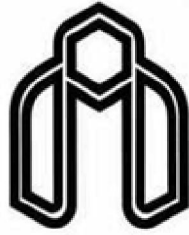
For these purposes, FUZZY controller is used. The advantages of FUZZY controller are as follow:

- Simplicity of FUZZY logic
- Flexibility of FUZZY logic in determinations
- High accuracy of FUZZY controller
- Fast reactions and etc.

In this system, the wind turbine is main resource of the system and the fuel cell (FC) and battery bank are the backup system; so the load power, wind turbine power and battery state of charge (SOC) are inputs and the FC power is controller output.

According to the results in 6 different states, it can be seen that the used controller operated truly.

Key Words: Hybrid Power Generation System, FUZZY Controller, Power Management,



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

**Power Management of Hybrid Wind/Fuel Cell/Energy Storage
Power Generation System**

Fattah Hassanzadeh

Supervisor: Dr. Amin Hajizadeh

Advisor: Dr. Morteza Rahimian

**September
2013**