

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی برق

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق

گرایش قدرت

طراحی کنترل کننده برای بهبود کیفیت توان در سیستم هیبرید

مؤلف:

محسن حکیمی زاده

استاد راهنما :

دکتر محسن محمدیان

استاد مشاور:

دکتر علی اکبر قره ویسی

دی ماه ۱۳۹۳



این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی برق

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: محسن حکیمی زاده

استاد راهنما: دکتر محسن محمدیان

استاد مشاور: دکتر علی اکبر قره ویسی

داور ۱: دکتر

داور ۲: دکتر

معاون آموزشی و پژوهشی دانشکده: دکتر مریم احتشام زاده

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که گرمای وجودشان همواره یاری بخش راهم بوده و هست.

تشر و قدردانی

استاد راهنما و گرانقدر جناب آقای **دکتر محسن محمدیان**، با عنایت به لطف ایزد منان و با مساعدت و همفکری و راهنمایی های دلسوزانه و بی دریغ شما توانستیم با تکیه بر علم و تجربه شما پا به عرصه تحقیق و پژوهش بگذاریم. هر قدمی که در این راه برداریم مدیون شما بزرگوارانیم.

از آقای **دکتر علی اکبر قره ویسی** نیز که زحمت مشاوره این پایان نامه را بر عهده داشتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده:

امروزه موضوع استفاده از انرژی‌های نو یکی از مباحث مهم در صنعت برق می‌باشد و بسیاری از کشورها به دلیل فواید بسیار زیاد این نوع انرژی‌ها به سمت استفاده گسترده از آن‌ها پیش می‌روند. در این پایان‌نامه یک سیستم هیبرید شامل توربین بادی، آرایه خورشیدی و پیل سوختی استفاده شده است. هدف اصلی مدیریت انرژی این سیستم‌ها می‌باشد. چون سیستم‌های بادی و خورشیدی وابسته به شرایط جوی بوده و نمی‌توانند یک برق مداوم و ثابت را تامین نمایند، لذا از یک پیل سوختی در کنار آن‌ها برای تامین مداوم برق استفاده شده است. برای مدیریت انرژی در بین این سه سیستم از یک سیستم کنترلی فازی استفاده شده که هم بتواند سیستم‌های بادی و خورشیدی را در نقطه کار حداکثر توان قرار دهد و هم تعادل در شرایط مختلف جوی را بین این سیستم‌ها حفظ نماید. همچنین در این پایان‌نامه سیستم هیبرید توانایی حذف هارمونیک‌های سمت AC را نیز دارد. در واقع با قرار دادن یک حلقه، کنترلی هارمونیک‌های تولید شده توسط یک بار غیرخطی متصل به باس AC را حذف می‌نماید و کیفیت توان را افزایش می‌دهد.

کلیدواژه: توربین بادی، سیستم فتوولتائیک، پیل سوختی، سیستم‌های هیبرید تولید، کنترل فازی

فهرست مطالب

۱	فصل اول
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ محاسن و معایب انرژی های نو و لزوم استفاده از آن ها
۴	۳-۱ سیستم های هایبرید انرژی
۵	۴-۱ مروری بر کارهای صورت گرفته
۱۱	۵-۱ ساختار پایان نامه
۱۲	فصل دوم
۱۳	۲-۱ مقدمه
۱۳	۲-۲ آرایه فتوولتائیک
۱۶	۲-۲-۱ روش های کنترل سیستم فتوولتائیک برای ردیابی حداکثر توان
۱۶	۲-۲-۲-۱ روش متغیر کنترل
۱۷	۲-۲-۲-۲ روش آشفتگی مشاهده
۱۷	۲-۲-۲-۳ روش هدایت افزایشی
۱۷	۲-۲-۲-۴ روش گرادیان
۱۸	۲-۲-۲-۵ روش های کنترل هوشمند
۱۸	۳-۲ توربین های بادی
۱۹	۳-۲-۱ مدل توربین بادی
۲۱	۳-۲-۲ مدل ژنراتور سنکرون با میدان مغناطیسی دائم
۲۲	۳-۳-۲ مبدل DC/DC
۲۴	۴-۲ پیل سوختی
۲۴	۴-۲-۱ ساختار پیل سوختی
۲۶	۴-۲-۲ مدل های ارائه شده برای پیل سوختی

۲۶	.....مدل‌های دینامیکی یا شیمیایی ۲-۴-۲-۱
۲۸	.....مدل‌های مبتنی بر جداول عددی ۲-۴-۲-۲
۲۸	.....مدل‌های الکتریکی ۲-۴-۲-۳
۲۹	.....مدل پیل سوختی پلیمری PEMFC ۲-۴-۲-۴
۳۲	.....۵-۲ جمع بندی
۳۳	.....فصل سوم
۳۴	.....۱-۳ مقدمه
۳۴	.....۲-۳ ساختار کلی مدل سیستم
۳۵	.....۱-۲-۳ مدل سیستم بادی
۳۷	.....۱-۱-۲-۳ کنترل کننده پیچ
۳۸	.....۲-۱-۲-۳ کنترل کننده سرعت توربین بادی
۳۹	.....۳-۱-۲-۳ مبدل بوست
۴۰	.....۲-۲-۳ مدل سیستم خورشیدی
۴۱	.....۱-۲-۲-۳ سلول فتوولتائیک
۴۲	.....۲-۲-۲-۳ واحد ماکزیمم توان
۴۳	.....۳-۲-۲-۳ رگولاتور بوست
۴۳	.....۴-۲-۲-۳ کنترل کننده MPPT
۴۵	.....۳-۲-۳ سیستم پیل سوختی
۴۵	.....۱-۳-۲-۳ مدل پیل سوختی
۴۷	.....۲-۳-۲-۳ سیستم کنترل پیل سوختی
۴۹	.....۳-۳ سیستم کنترل حذف هارمونیک
۵۳	.....۴-۳ روش طراحی کنترلرهای فازی
۵۳	.....۱-۴-۳ مقدمه
۵۴	.....۱-۴-۳ ساختار الگوریتم‌های ژنتیکی
۵۸	.....۳-۴-۳ روند کلی الگوریتم‌های ژنتیکی
۶۰	.....۴-۴-۳ الگوریتم ژنتیک در طراحی کنترلر فازی

۶۳	.....۵-۳ نتیجه گیری
۶۴	..... فصل چهارم
۶۵	.....۱-۴ مقدمه
۶۵	.....۲-۴ شبیه سازی
۶۷	.....۱-۲-۴ شبیه سازی برای سیستم با بار خطی
۷۲	.....۲-۲-۴ شبیه سازی سیستم با بار غیر خطی
۷۵	.....۳-۴ مقایسه عملکرد کنترلر فازی با کنترلر PI کلاسیک
۷۹	..... فصل پنجم
۸۰	.....۱-۵ نتیجه گیری
۸۱	.....۲-۵ پیشنهادات
۸۲	..... منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: طرح کلی سیستم کنترلی [۱۴]..... ۷
- شکل ۱-۲: اتصال سری و موازی سلول‌های خورشیدی در یک آرایه..... ۱۳
- شکل ۲-۲: مدار معادل یک سلول خورشیدی..... ۱۴
- شکل ۳-۲: منحنی P-V سلول خورشیدی در $E=1000W/m^2$ ۱۵
- شکل ۴-۲: دیاگرام کلی یک سیستم بادی به همراه سیستم کنترل آن..... ۱۹
- شکل ۵-۲: نسبت بین C_p و λ در سرعت‌های متفاوت باد..... ۲۰
- شکل ۶-۲: توان مکانیکی تولید شده به وسیله توربین به ازاء سرعت زاویه‌ای محور توربین در سرعت‌های مختلف وزش باد [۳۶]..... ۲۱
- شکل ۷-۲: مدار معادل و منحنی فازوری یک فاز برای یک ژنراتور سنکرون..... ۲۲
- شکل ۸-۲: مدار یک مبدل بوست..... ۲۳
- شکل ۹-۲: مدار معادل یک مبدل بوست با بار و منبع DC..... ۲۴
- شکل ۱۰-۲: ساختار یک پیل سوختی..... ۲۵
- شکل ۱۱-۲: منحنی ولتاژ جریان یک پیل سوختی..... ۲۶
- شکل ۱۲-۲: مدل‌های الکتریکی پیل سوختی [۴۱]..... ۲۹
- شکل ۱۳-۲: مدار معادل یک پیل PEMFC..... ۲۹
- شکل ۱-۳: نمای کلی از سیستم شبیه‌سازی شده..... ۳۵
- شکل ۲-۳: مدل کلی سیستم بادی..... ۳۶
- شکل ۳-۳: منحنی مشخصه توربین بادی..... ۳۷
- شکل ۴-۳: واحد محاسبه گر..... ۳۷
- شکل ۵-۳: سیستم کنترل پیچ توربین بادی..... ۳۸
- شکل ۶-۳: کنترل کننده سرعت توربین..... ۳۸
- شکل ۷-۳: مدل مبدل بوست..... ۴۰
- شکل ۸-۳: مدار شبیه‌سازی شده سیستم خورشیدی..... ۴۱
- شکل ۹-۳: مدل یک آرایه خورشیدی..... ۴۱
- شکل ۱۰-۳: واحد ماکزیمم توان و سیستم کنترل فازی MPPT..... ۴۲

- شکل ۳-۱۱: توابع عضویت مربوط به ورودی dP/dV ۴۳
- شکل ۳-۱۲: توابع عضویت مربوط به ورودی مشتق dP/dV ۴۴
- شکل ۳-۱۳: توابع عضویت مربوط به خروجی کنترلر فتوولتائیک ۴۴
- شکل ۳-۱۴: ساختار کنترلی سیستم پیل سوختی ۴۵
- شکل ۳-۱۵: مدل پیل سوختی به همراه مبدل بوست و کنترلر ۴۵
- شکل ۳-۱۶: منحنی های $V-I$ و $P-I$ [۴۹] ۴۶
- شکل ۳-۱۷: منحنی های بدست آمده از طریق مدل سازی ۴۷
- شکل ۳-۱۸: سیستم کنترلی پیل سوختی ۴۸
- شکل ۳-۱۹: توابع عضویت مربوط به ورودی $e(t)$ ۴۸
- شکل ۳-۲۰: توابع عضویت مربوط به ورودی $de(t)/dt$ ۴۹
- شکل ۳-۲۱: توابع عضویت مربوط به خروجی کنترلر فازی پیل سوختی ۴۹
- شکل ۳-۲۲: مدل بار غیرخطی ۵۰
- شکل ۳-۲۳: تبدیل فوریه مولفه های جریانی بار ۵۰
- شکل ۳-۲۴: شدت مولفه های هارمونیک در خروجی بار (مقدار $THD=32\%$) ۵۱
- شکل ۳-۲۵: مدار محاسبه کل جریان هارمونیک تولید شده توسط بار غیرخطی ۵۱
- شکل ۳-۲۶: مدار مولد مولفه حقیقی فرکانس پایه جریان I_D ۵۳
- شکل ۳-۲۷: نحوه ارزیابی شایستگی در چرخ رولت ۵۵
- شکل ۳-۲۸: یک نمونه تلفیق (آمیزش) ۵۶
- شکل ۳-۲۹: نمونه ای از تلفیق دو نقطه ای ۵۷
- شکل ۳-۳۰: نمونه ای از تلفیق جامع ۵۷
- شکل ۳-۳۱: یک کروموزوم قبل و بعد از اعمال عملگر جهش ۵۸
- شکل ۳-۳۲: کد برنامه مجازی الگوریتم ژنتیک ساده و فلوچارت آن ۵۸
- شکل ۳-۳۳: نحوه ارزیابی تابع شایستگی در چرخ رولت ۵۹
- شکل ۳-۳۴: مجموعه های فازی یک متغیر ورودی x_i ۶۱
- شکل ۳-۳۵: (الف) دو رشته مربوط به ورودی x_1 . (ب) تحقق مجموعه های فازی براساس دو رشته ارائه شده در (الف) ۶۲
- شکل ۴-۱: دیاگرام کلی سیستم شبیه سازی شده ۶۵
- شکل ۴-۲: تغییرات سرعت باد ۶۶

- شکل ۳-۴: روند تغییرات شدت تابش نور خورشید..... ۶۶
- شکل ۴-۴: توان خروجی توربین بادی..... ۶۷
- شکل ۵-۴: منحنی تغییرات سرعت زاویه‌ای ژنراتور در سیستم بادی..... ۶۸
- شکل ۶-۴: منحنی توان خروجی سیستم فتوولتائیک..... ۶۹
- شکل ۷-۴: روند تغییرات dp/dv ۶۹
- شکل ۸-۴: تغییرات توان خروجی پیل سوختی..... ۷۰
- شکل ۹-۴: مقایسه تغییرات خروجی توربین بادی، فتوولتائیک و پیل سوختی..... ۷۱
- شکل ۱۰-۴: تغییرات توان دریافتی از شبکه متصل به باس AC..... ۷۱
- شکل ۱۱-۴: ساختار سیستم با بار غیرخطی..... ۷۲
- شکل ۱۲-۴: شکل موج جریان بار غیرخطی..... ۷۳
- شکل ۱۳-۴: شکل موج جریان شبکه قبل از جبران سازی..... ۷۳
- شکل ۱۴-۴: شکل موج جریان شبکه بعد از جبران سازی..... ۷۴
- شکل ۱۵-۴: مقایسه تغییرات خروجی توربین بادی، فتوولتائیک و پیل سوختی در حضور بار هارمونیکی..... ۷۴
- شکل ۱۶-۴: توان دریافتی از شبکه بعد از جبران سازی..... ۷۵
- شکل ۱۷-۴: توان خروجی سیستم بادی با کنترلر PI..... ۷۷
- شکل ۱۸-۴: مقایسه توان خروجی سیستم خورشیدی با کنترلر فازی و PI..... ۷۷
- شکل ۱۹-۴: مقایسه توان خروجی سیستم پیل سوختی با کنترلر فازی و PI..... ۷۸
- شکل ۲۰-۴: مقایسه توان دریافتی از شبکه متصل به سیستم هیبرید با کنترلر فازی و PI..... ۷۸

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: معادلات شبیه سازی پیل سوختی..... ۲۷
- جدول ۱-۳: مقادیر و پارامترهای توربین و ژنراتور سیستم بادی..... ۳۶
- جدول ۲-۳: مقادیر و پارامترهای کنترلر پیچ..... ۳۸
- جدول ۳-۳: مقادیر مربوط به کنترلر PI در توربین بادی..... ۳۹
- جدول ۴-۳: مقادیر مربوط به مبدل بوست..... ۴۰
- جدول ۵-۳: پارامترهای مربوط به آرایه خورشیدی..... ۴۲
- جدول ۶-۳: پایگاه قواعد فازی کنترلر فتوولتائیک..... ۴۴
- جدول ۷-۳: پارامترهای مربوط به پیل سوختی..... ۴۶
- جدول ۸-۳: پایگاه قواعد کنترلر فازی پیل سوختی..... ۴۹
- جدول ۹-۳: تنظیمات الگوریتم ژنتیک برای طراحی کنترلر سیستم فتوولتائیک..... ۶۳
- جدول ۱۰-۳: تنظیمات الگوریتم ژنتیک برای طراحی کنترلر سیستم پیل سوختی..... ۶۳
- جدول ۱-۴: مقایسه مقادیر ایده آل و شبیه سازی شده در سیستم بادی..... ۶۸
- جدول ۲-۴: مقادیر مربوط به پارامترهای کنترلرهای سیستم..... ۷۵

۱ فصل اول مقدمه ای بر سیستمهای انرژی های نو

۱-۱ مقدمه

از قرن بیستم به بعد انرژی الکتریکی نقش بسیار مهمی در زندگی بشر ایفا کرده است. بسیاری از دستاوردهای بشر و پیشرفت‌هایی که امروز شاهد آن هستیم به دلیل پیدایش این انرژی ارزشمند بوده است. امروزه زندگی انسان‌ها و اقتصاد کشورها وابسته به انرژی برق بوده و نیاز به آن، روز به روز در حال افزایش است. از طرفی دیگر سوخت‌های فسیلی منبع اصلی تامین انرژی برای نیروگاه‌های تولیدکننده برق به شمار می‌آیند. سوخت‌های فسیلی منابعی محدود و در حال کاهش هستند، از طرفی سوخت‌های فسیلی آلاینده‌های شدید محیط زیست نیز می‌باشند و خسارت زیادی به طبیعت و محیط زندگی بشر وارد کرده‌اند. لذا امروزه بحث استفاده از انرژی‌های نو بسیار پررنگ‌تر از گذشته شده و بسیاری از کشورها مشتاق و علاقه‌مند به جایگزینی آن‌ها با منابع سوخت فسیلی می‌باشند. عبارت "انرژی نو" به نوعی از انرژی اطلاق می‌شود که بدون آسیب رساندن به طبیعت بدست آید (متمایز از روش‌های سنتی، یعنی از طریق نیروگاه‌های سوخت فسیلی، نیروگاه‌های اتمی و نیروگاه‌های برق آبی). این انرژی‌ها می‌توانند از نوع انرژی‌های تجدیدپذیر^۱ مانند خورشید، باد، بیوماس و انرژی زمین گرمایی و یا انرژی‌های تجدید ناپذیر مانند هیدروژن (پیل سوختی) باشند.

امروزه استفاده از باد به عنوان منبع پاک و رایگان تولید انرژی الکتریکی در حال گسترش روز افزون است و براساس پیش‌بینی‌ها تا سال ۲۰۲۰ میلادی ۱۰٪ کل برق جهان از انرژی باد تامین خواهد شد و رشد سالانه تا سال ۲۰۴۰ بین ۱۰٪ تا ۴۰٪ خواهد بود [۱]. انرژی خورشیدی تقریباً عامل اصلی و سرمنشاء همه منابع انرژی بر روی زمین می‌باشد. استفاده از انرژی خورشیدی رشدی بیش از استفاده از انرژی بادی داشته است. این در حالی است که میزان فضای مورد نیاز برای نیروگاه‌های خورشیدی بسیار کمتر از فضای مورد نیاز برای نیروگاه‌های بادی می‌باشد. طبق آمارها بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۴ میلادی سرعت رشد تاسیس نیروگاه‌های خورشیدی بسیار بیشتر از نیروگاه‌های بادی بوده است [۱]. همچنین با پیشرفت‌های اخیر در صنعت ساخت نیمه‌هادی قیمت تمام شده این نوع انرژی در حال کاهش است. به طوریکه در سال ۱۹۸۰ قیمت هر کیلووات ساعت برق خورشیدی معادل ۰.۹ دلار بوده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۰ به مقدار ۰.۰۶ دلار به ازاء هر کیلووات ساعت کاهش یابد [۲]. علی‌رغم قیمت بالای تولید انرژی‌های نو، استفاده از آن در سرتاسر دنیا رو به افزایش می‌باشد و این تنها به دلیل محاسن فراوان آن‌ها چه از نظر حفظ محیط زیست و چه از نظر کاربرد آن‌ها در موارد خاص می‌باشد.

¹ Renewable energy

۲-۱ محاسن و معایب انرژی های نو و لزوم استفاده از آن ها

انرژی های نو، از آنجا که منبع تولید آن ها رایگان می باشد، گزینه ای مناسب برای تامین برق در مناطق دورافتاده است. در واقع با ایجاد یک مرکز مستقل تولید انرژی های بادی و یا خورشیدی در نزدیکی محل مصرف بدون نیاز به هزینه های زیاد توسعه شبکه، تامین خطوط و پست های انتقال، می توان برق مورد نیاز مصرف کنندگان شامل مصارف روشنایی، ارتباطات، منابع آب و وسایل سرمایش و گرمایش را تامین نمود.

از جمله محاسن انرژی های نو می توان به موارد زیر اشاره نمود [۳-۴]

- امکان دسترسی سریع به برق در هر زمان
- کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی
- عدم نیاز به توسعه شبکه قدرت و صرف زمان و هزینه بالا
- حفظ محیط زیست
- افزایش تولید اقتصادی و ایجاد فرصت های شغلی در مناطق روستایی
- استفاده بهتر از منابع طبیعی

این منابع انرژی از یک طرف هزینه های توسعه شبکه و از طرفی هزینه های لازم برای انتقال سوخت را کاهش می دهند. چون منبع اصلی آن ها باد و خورشید است و این منابع کاملاً مجانی هستند، لذا برق تولیدی آن ها بسیار ارزان قیمت است. به دلیل راندمان بالا، طول عمر زیاد و قابلیت اطمینان بالا از این منابع می توان در شبکه اصلی نیز به عنوان سیستم پشتیبان برای بالا بردن پایداری در نقاط ضعیف شبکه و یا در شرایط بحرانی استفاده نمود.

استفاده از توربین های بادی و آرایه های خورشیدی علاوه بر محاسن قابل توجه دارای معایب مهمی نیز هستند. این معایب شامل موارد زیر هستند [۳]:

- هزینه های بالای نصب و راه اندازی
- نیاز به فضای زیاد برای ایجاد مزارع بادی
- تولید نویز و ایجاد آلودگی صوتی
- تربیت متخصص و کارشناسان ماهر
- وابستگی شدید به شرایط جوی و محیطی

از مهمترین این معایب وابستگی بسیار زیاد این سیستم ها به وضعیت آب و هوا و شرایط جوی می باشد. این موضوع برای صنعت برق که باید همواره برق مداوم و با کیفیت را تامین کند، مشکل ساز می باشد. یکی از روش های رفع این مشکل استفاده ترکیبی از این سیستم ها در کنار

یکدیگر می‌باشد [۴]. برای استفاده هم زمان این سیستم‌ها نیاز به حفظ هماهنگی در بین همه این سیستم‌ها است که در این زمینه مطالعات و تحقیقات بسیاری انجام شده است [۵-۱۱].

۳-۱ سیستم‌های هایبرید انرژی

سیستم هایبرید قدرت^۱ به صورت ترکیب دو یا چند تکنولوژی برای تولید توان معرفی می‌شود. سیستم‌های هایبرید قدرت می‌توانند به صورت مستقل و یا متصل به شبکه قدرت در نظر گرفته شوند. در سیستم‌های هایبرید مستقل از شبکه، ظرفیت ذخیره انرژی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا جابجایی تغییرات توان بار و کمبود منابع اولیه انرژی باشد. سیستم‌های هایبرید مستقل از شبکه به همراه بارهای مربوط را می‌توان به عنوان یک شبکه کوچک در نظر گرفت. سیستم‌های هایبرید متصل به شبکه قادر به تأمین توان بار محلی و شبکه برق می‌باشند. این سیستم هایبرید را می‌توان به عنوان تولید پراکنده^۲ (DG) شبکه توزیع در نظر گرفت.

تولید پراکنده را نباید با تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر همسان فرض کرد چرا که می‌تواند از منابع پایان پذیر نظیر سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی استفاده کند و حتی آلودگی محیطی نیز به همراه داشته باشد. ترکیب‌های بسیاری از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجهیزات ذخیره برای ساختن یک سیستم هایبرید متصل به شبکه یا مستقل در مقالات مختلف پیشنهاد شده، در زیر تعدادی از ترکیبات ذکر شده است:

۱. سیستم هایبرید باتری و یا خازن بزرگ/پیل سوختی: در این سیستم پیل سوختی نقش اصلی در تأمین توان را بر عهده دارد و باتری به عنوان منبع ثانویه در نقش ذخیره کننده انرژی ظاهر می‌شود تا در تأمین توان پیک بار و تغییرات ناگهانی بار به طور هم زمان با پیل سوختی مورد استفاده قرار گیرد [۵].

۲. سیستم هایبرید باتری/پیل سوختی/فتوولتائیک/مولد باد: این سیستم شامل سه منبع انرژی تجدیدپذیر آرایه فتوولتائیک، مولد باد و پیل سوختی می‌باشد. انرژی حاصل از توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک منابع اصلی سیستم بوده و از ترکیب پیل سوختی و الکترولایزر^۳ به همراه باتری به عنوان سیستم ذخیره سازی استفاده می‌شود [۶].

۳. سیستم هایبرید پیل سوختی/میکروتوربین: با توجه به مزایا و ویژگی‌های این نوع منابع تولید توان، با استفاده از میکروتوربین‌ها و پیل‌های سوختی در کنار یکدیگر به عنوان یک سیستم هایبرید می‌توان هم از سرعت پاسخگویی سریع میکروتوربین‌ها و هم از انعطاف پذیری پیل‌های

¹ Hybrid Power System

² Distributed Generation

³ Electrolyzer

سوختی بهره جست [۷].

۴. سیستم هایبرید پیل سوختی / توربین گازی: این سیستم شامل مجموعه‌ای از پیل‌های سوختی، محفظه احتراق، توربین گازی، توربین توان، کمپرسور سوخت و هوا و سیستم^۱ HRSG می‌باشد [۸].

۵. سیستم هایبرید پیل سوختی / فتوولتائیک: این سیستم همانند سیستم هایبرید شماره دو می‌باشد اما با این تفاوت که از مولد بادی و باتری استفاده نمی‌شود. آرایه فتوولتائیک توان مورد نیاز الکترولایزر برای تولید و ذخیره سازی هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی را فراهم می‌کند [۹].

۶. سیستم هایبرید باتری / پیل سوختی / فتوولتائیک: مثل سیستم شماره دو می‌باشد. در این سیستم آرایه فتوولتائیک و پیل سوختی نقش منبع اصلی تولید توان را به عهده دارند [۱۰].

۷. سیستم هایبرید دیزل / مولد باد / باتری: این سیستم شامل مبدل بادی، ژنراتور دیزل کوچک و باتری می‌باشد که از باتری به منظور ذخیره‌سازی مازاد انرژی تولید شده توسط مولد بادی استفاده شده است [۱۱].

از سیستم‌های انرژی هایبرید لیست شده در بالا، متوجه می‌شویم که پرکاربردترین و اصلی‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، فتوولتائیک و باد هستند. همچنین پیل سوختی به دلیل مزایای آن از جمله بازده بالا و عدم تولید آلودگی محیطی توجه زیادی را به سمت خود جلب کرده است. در این پروژه توربین باد و آرایه فتوولتائیک بعنوان منابع اولیه و سیستم پیل سوختی به عنوان منبع ثانویه تولید انرژی در نظر گرفته شده است.

با توجه به ویژگی‌های دوره‌ای توان باد و تابش خورشید، سیستم‌های انرژی تجدید پذیر بادی و خورشیدی در کاربردهای مستقل از شبکه به تجهیزات ذخیره‌کننده‌ی انرژی یا دیگر منابع تولید انرژی برای شکل دهی یک سیستم هایبرید نیاز دارند. در این پروژه، سیستم پیل سوختی به عنوان منبع ثانویه تولید انرژی در نظر گرفته شده است.

۱-۴ مروری بر کارهای صورت گرفته

با توجه به اهمیت بررسی سیستم‌های هایبرید انرژی از جنبه‌های متفاوت، مقالات متعددی به این مبحث اختصاص یافته است. این مقالات از مدل‌های مختلفی جهت مطالعات مدیریت انرژی استفاده کرده‌اند. با توجه به لزوم مطالعات مدیریت انرژی در بلند مدت، در برخی موارد از مدل‌های بسیار ساده‌ای استفاده شده است. مبنای بسیاری از استراتژی‌های کنترلی عملکردی در این حالت، مبتنی بر مشاهدات تجربی و نتایج آزمایشات مختلفی است که بر روی سیستم‌های هایبرید

^۱ Heat Recovery Steam Generator

قدیم انجام گرفته است. این نتایج، اساس بسیاری از استراتژی‌های کنترلی پیشرفته امروزی را تشکیل می‌دهند.

به عنوان مثال در مرجع [۱۲] استراتژی کنترلی پیشنهادی برای مدیریت انرژی، یک ساختار کنترلی سلسله مراتبی متشکل از سه حلقه کنترلی، کنترل کننده جریان پیل سوختی، کنترل کننده SOC^۱ و کنترل کننده جریان شارژ باتری می‌باشد. استراتژی ذکر شده در این مراجع براساس قوانین تجربی شکل می‌گیرد.

همچنین در مرجع [۱۳] یک الگوریتم مدیریت توان بر اساس قوانین تجربی و مبتنی بر جداول عددی بیان شده است. در این مرجع برای هر یک از زیر سیستم‌های یک سیستم هایبرید مشتمل بر پیل سوختی، سلول‌های خورشیدی و باتری، حالت‌های عملکردی متفاوت تعریف شده است. به عنوان مثال برای مولد خورشیدی دو حالت عملکردی ردگیری نقطه توان ماکزیمم^۲ (MPPT) و مد محدودیت ولتاژ باس^۳ (BVL) تعریف شده است. اگر ولتاژ باتری از محدوده ولتاژ بیشتر شود، BVL از شارژ اضافی باتری جلوگیری می‌کند، تحت این حالت عملکردی ممکن است جریان خروجی از پانل‌های خورشیدی از حالت MPPT فاصله بگیرد. اگر ولتاژ باطری از حد ولتاژ پایین تر قرار بگیرد حالت مد عملکردی MPPT فعال می‌شود.

اما به دلیل آنکه این مدل‌های ساده از بسیاری از دینامیک‌ها صرف نظر کرده‌اند، سعی شده از مدل‌های کامل تری استفاده شود.

به عنوان مثال در مرجع [۱۴] سیستم هایبرید پیشنهادی متشکل از آرایه فوتولتائیک، پیل سوختی، الکترولایزر و باتری می‌باشد. در این سیستم آرایه فوتولتائیک به عنوان منبع اصلی تولید توان سیستم و از ترکیب پیل سوختی و الکترولایزر به عنوان منبع ذخیره توان برای بلند مدت و از باتری جهت ذخیره سازی در کوتاه مدت استفاده شده است. در این مرجع سعی شده است مدیریت انرژی به گونه‌ای لحاظ گردد که قابلیت اطمینان سیستم ارضاء گردد و همچنین عملکرد سیستم از لحاظ اقتصادی نیز قابل قبول باشد. مدل ارائه شده جهت تامین قابلیت اطمینان سیستم پیشنهادی به گونه‌ای است که مفهوم احتمال از دست دادن عرضه توان را نیز در بر می‌گیرد و به صورت کلی زیر بیان می‌شود:

¹ State of charge

² Maximum power point tracking

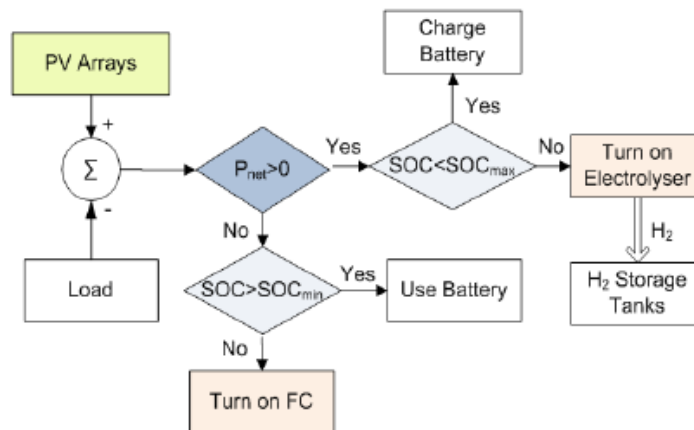
³ Bus voltage limit mode

$$P_{tot}(t) = P_{pv}(t) + P_{fc}(t) \quad (1-1)$$

توان کل تولیدی (P_{tot}) برابر با توان تولیدی آرایه خورشیدی (P_{PV}) و پیل سوختی (P_{FC}) می باشد. با توجه به مدل ارائه شده جهت قابلیت اطمینان سیستم هایبرید پیشنهادی، حالت های ممکن در بندهای زیر ذکر می شوند:

- توان کل تولیدی توسط فتوولتائیک و پیل سوختی از مقدار توان مورد نیاز بار بیشتر باشد. در این حالت توان اضافی در باتری ذخیره می شود.
- توان تولیدی توسط فتوولتائیک و پیل سوختی از توان مورد نیاز بار کمتر باشد. در این شرایط کمبود مقدار توان بار توسط باتری جبران می شود. در واقع در این حالت هیچ توانی به الکترولایزر جهت تولید هیدروژن ارسال نمی شود.
- در حالتی که توان تولیدی کل و توان ورودی به مبدل یکی باشند، ظرفیت باتری بدون تغییر باقی می ماند.

شکل زیر بلوک دیاگرام سیستم کنترلی را برای این سیستم نشان می دهد:



شکل ۱-۱: طرح کلی سیستم کنترلی [۱۴]

در مرجع [۱۵] استراتژی مدیریت انرژی بر اساس مدل استاتیکی سیستم برای کمینه سازی هزینه کل تولید توان در طول بیست سال عملکرد سیستم ارائه شده است. سیستم هایبرید پیشنهادی در این مرجع در برگرفته سلول خورشیدی، توربین بادی و پیل سوختی جهت کاربردهای مستقل از شبکه به کار گرفته شده است. الگوریتم کنترلی بدین صورت است که اگر توان تولید شده توسط سلول های خورشیدی و مولد بادی برابر با تقاضای بار باشد در این صورت کل توان تولیدی توسط اینورتر به بار تحویل داده می شود. اگر توان تولیدی توسط سلول های خورشیدی و مولد بادی بزرگتر از توان بار باشد در این صورت در هر لحظه از زمان توان اضافی به الکترولایزر جهت تولید