

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: برق و رباتیک

گروه: قدرت

ردیابی حداکثر بازده پیل های سوختی در سیستم های تولید توان ترکیبی

پیل سوختی - ذخیره ساز انرژی

فهیمة روح الامینی

استاد راهنما:

دکتر امین حاجی زاده

استاد مشاور:

دکتر سید مهدی رخت اعلا

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در مهندسی برق - قدرت

بهمن ماه ۱۳۹۲

تقدیم به

قلب‌هایی که لحظه لحظه ضعیف شدند تا من جان بگیرم

دستانی که لحظه لحظه لرزان شدند تا من قلم در دست بفشارم

گیسوئی که لحظه لحظه سفید شدند تا من جوان شوم

قدم‌هایی که لحظه لحظه سست شدند تا من بر پله‌های موفقیت صعود کنم

چشمانی که لحظه لحظه کم سو شدند تا من به افق‌های دور دست چشم بدوزم

تقدیم به پدر و مادرم که اسطوره‌های همیشگی ایثارند

تقدیم به

ستون‌های زندگیم، تقدیم به نگاهشان که تکیه گاه‌های لحظه‌های تردید و ترسم شدند

تا شریک شوند در سختی‌هایی که پایان ناپذیر بودند

تقدیم به برادر و خواهر مهربانم محمد و رحیمه

جناب آقایان دکتر حاجی زاده و دکتر رخت اعلا

اساتید راهنما و مشاورم

شما روشنائی بخش تاریکی جان هستید و ظلمت اندیشه را نور می‌بخشید. چگونه سپاس گویم
مهربانی و لطف شما را که سرشار از عشق و یقین است چگونه سپاس گویم تأثیر علم آموزی شما را
که چراغ روشن هدایت را که بر کلبه‌ی محقر وجودم فروزان ساخته است. آری در مقابل این همه
عظمت و شکوه شما، مرا نه توان سپاس است و نه کلام وصف

این پایان‌نامه با کمک و پشتیبانی
سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)
اجرا شده است.

فهیمة روح الامینی

بهمن ماه ۱۳۹۲

چکیده

در سالهای اخیر استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش یافته است. از جمله این منابع می‌توان پیل‌های سوختی را نام برد. با توجه به کاربرد روز افزون این منابع در صنایع خودروسازی و صنایع نظامی و اهمیت موضوع بازده در این صنایع، در این پایان‌نامه روش کنترلی برای ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی پیشنهاد شده است.

در این پایان‌نامه یک سیستم تولید توان ترکیبی پیل سوختی-باتری در نظر گرفته شده است. برای کنترل سیستم از مبدل DC-DC افزاینده استفاده شده است. روش کنترلی پیشنهادی برای ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی شامل دو بخش کنترل میزان سوخت ورودی (هیدروژن) و کنترل جریان پیل سوختی با استفاده از الگوریتم اغتشاش و مشاهده می‌باشد. این روش کنترلی به ازای شرایط مختلف به سیستم مورد نظر اعمال شده است. بازده سیستم در حالت کنترل شده و کنترل نشده مقایسه شده و نتایج بهبود بازده پیل سوختی در سیستم تولید توان ترکیبی را تأیید می‌کند. شبیه‌سازی و کنترل سیستم در محیط نرم‌افزاری Matlab/Simulink انجام شده است.

کلمات کلیدی: پیل سوختی، باتری، ردیابی حداکثر بازده، الگوریتم اغتشاش و مشاهده، کنترل

سوخت

مقالات مستخرج از پایان نامه :

❖ فهیمه روح الامینی، امین حاجی زاده و سید مهدی رخت اعلا، " ردیابی حداکثر بازده در سیستم‌های تولید توان پیل سوختی"، کنفرانس ملی تولید برق همزمان با حرارت و برودت و سیستم‌های هیبریدی CCHP 2013، پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، شهریور ۹۲

فهرست مطالب

عناوین	صفحه
۱- فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- تاریخچه.....	۳
۱-۳- تعریف پیل سوختی	۵
۱-۴- انواع پیل سوختی	۷
۱-۴-۱- پیل سوختی با غشای تبادل یونی (PEMFC).....	۹
۱-۴-۱-۱- بررسی طرز کار پیل سوختی با غشای تبادل یونی.....	۹
۱-۴-۱-۲- پیل سوختی قلیایی (AFC).....	۹
۱-۴-۱-۲-۱- بررسی طرز کار پیل سوختی قلیایی.....	۱۰
۱-۴-۱-۳- پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC).....	۱۱
۱-۴-۱-۳-۱- بررسی طرز کار پیل سوختی اسید فسفریک.....	۱۱
۱-۴-۱-۴- پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC).....	۱۱
۱-۴-۱-۴-۱- بررسی طرز کار پیل سوختی کربنات مذاب.....	۱۱
۱-۴-۱-۵- پیل سوختی اکسید جامد (SOFC).....	۱۲
۱-۴-۱-۵-۱- بررسی طرز کار پیل سوختی اکسید جامد.....	۱۲
۱-۵- مزایای پیل سوختی.....	۱۳

۱-۵-۱- بازدهی بالا.....	۱۳
۱-۵-۲- تنظیم سیستم برحسب نیاز.....	۱۳
۱-۵-۳- سازگاری با قوانین زیست محیطی.....	۱۴
۱-۵-۴- انعطاف پذیری نسبت به سوخت.....	۱۴
۱-۵-۵- افزایش تولید و کاهش توزیع انرژی.....	۱۴
۱-۵-۶- قابلیت ترکیب شدن با سیستم های دیگر و تولید انرژی با استفاده از گرمای خروجی پیل سوختی.....	۱۵
۱-۵-۷- عدم نیاز به تعمیر.....	۱۵
۱-۶- معایب پیل سوختی	۱۵
۱-۷- اهمیت موضوع پایان نامه	۱۶
۲- فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده قبلی در ارتباط با ردیابی حداکثر بازده پیل های سوختی.....	۱۹
۲-۱- مقدمه.....	۲۰
۲-۲- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی با کنترل جریان پیل سوختی.....	۲۰
۲-۳- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی با کنترل هوا.....	۲۴
۲-۴- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی با کنترل شارش اکسیژن.....	۲۹
۲-۵- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی با ردیابی حداکثر توان.....	۳۱
۳- فصل سوم: طراحی و مدل سازی سیستم تولید توان پیل سوختی، باتری و مبدل DC-DC افزاینده.....	۳۳
۳-۱- مقدمه.....	۳۴
۳-۲- مدل سازی پیل سوختی با غشای تبادل یونی	۳۴
۳-۳- ولتاژ پیل سوختی	۳۶

۳۹	۳-۳-۱- تأثیر فشار بر ولتاژ مدار باز
۴۱	۳-۳-۲- تأثیر دما بر ولتاژ مدار باز
۴۱	۳-۴-۱- انواع تلفات در پیل‌های سوختی
۴۱	۳-۴-۱- تلفات برانگیختگی
۴۲	۳-۴-۲- تلفات اهمی
۴۳	۳-۴-۳- تلفات انتقال یا تراکم
۴۴	۳-۵- تعریف بازده و توان
۴۵	۳-۶- باتری
۴۵	۳-۶-۱- حالت شارژ باتری
۴۶	۳-۶-۲- مدل باتری
۴۸	۳-۶-۳- انواع باتری
۴۸	۳-۶-۳-۱- باتری اسید سربی
۴۸	۳-۶-۳-۲- باتری نیکل - کادمیوم
۴۸	۳-۶-۳-۳- باتری هیدرید نیکل - فلز
۴۹	۳-۶-۳-۴- باتری لیتیومی
۵۱	۳-۷- مبدل DC-DC
۵۱	۳-۷-۱- مدل‌سازی مبدل افزایشنده
۵۵	۳-۷-۱-۱- ریپل ولتاژ و جریان
۵۵	۳-۷-۱-۱-۱- ریپل جریان سلف در مبدل Boost

۵۶	Boost در مبدل
۶۱	 فصل چهارم: معرفی کنترل کننده پیشنهادی برای ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی
۶۲	 ۱-۴- مقدمه
۶۲	 ۲-۴- کنترل جریان پیل سوختی با استفاده از الگوریتم اغتشاش و مشاهده
۶۴	 ۳-۴- کنترل میزان سوخت ورودی پیل سوختی
۶۷	 ۵- فصل پنجم: نتایج شبیه سازی
۶۸	 ۱-۵- مقدمه
۶۸	 ۲-۵- پیاده سازی مدل پیل سوختی در سیمولینک
۷۲	 ۳-۵- مشخصه ی پیل سوختی
۷۴	 ۱-۳-۵- تأثیر دما و فشار هیدروژن بر منحنی ولتاژ - جریان پیل سوختی
۷۵	 ۴-۵- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی در سیستم تولید توان، شامل: پیل سوختی، مبدل افزایشنده و بار
۸۱	 ۵-۵- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی در سیستم تولید توان، شامل: پیل سوختی، مبدل افزایشنده، باتری و بار
۸۹	 ۱-۵-۵- تأثیر مقدار اغتشاش الگوریتم اغتشاش و مشاهده بر همگرایی
۹۰	 ۲-۵-۵- تأثیر دما و فشار هیدروژن بر بازده پیل سوختی و بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در حالت جدید
۹۲	 ۶-۵- ردیابی حداکثر توان پیل سوختی در سیستم تولید توان، شامل: پیل سوختی، مبدل افزایشنده، باتری و بار
۹۵	 ۶- فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۶	 ۱-۶- نتیجه گیری
۹۷	 ۲-۶- پیشنهادات
۹۹	 مراجع

فهرست اشکال

عناوین	صفحه
شکل ۱-۱ نمونه‌ای از کاربردهای پیل سوختی.....	۳
شکل ۲-۱ شرح فرآیند الکتروشیمیایی در پیل سوختی.....	۵
شکل ۱-۲ سیستم پیشنهادی.....	۲۰
شکل ۲-۲ سیستم کنترل MEPT پیل سوختی.....	۲۲
شکل ۳-۲ (الف) و (ب) پاسخ کنترل کننده MEPT به تغییرات شارش سوخت.....	۲۳
شکل ۴-۲ ارتباط بازده پیل سوختی با نسبت اکسیژن اضافی در جریان‌های مختلف پیل سوختی.....	۲۴
شکل ۵-۲ طرح یک سیستم کنترل MEPT.....	۲۵
شکل ۶-۲ گام‌های تغییر در جریان پشته.....	۲۸
شکل ۷-۲ پاسخ بازده سیستم.....	۲۸
شکل ۸-۲ عملکرد الگوریتم با گام ثابت.....	۳۰
شکل ۹-۲ عملکرد الگوریتم با گام متغیر.....	۳۰
شکل ۱۰-۲ مقایسه نتایج آزمایش بین الگوریتم با گام ثابت و بدون اعمال الگوریتم در شرایط تغییر بار از ۱۵ A به A.....	۲۵
شکل ۱۱-۲ مقایسه نتایج آزمایش بین الگوریتم با گام متغیر و با گام ثابت در شرایط تغییر بار از ۱۵ A به ۲۵ A.....	۳۱
شکل ۱۲-۲ منحنی بازده - چگالی توان، درجه حرارت ۳۲۳ درجه کلوین و غلظت متانول از ۰/۷۵ به ۱/۵ مولار متغیر.....	۳۲
شکل ۱-۳ مشخصه ولتاژ - جریان پیل سوختی.....	۴۴
شکل ۲-۳ مدل باتری.....	۴۶

- شکل ۳-۳ منحنی ولتاژ - ظرفیت باتری ۴۷
- شکل ۴-۳ منحنی تغییرات ولتاژ ترمینال باتری در اثر تخلیه باتری در سه جریان مختلف ۴۷
- شکل ۵-۳ چگالی توان و انرژی براساس نوع باتری ۵۰
- شکل ۶-۳ پیشرفت در چگالی انرژی در سه نوع باتری با سال ۵۰
- شکل ۷-۳ مبدل Boost ۵۲
- شکل ۸-۳ ولتاژ دو سر سوئیچ در مبدل Boost ۵۲
- شکل ۹-۳ مبدل Boost در حالت باز و بسته بودن سوئیچ ۵۳
- شکل ۱۰-۳ حالت جریان پیوسته برای جریان سلف در مبدل Boost ۵۳
- شکل ۱۱-۳ ولتاژ دو سر سلف در دو حالت سوئیچ بسته و باز ۵۴
- شکل ۱۲-۳ ریپل ولتاژ خروجی مبدل Boost ۵۶
- شکل ۱۳-۳ ولتاژ و جریان سلف در حالت مرزی در مبدل Boost ۵۷
- شکل ۱-۴ منحنی بازده - جریان پیل سوختی ۶۲
- شکل ۲-۴ الگوریتم اغتشاش و مشاهده ۶۳
- شکل ۳-۴ مدل ریفرمر و کنترل کننده ۶۵
- شکل ۱-۵ بلوک پیل سوختی ۶۹
- شکل ۲-۵ زیر بلوک q_{H_2} ۷۰
- شکل ۳-۵ زیر بلوک P_{H_2} ۷۰
- شکل ۴-۵ زیر بلوک P_{H_2O} ۷۰
- شکل ۵-۵ زیر بلوک P_{O_2} ۷۰

- شکل ۵-۶ سیستم ترکیبی پیل سوختی - باتری شبیه‌سازی شده در محیط سیمولینک ۷۱
- شکل ۵-۷ منحنی جریان - زمان ۷۲
- شکل ۵-۸ منحنی ولتاژ - جریان ۷۲
- شکل ۵-۹ منحنی توان - جریان ۷۳
- شکل ۵-۱۰ منحنی بازده - جریان ۷۳
- شکل ۵-۱۱ منحنی ولتاژ - جریان در دماهای مختلف ۷۴
- شکل ۵-۱۲ منحنی ولتاژ - جریان در فشارهای مختلف هیدروژن ۷۵
- شکل ۵-۱۳ پروفایل بار ۷۵
- شکل ۵-۱۴ (الف) ولتاژ بار، (ب) جریان بار و (ج) توان بار ۷۶
- شکل ۵-۱۵ (الف) ولتاژ پیل سوختی، (ب) جریان پیل سوختی، (ج) توان خروجی پیل سوختی، (د) توان سوخت ورودی پیل و (و) بازده پیل سوختی ۷۷
- شکل ۵-۱۶ (الف) فلوی هیدروژن، (ب) فشار جزئی هیدروژن، (ج) فشار جزئی آب و (د) فشار جزئی اکسیژن ۷۸
- شکل ۵-۱۷ (الف) ولتاژ بار، (ب) جریان بار و (ج) توان بار ۷۸
- شکل ۵-۱۸ (الف) ولتاژ پیل سوختی، (ب) جریان پیل سوختی، (ج) توان خروجی پیل سوختی، (د) توان سوخت ورودی پیل و (و) بازده پیل سوختی ۷۹
- شکل ۵-۱۹ (الف) فلوی هیدروژن، (ب) فشار جزئی هیدروژن، (ج) فشار جزئی آب و (د) فشار جزئی اکسیژن ۸۰
- شکل ۵-۲۰ وضعیت سوئیچ مبدل در حالت MEPT ۸۱
- شکل ۵-۲۱ پروفایل بار ۸۲
- شکل ۵-۲۲ بازده پیل سوختی در سیستم بدون باتری ۸۲

- شکل ۵-۲۳ بازده پیل سوختی در سیستم با باتری ۸۲
- شکل ۵-۲۴ بازده پیل سوختی ۸۳
- شکل ۵-۲۵ بازده پیل سوختی ۸۳
- شکل ۵-۲۶ (الف) ولتاژ بار، (ب) جریان بار و (ج) توان بار ۸۴
- شکل ۵-۲۷ (الف) SOC، (ب) ولتاژ باتری، (ج) جریان باتری و (د) توان باتری ۸۵
- شکل ۵-۲۸ (الف) ولتاژ پیل سوختی، (ب) جریان پیل سوختی، (ج) توان خروجی پیل سوختی و (د) توان سوخت ورودی پیل سوختی ۸۵
- شکل ۵-۲۹ (الف) فلوی هیدروژن، (ب) فشار جزئی هیدروژن، (ج) فشار جزئی آب و (د) فشار جزئی اکسیژن ۸۶
- شکل ۵-۳۰ (الف) ولتاژ بار، (ب) جریان بار و (ج) توان بار ۸۷
- شکل ۵-۳۱ (الف) SOC، (ب) ولتاژ باتری، (ج) جریان باتری و (د) توان باتری ۸۷
- شکل ۵-۳۲ (الف) ولتاژ پیل سوختی، (ب) جریان پیل سوختی، (ج) توان خروجی پیل سوختی و (د) توان سوخت ورودی پیل سوختی ۸۸
- شکل ۵-۳۳ (الف) فلوی هیدروژن، (ب) فشار جزئی هیدروژن، (ج) فشار جزئی آب و (د) فشار جزئی اکسیژن ۸۸
- شکل ۵-۳۴ وضعیت سوئیچ مبدل در حالت MEPT ۸۹
- شکل ۵-۳۵ تأثیر مقدار اغتشاش بر همگرایی ۸۹
- شکل ۵-۳۶ منحنی بازده - جریان پیل سوختی در دو دمای مختلف T_1 , T_2 ۹۱
- شکل ۵-۳۷ منحنی بازده - زمان در یک بار مشخص با اعمال کنترل کننده MEPT و بدون اعمال کنترل کننده (در دمای T_2) ۹۱
- شکل ۵-۳۸ منحنی بازده - جریان پیل سوختی در دو فشار هیدروژن مختلف P_1 , P_2 ۹۱

شکل ۳۹-۵ منحنی بازده - زمان در یک بار مشخص با اعمال کنترل کننده MEPT و بدون اعمال کنترل کننده (در

فشار P_2)..... ۹۲

شکل ۴۰-۵ توان خروجی پیل سوختی..... ۹۳

فهرست جداول

عناوین	صفحه
جدول ۱-۱ واکنش شیمیایی در پیل‌های سوختی.....	۷
جدول ۲-۱ مشخصات اصلی انواع پیل‌های سوختی.....	۸
جدول ۱-۳ پارامترهای مدل‌سازی.....	۳۴
جدول ۲-۳ حالت‌های $\Delta \bar{g}_f$ برای دماهای مختلف.....	۳۷
جدول ۳-۳ مقایسه فنی براساس نوع باتری‌ها.....	۵۰
جدول ۴-۳ مشخصات باتری لیتیم - یون.....	۵۱
جدول ۵-۳ المان‌های مبدل افزاینده.....	۵۹
جدول ۱-۵ پارامترهای شبیه‌سازی پیل سوختی.....	۶۸

١- فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

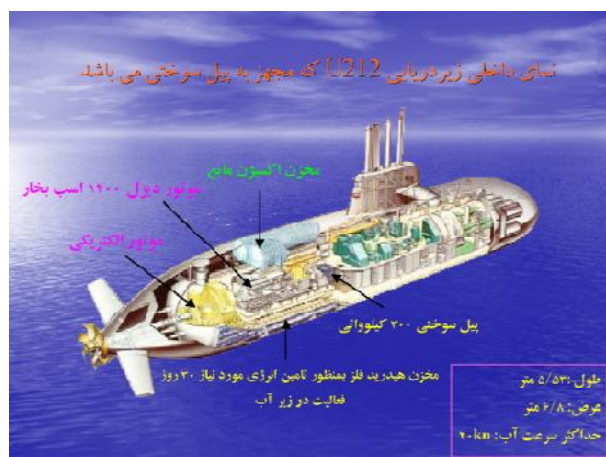
بحران انرژی در سال‌های اخیر و آلودگی فزاینده محیط زیست، کشورهای صنعتی را بر آن داشت که تا جهت استفاده از سیستم‌هایی با راندمان بالا و سازگار با محیط زیست سرمایه‌گذاری کلانی نمایند. سیستم‌های پیل سوختی از جمله تکنولوژی‌های پیشرفته‌ایست که مصارف غیرنظامی آن با توان‌های میلی‌وات تا مگاوات موضوع تحقیق شرکت‌های تولید برق، خودروسازی و نیز شرکت‌های نفتی قرار گرفته است. نمونه‌ای از کاربردهای پیل سوختی در شکل ۱-۱ آورده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱-۱- نمونه‌ای از کاربردهای پیل سوختی [۱] و [۲]

۲-۱- تاریخچه

اگرچه پیل سوختی به تازگی به عنوان یکی از راهکارهای تولید انرژی الکتریکی مطرح شده است. ولی تاریخچه آن به قرن نوزدهم و کار دانشمند انگلیسی سرویلیام گرو^۱ بر می‌گردد. او اولین پیل سوختی را در سال ۱۸۳۹ با سرمشق گرفتن از واکنش الکترولیز آب، طی واکنش معکوس و در حضور کاتالیست پلاتین ساخت. واژه "پیل سوختی" در سال ۱۸۸۹ توسط لودویک مند^۲ و چارلز لنجر^۳ به کار گرفته شد. آنها نوعی پیل سوختی که هوا و سوخت ذغال‌سنگ را مصرف می‌کرد، ساختند. تلاش‌های متعددی در اوایل قرن بیستم در جهت توسعه پیل سوختی انجام شد. که به دلیل عدم درک علمی مسئله هیچ یک موفقیت‌آمیز نبود. علاقه به استفاده از پیل سوختی با کشف سوخت‌های فسیلی ارزان و رواج موتورهای بخار کم رنگ گردید. فصلی دیگر از تاریخچه تحقیقات پیل سوختی توسط فرانسیس بیکن^۴ در دانشگاه کمبریج انجام شد. او در سال ۱۹۳۲ بر روی ماشین ساخته شده توسط مند و لنجر اصلاحات بسیاری انجام داد. این اصلاحات شامل جایگزینی کاتالیست گران‌قیمت پلاتین با نیکل و همچنین استفاده از پتاسیم هیدروکسید قلیایی به جای اسید سولفوریک،

¹ Sir William Grove

² Ludwig Mond

³ Charles Langer

⁴ Francis Bacon

به دلیل مزیت عدم خورندگی آن می‌باشد. این اختراع که اولین پیل سوختی قلیایی بود - "Bacon Cell" نامیده شد. او ۲۷ سال تحقیقات خود را ادامه داد؛ تا توانست یک پیل سوختی کامل و کارا ارائه نماید. بیکن در سال ۱۹۵۹ پیل سوختی با توان ۵ کیلووات را تولید نمود؛ که می‌توانست نیروی محرکه یک دستگاه جوشکاری را تأمین نماید.

تحقیقات جدید در این عرصه از اوایل دهه ۶۰ میلادی با اوج‌گیری فعالیت‌های مربوط به تسخیر فضا توسط انسان آغاز شد. مرکز تحقیقات ناسا در پی تأمین نیرو جهت پروازهای فضایی با سرنشین بود. ناسا پس از رد گزینه‌های موجود نظیر باتری (به علت سنگینی)، انرژی خورشیدی (به علت گران بودن) و انرژی هسته‌ای (به علت ریسک بالا) پیل سوختی را انتخاب نمود. تحقیقات در این زمینه به ساخت پیل سوختی پلیمری توسط شرکت جنرال الکتریک منجر شد. پرت^۱ و ویتنی^۲ دو سازنده موتور هواپیما، پیل سوختی قلیایی بیکن را به منظور کاهش وزن و افزایش طول عمر اصلاح نموده و آن را در برنامه فضایی آپولو به کار بردند. در هر دو پروژه پیل سوختی به عنوان منبع انرژی الکتریکی برای فضاپیما استفاده شد. اما در پروژه آپولو پیل سوختی برای فضانوردان آب آشامیدنی نیز تولید می‌کرد. پس از کاربرد پیل‌های سوختی در این پروژه‌ها، دولت‌ها و شرکت‌ها به این فناوری جدید به عنوان منبع مناسبی برای تولید انرژی پاک در آینده توجه روزافزونی نشان دادند. از سال ۱۹۷۰ فناوری پیل سوختی برای سیستم‌های زمینی توسعه یافت. تحریم نفتی از سال ۱۹۷۳-۱۹۷۹ موجب تشدید تلاش دولت مردان امریکا و محققین در توسعه این فناوری به جهت قطع وابستگی به واردات نفتی گشت. در طول دهه ۸۰ تلاش محققین بر تهیه مواد مورد نیاز، انتخاب سوخت مناسب و کاهش هزینه استوار بود. همچنین اولین محصول تجاری جهت تأمین نیرو محرکه خودرو در سال ۱۹۹۳ توسط شرکت بلارد ارائه شد [۳].

¹ Partt

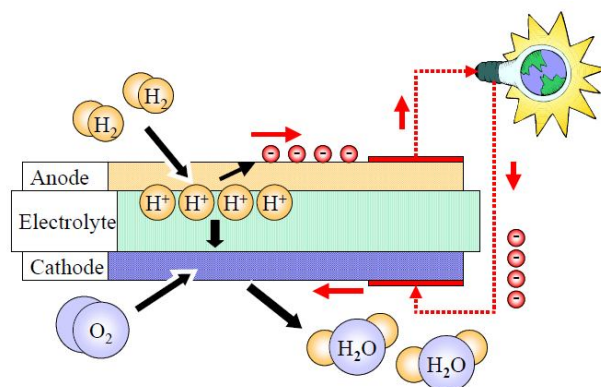
² Whitney

۱-۳- تعریف پیل سوختی

پیل‌های سوختی جریان مستقیم الکتریکی را از طریق یک فرآیند الکتروشیمیایی همانند باطری تولید می‌کنند. با این تفاوت که واکنش‌دهنده‌ها به طور مداوم جایگزین می‌شوند. واکنش‌دهنده‌ها اکسیژن و هیدروژن می‌باشند. و توان تا زمانی که این واکنش‌دهنده‌ها تأمین می‌شوند، تولید می‌شود. هیدروژن مورد نیاز از سوخت‌های هیدروکربنی مثل گازهای طبیعی یا LPG^۱ تولید می‌شود. اکسیژن مورد نیاز از هوا تأمین می‌شود. سیستم پیل سوختی شامل سه زیرسیستم اصلی می‌باشد:

۱. مبدل سوخت یا ریفرمر^۲: که گاز طبیعی را به هیدروژن تبدیل می‌کند.
۲. پشته^۳ پیل سوختی: که جریان مستقیم الکتریکی را تولید می‌کند.
۳. سیستم‌های تهویه، کمپرسور و فرآیندهایی که انرژی الکتریکی را به سمت جریان متناوب یا تنظیم جریان مستقیم سوق می‌دهند.

شکل ۱-۲ فرآیند الکتروشیمیایی در پیل سوختی (PEMFC^۴, PAFC^۵) را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- شرح فرآیند الکتروشیمیایی در پیل سوختی [۴]

^۱ Liquefied Petroleum Gas

^۲ Reformer

^۳ Stack

^۴ Proton Exchange Membrane or Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

^۵ Phosphoric Acid Fuel Cell

پیل سوختی شامل کاتد، آند و الکترولیت می‌باشد. شکل ۱-۲ سلول متصل شده به یک بار خارجی را نشان می‌دهد. آند ارتباط بین سوخت و الکترولیت و کاتالیست را فراهم می‌کند؛ همچنین یک مسیر را که از طریق آن الکترون‌های آزاد از طریق یک مدار خارجی به بار متصل می‌شوند را فراهم می‌کند. کاتد ارتباط بین اکسیژن و الکترولیت و کاتالیست را فراهم می‌کند؛ همچنین یک مسیر را که از طریق آن الکترون‌های آزاد از طریق یک مدار خارجی به بار متصل می‌شوند را فراهم می‌کند. الکترولیت یک رسانای یونی متوسط می‌باشد (نه رسانای الکتریکی)؛ به عنوان جداکننده بین اکسیژن و هیدروژن عمل می‌کند. الکترولیت با انتقال یون‌های هیدروژن از آند به کاتد یک مدار الکتریکی را کامل می‌کند. اکسیژن و هیدروژن در آند و کاتد تغذیه می‌شوند. گازهای اکسیژن و هیدروژن با هم مخلوط نمی‌شوند؛ و از طرفی احتراق مستقیم نیز اتفاق نمی‌افتد. در عوض هیدروژن با کمک یک کاتالیزور اکسید می‌شود؛ و از آنجایی که واکنش در دماهای بسیار بالا انجام نمی‌شود هیچ فرصتی برای تشکیل گاز NO_x وجود ندارد. در آند گاز هیدروژن در حضور کاتالیست به یون‌های هیدروژن (H^+) و الکترون‌های آزاد (e^-) تبدیل می‌شود.

واکنش در آند:



الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی جاری می‌شوند. یون‌های هیدروژن در لایه‌های الکترولیت و در نهایت به سمت کاتد جاری می‌شود. در کاتد گاز اکسیژن با یون‌های هیدروژن در حضور کاتالیزور ترکیب می‌شود و حرارت و آب تولید می‌کند.

واکنش در کاتد:



واکنش کلی در پیل سوختی به صورت رابطه ۳-۱ می‌باشد:



مقدار کار انجام شده برابر با تفاوت انرژی آزاد گیبس^۱ محصولات و واکنش‌دهنده‌ها می‌باشد. واکنش در سمت آند و کاتد برای انواع پیل‌های سوختی (که در ادامه توضیح داده شده‌اند) در جدول ۱-۱ آمده است.

جدول ۱-۱- واکنش شیمیایی در پیل‌های سوختی [۵]

واکنش کاتد	واکنش آند	پیل سوختی
$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	پیل سوختی با غشای تبادل یونی و پیل سوختی اسید فسفریک
$1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	پیل سوختی قلیایی
$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	پیل سوختی کربنات مذاب
$1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	پیل سوختی اکسید جامد

هنگامی توان تولید می‌شود که الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی جریان می‌یابند و یون‌ها از طریق لایه‌های الکترولیت جاری می‌شوند و مواد شیمیایی به داخل و خارج الکترودها جاری می‌شوند [۴].

۴-۱- انواع پیل سوختی

پیل‌های سوختی بر اساس نوع الکترولیت به کار رفته به انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. پنج نوع اولیه‌ی پیل‌های سوختی وجود دارند. دو تا از این پیل‌های سوختی، یکی پیل سوختی با غشای تبادل یونی یا پلیمری (PEMFC) و دیگری پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)

^۱ انرژی آزاد گیبس میزان خود به خودی انجام شدن یک واکنش را بیان می‌کند.

الکترولیت‌هایی اسیدی دارند، که یون متحرک آنها H^+ می‌باشد. دو نوع دیگر پیل سوختی قلیایی (AFC)^۱ و پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)^۲ الکترولیت‌هایی پایه دارند، که یون متحرک آنها OH^- و $CO_3^{=}$ می‌باشد. و نوع پنجم، پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)^۳ می‌باشد که $O^{=}$ یون متحرک آن می‌باشد. در جدول ۱-۲ مشخصات اصلی برای هر پنج نوع پیل سوختی آورده شده است [۴].

جدول ۱-۲- مشخصات اصلی انواع پیل‌های سوختی [۴]

	PAFC	PEMFC	AFC	MCFC	SOFC
charge carrier and Type of Electrolyte	H^+ ions (H_3PO_4 Phosphoric acid Solutions)	H^+ ions (white anion bound in polymer membrane)	OH^- ions (typically, aqueous KOH solution)	$CO_3^{=}$ ions (typically, molten $LiKCO_3$ eutectics)	$O^{=}$ ions (Stabilized zirconia ceramic matrix with free oxide ions)
Typical Construction	Carbon, Porous ceramics	Plastic metal or carbon	Plastic, metal	High temp metals, Porous ceramic	Ceramic, high temp metals
Internal reforming	No	NO	NO	Yes, good temp match	Yes, good temp match
Oxidant	Air or Oxygen Enriched Air	Air or O_2	Purified Air or O_2	Air	Air
Operational Temperature	370 - 410°F (190-210°C)	150-180°F (65-85°C)	190-500°F (90-260°C)	1200-1300°F (650-700°C)	1350-1850°F (750-1000°C)
Primary Contaminant Sensitivities	$CO > 1\%$ Sulfur	CO , Sulfur and NH_3	CO , CO_2 , and Sulfur	Sulfur	Sulfur

¹ Alkaline Fuel Cell

² Molten Carbonate Fuel Cell

³ Solid Oxide Fuel Cell

۱-۴-۱- پیل سوختی با غشای تبادل یونی (PEMFC)

این پیل از یک الکترولیت پلیمر جامد استفاده می‌کند. و در یک دمای پایین در حدود ۱۵۰ - ۱۸۰ درجه فارنهایت عمل می‌کند. کوچک و سبک می‌باشد. زمان راه‌اندازی سریع و بهترین پاسخ گذرا را در میان پیل‌های سوختی دارد. و دارای بازده الکتریکی نسبتاً کم ۳۰ تا ۴۰ درصد در مقایسه با دیگر فناوری‌های پیل سوختی می‌باشد. این نوع پیل سوختی بسیار حساس به منواکسیدکربن می‌باشد. و این بدان معنی است که باید یک مراقبت ویژه از پیل سوختی به عمل آید. تا تقریباً تمام مونواکسیدکربن حذف گردد [۴].

۱-۴-۱-۱- بررسی طرز کار پیل سوختی با غشای تبادل یونی

مرحله اول: در این مرحله اکسیژن و هیدروژن به صورت گازی به محیط‌های کاتالیزوری کاتد و آند وارد می‌شوند. مرحله دوم: به محض اینکه مولکول‌های گاز هیدروژن به کاتالیست آند برخورد می‌کنند، به پروتون‌های مثبت و الکترون‌های منفی شکافته می‌شوند. مرحله سوم: در این مرحله پروتون‌های هیدروژن از الکترولیت (غشا) عبور می‌کنند. مرحله چهارم: الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی به سمت کاتد جاری می‌شوند و به این صورت جریان الکتریسیته برقرار می‌شود. مرحله پنجم: در مرحله پنجم، الکترون‌ها به مولکول‌های اکسیژن می‌پیوندند. مرحله ششم: در مرحله نهایی اکسیژن‌های دارای بار منفی با پروتون‌های هیدروژن ترکیب شده و آب به عنوان خروجی این فرآیند تولید انرژی الکتریکی، تولید می‌گردد [۶].

۱-۴-۲- پیل سوختی قلیایی (AFC)

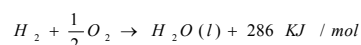
بیکن در کمبریج انگلستان، برای اولین بار در طی سال‌های ۱۹۴۰ - ۱۹۵۰ AFC ها را به عنوان واحدهای توان بادوام اثبات کرده است. سپس آنها برای ناسا تولید شدند. و بر روی فضاپیمای آپولو مورد استفاده قرار گرفتند. آنها همچنین بروی شاتل‌های فضایی برای تأمین توان اولیه استفاده

می‌شوند. AFC ها از پتاسیم هیدروکسید قلیایی به عنوان الکترولیت استفاده می‌کنند. از مزیت‌های این نوع پیل سوختی بازده زیاد ۶۰ درصد (حداکثر ارزش حرارتی هیدروژن^۱) و استفاده از فلزهای بی‌ارزش می‌باشد. از معایب آن تمایل به جذب دی‌اکسیدکربن و تبدیل الکترولیت قلیایی به یک الکترولیت کربنات آبی می‌باشد. که موجب کاهش رسانایی می‌گردد. در کاربردهای فضایی که از هیدروژن و اکسیژن تصفیه شده استفاده می‌کنند؛ آلودگی با دی‌اکسیدکربن به عنوان یک مشکل مطرح نمی‌باشد. جاذبه به سمت AFC ها به دلیل پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی PEMFC ها کاهش یافته است [۴].

۱-۴-۲-۱- بررسی طرز کار پیل سوختی قلیایی

مرحله اول: گازهای اکسیژن و هیدروژن به صورت جدا وارد محوطه کاتالیزوری می‌شوند (اکسیژن در سمت کاتد و هیدروژن در سمت آند). مرحله دوم: در تماس هیدروژن با کاتالیزور، مولکول‌های هیدروژن به یون‌های هیدروژن مثبت و الکترون‌های منفی شکافته می‌شود. مرحله سوم: الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی به سمت کاتد جاری می‌شوند. و به این طریق جریان الکتریسیته ایجاد می‌شود. مرحله چهارم: به ترتیب هر چهار الکترون با یک مولکول اکسیژن (دو اتم اکسیژن) در کاتد ترکیب می‌شود. و یون‌های منفی اکسیژن با آب ترکیب شده و تولید یون منفی می‌کند. مرحله پنجم: یون‌های منفی از الکترولیت عبور کرده و با پروتون‌های هیدروژن ترکیب می‌گردد، که این واکنش گرمازا است. بدین صورت خروجی این پیل سوختی آب و گرما می‌باشد [۶].

^۱ چنانچه یک مول هیدروژن و نیم مول اکسیژن در یک کالری متر احتراق کامل صورت گیرد و مخلوط در فشار اتمسفر تا دمای ۲۵ درجه سانتیگراد خنک گردد، در این حالت فقط آب مایع در مخزن باقی می‌ماند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که ۲۸۶ کیلوژول گرما آزاد شده است. این گرما ارزش حرارتی حد بالای هیدروژن است.



۱-۴-۳- پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)

این پیل از اسید فسفریک به عنوان الکترولیت استفاده می‌کند. قابلیت بازده ۳۶ درصد (حداکثر ارزش حرارتی هیدروژن) یا بیشتر را دارند. با توجه به هزینه‌ی بالا، PAFC ها از مرحله تولیدات تجاری خارج می‌شوند [۴].

۱-۴-۳-۱- بررسی طرز کار پیل سوختی اسید فسفریک

این پیل‌ها مانند پیل سوختی با غشای تبادل یونی کار می‌کنند؛ با این تفاوت که الکترولیت آنها اسید فسفریک با غلظت بالا می‌باشد [۶].

۱-۴-۴- پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)

MCFC ها از کربنات فلزهای قلیایی (پتاسیم، سدیم و لیتیم) به عنوان الکترولیت استفاده می‌کنند. این نوع پیل سوختی در برابر ناخالصی‌ها نسبتاً مقاوم است، مخصوصاً منواکسیدکربن. مسئله‌ای که برای MCFC ها مطرح می‌باشد تخریب اجزا پیل به دلیل ماهیت خورنده الکترولیت در دمای عملکرد بالا می‌باشد [۴].

۱-۴-۴-۱- بررسی طرز کار پیل سوختی کربنات مذاب

مرحله اول: در این مرحله اکسیژن وارد فضای کاتدی و هیدروژن وارد فضای آندی می‌شود. گازهای تأمین‌کننده عبارتند از: اکسیژن، هیدروژن و دی‌اکسیدکربن مرحله دوم: مولکول‌های هیدروژن به پروتون‌های مثبت شکافته شده و الکترون‌های آنها آزاد می‌شود. مرحله سوم: الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی به سمت کاتد جاری می‌شوند و جریان برق تولید می‌کنند. مرحله چهارم: الکترون‌ها (چهار الکترون) جذب مولکول اکسیژن (دو اتم اکسیژن) می‌شوند. و یون‌های اکسیژن با بار منفی تولید می‌شود. مرحله پنجم: در این مرحله دی‌اکسیدکربن وارد فضای کاتدی می‌شود و با

یون‌های اکسیژن دارای بار منفی ترکیب شده و تولید یون‌های کربنات با بار منفی (CO_3) می‌کند. مرحله ششم: یون‌های کربنات با بار منفی از الکترولیت عبور کرده و وارد فضای آند می‌شوند. مرحله هفتم: در این مرحله یون‌های کربنات منفی و پروتون‌های هیدروژن مثبت ترکیب شده و تولید آب و دی‌اکسیدکربن می‌کنند، مولکول‌های دی‌اکسیدکربن جهت استفاده مجدد بازیافت شده و آب از پیل سوختی خارج می‌گردد [۶].

۱-۴-۵- پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)

SOFC از یک الکترولیت اکسید فلز جامد و غیرمتخلخل استفاده می‌کند. بازدهی بالا، قابلیت اطمینان بالا، پایداری و دمای داخلی بالا آن را از دیگر پیل‌های سوختی متمایز می‌کند. بازده الکتریکی آن بین ۴۵ تا ۶۰ درصد می‌باشد. پایداری و قابلیت اطمینان SOFC ها زیاد می‌باشد. و این به دلیل ساختار سرامیکی بسیار محکم آنها می‌باشد. حرارت زیاد مشکلاتی را در طراحی مکانیکی و طراحی مواد می‌افزاید که از عمر پشته می‌کاهد و هزینه را افزایش می‌دهد [۴].

۱-۴-۵-۱- بررسی طرز کار پیل سوختی اکسید جامد

مرحله اول: پس از ریفرمرینگ گاز طبیعی به هیدروژن، اکسیژن و هیدروژن به صورت گازی به نواحی کاتالیزوری کاتد و آند هدایت می‌شوند. مرحله دوم: به محض تماس مولکول‌های هیدروژن با کاتالیست، مولکول‌های هیدروژن به پروتون‌های مثبت هیدروژن شکافته شده و الکترون‌های آزاد از آنها خارج می‌گردد. مرحله سوم: الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی به سمت کاتد جاری می‌شوند. مرحله چهارم: در این مرحله چهار الکترون جذب یک مولکول اکسیژن (دو اتم اکسیژن) شده و یون‌های اکسیژن دارای بار منفی با عبور از الکترولیت به فضای آندی راه می‌یابند. مرحله ششم: یون‌های اکسیژن با دو پروتون هیدروژن ترکیب و آب تولید می‌شود [۶].

از دیگر انواع پیل‌های سوختی می‌توان موارد زیر را نام برد:

پیل سوختی احیاکننده، پیل سوختی متانول بهسازی‌شده، پیل سوختی کربنی مستقیم، پیل سوختی الکتروگالوانی، پیل سوختی بروهیدرید مستقیم، پیل سوختی اتانولی مستقیم، پیل سوختی هیبرید فلزی، پیل سوختی متانولی، پیل سوختی سرامیکی پروتونی، پیل سوختی هوا - روی، پیل سوختی میکروبی و پیل سوختی اسید فرمیک

۱-۵- مزایای پیل سوختی

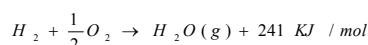
۱-۵-۱- بازدهی بالا

پیل‌های سوختی از قوانین حاکم بر ماشین‌های گرمایی تبعیت نمی‌کنند؛ از این رو بازدهی آنها به سه برابر ماشین‌های گرمایی می‌رسد. براساس نوع و طراحی، بازدهی الکتریکی پیل‌های سوختی حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد (کمترین ارزش حرارتی هیدروژن^۱) می‌باشد. بازدهی پیل‌های سوختی ثابت و مستقل از اندازه‌ی آنها می‌باشد. وقتی که از گرمای خروجی آنها نیز استفاده می‌شود، بازدهی تقریباً ۸۵ درصد می‌باشد.

۱-۵-۲- تنظیم سیستم برحسب نیاز

پیل‌های سوختی بسیار انعطاف‌پذیر هستند. یعنی می‌توان در هر لحظه یک یا چند توده پیل را به کار گرفت و یا از کار انداخت. توان خروجی آنها بسیار متغیر است (گستره‌ی توان خروجی از ۱۰۰ مگاوات برای سوخت ذغال‌سنگ تا بیش از ۵۰۰ مگاوات برای سوخت گاز طبیعی در تغییر است). ارزش تمام شده‌ی توده‌ی پیل به ازای هر کیلووات برای یک نیروگاه بزرگ و یا کوچک یکسان است. چرا که بازدهی الکتریکی به طور منفرد محاسبه می‌شود و تعداد پیل‌ها روی بازدهی کلی کم اثر است.

^۱ چنانچه هیدروژن با مقدار اضافی اکسیژن یا هوا واکنش دهد و تا دمای ۲۵ درجه سانتیگراد خنک گردد، آب تولیدی به صورت بخار مخلوط با اکسیژن نسوخته یا نیتروژن نسوخته می‌باشد. در این حالت اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که مقدار گرمای کمتری آزاد شده است که معادل ۲۴۱ کیلوژول است این گرما ارزش حرارتی حد پایین هیدروژن است.



۱-۵-۳- سازگاری با قوانین زیست محیطی

پیل‌های سوختی دارای بازدهی بالا می‌باشند و در هر توان خروجی، دی‌اکسیدکربن تولید شده کم می‌باشد. مقدار اکسیدهای نیتروژن و گوگرد به ترتیب حدود $10^{-3} * 1/81$ و $10^{-3} * 1/36$ کیلوگرم بر مگاوات ساعت می‌باشد. این پیل‌ها بی‌سر و صدا هستند و صدای ایجاد شده توسط آنها ۶۰ دسی‌بل در هر ۹ مترمربع می‌باشد، از اینرو قابل نصب در هر محلی می‌باشند. پیل‌های سوختی را می‌توان به گونه‌ای طراحی کرد که از لحاظ آب مورد نیاز خودکفا باشند. به دلیل سازگاری پیل‌های سوختی با قوانین زیست محیطی کسب پروانه‌ی ساخت آنها در زمان بسیار کوتاهی صورت می‌گیرد.

۱-۵-۴- انعطاف‌پذیری نسبت به سوخت

هیدروژن سوخت اصلی پیل‌های سوختی است که از تفکیک آب، گاز طبیعی، ذغال‌سنگ، متانول و دیگر سوخت‌های هیدروکربنی به دست می‌آید. حتی وقتی این منابع در دسترس نباشند، با توجه به منابع موجود در محل می‌توان هیدروژن مورد نیاز را تأمین نمود.

۱-۵-۵- افزایش تولید و کاهش توزیع انرژی

با توجه به نیاز روز افزون به انرژی در مناطق دور دست، در صورت استفاده از پیل‌های سوختی مشکلات توزیع با کاهش خطوط جدید انتقال انرژی برطرف می‌شود. هم‌اکنون ۸ تا ۱۰ درصد از انرژی تولید شده بین نیروگاه و مصرف‌کننده‌ها از طریق خطوط انتقال هدر می‌رود. ولی با استفاده از پیل‌های سوختی اتلاف انرژی الکتریکی در هنگام انتقال کاهش می‌یابد. و بازدهی کلی تبدیل سوخت بهینه می‌شود. همچنین خطوط ناشی از میدان‌های الکترومغناطیسی موجود در اطراف خطوط انتقال نیرو در ولتاژ بالا از بین می‌رود. از آنجایی که امکان استفاده از چندین واحد پیل سوختی در مناطق مختلف وجود دارد، با از کار افتادن یک یا چند پیل، برخلاف خطوط انتقال فعلی، شبکه آسیب جدی نمی‌بیند.

۱-۵-۶- قابلیت ترکیب شدن با سیستم‌های دیگر و تولید انرژی با استفاده از گرمای

خروجی پیل‌های سوختی

به چنین سیستمی، سیستم ترکیبی گفته می‌شود. توسعه چنین سیستم‌هایی به سرعت در حال پیشرفت است. سیستم‌های ترکیبی برای محل‌های مسکونی، تجاری و صنایع قابل استفاده هستند. در یک نمونه سیستم ترکیبی، گازهای خروجی از پیل سوختی در توربین‌های گازی استفاده می‌شود که بدین ترتیب گرمای خروجی از پیل بازیافت می‌شود.

۱-۵-۷- عدم نیاز به تعمیر

چون پیل‌های سوختی قطعات متحرک ندارند. از اینرو نیاز پی در پی به تعمیر نداشته و تنها تعویض فیلتر هوا و مواد جاذب مورد نیاز است. حداقل زمان تعویض قطعات ۵ سال است، هر چند انتظار می‌رود که این زمان به ۲۰ سال یا بیشتر هم برسد [۲].

۱-۶- معایب پیل سوختی

- ✓ تبدیل هیدروکربن به هیدروژن از طریق مبدل هنوز با چالش‌هایی روبروست.
- ✓ خودروهای پیل سوختی زمان استارت طولانی‌تری نسبت به خودروهای متداول دارند.
- ✓ پیل‌های سوختی سنگین بوده و محققین در پی کاهش وزن آنها می‌باشند.
- ✓ برخی پیل‌های سوختی از مواد گران‌قیمت استفاده می‌کنند.
- ✓ تولید، انتقال، توزیع و ذخیره به علت نبودن زیرساخت مناسب، با مشکلاتی مواجه می‌باشد [۳].

۱-۷- اهمیت موضوع پایان نامه

از موارد مهمی که بشر از ابتدا به عنوان یک چالش اساسی با آن مواجه بوده است. یافتن روش‌هایی برای افزایش بازده و بهره‌وری سیستم‌ها بوده است. امروزه بشر به فناوری جالب پیل سوختی به عنوان جانشین بسیار مناسب برای موتورهای احتراق داخلی می‌اندیشد. از آنجاییکه این وسیله از قوانین حاکم بر ماشین‌های گرمایی تبعیت نمی‌کند. و به صورت مستقیم و به واسطه فرآیند الکتروشیمیایی انرژی شیمیایی سوخت را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید. راندمانی به مراتب بیشتر از موتور احتراق داخلی دارد. بازدهی بالا از لحاظ اقتصادی سودمند می‌باشد چون هم موجب صرفه‌جویی در سوخت مصرفی و هم باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. لذا ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی و قرار گرفتن در بهترین بازده یک موضوع مهم، در طراحی سیستم پیل سوختی می‌باشد. با بررسی انجام گرفته، دو متغیر میزان سوخت ورودی (هیدروژن) و جریان خروجی پیل می‌تواند بر روی بازده پیل سوختی تأثیرگذار باشد. از طرفی با توجه به اینکه پیل سوختی چگالی انرژی بالا و ذخیره‌ساز انرژی چگالی توان بالا دارد، پیل سوختی را به همراه یک ذخیره‌ساز انرژی برای داشتن یک چگالی توان بالا و چگالی انرژی بالا به صورت ترکیبی استفاده می‌شود. به منظور کنترل ولتاژ و جریان خروجی پیل سوختی از مبدل DC-DC استفاده می‌گردد. لذا در این پایان‌نامه، یک استراتژی ردیابی حداکثر بازده برای پیل‌های سوختی در سیستم تولید توان ترکیبی پیل سوختی - ذخیره‌ساز انرژی پیشنهاد می‌گردد. با اعمال این استراتژی به سیستم مورد نظر مشاهده شده است به ازای شرایط مختلف بار، پیل سوختی در بازده بهینه‌اش قرار گرفته است. این پایان‌نامه شامل شش فصل می‌باشد که در فصل اول مقدمه‌ای بر پیل‌های سوختی و ضرورت انجام کار بیان شده است. در فصل دوم مروری بر کارهای قبلی انجام شده در ارتباط با ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی بیان شده است. در فصل سوم مدل‌سازی پیل سوختی و مفاهیم مربوط به آن و ساختار سیستم پیشنهادی مطرح و طراحی شده است. در فصل چهارم کنترل‌کننده پیشنهادی برای ردیابی حداکثر بازده پیل

سوختی معرفی شده است. و در فصل پنجم نتایج شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف و سرانجام در فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات قابل اجرا بیان شده است.

۲- فصل دوم

مروری بر کارهای انجام شده قبلی در ارتباط با ردیابی
حداکثر بازده پیل‌های سوختی

۲-۱- مقدمه

در این فصل کارهای قبلی که در زمینه ردیابی حداکثر بازده در پیل‌های سوختی انجام شده است، مطرح و بررسی شده است. در این مراجع از طریق کنترل جریان پیل سوختی، کنترل ولتاژ کمپرسور و از طریق کنترل شارش هوا بازده پیل سوختی در مقدار حداکثر قرار گرفته است.

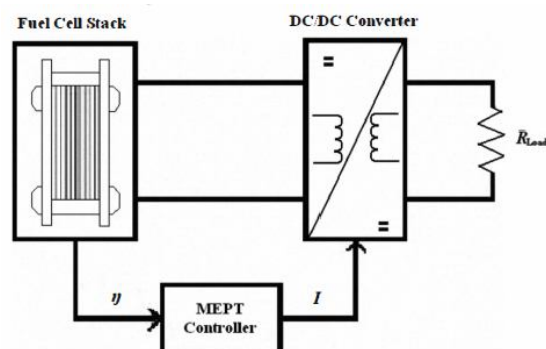
۲-۲- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی با کنترل جریان پیل سوختی

در مرجع [۷] بازده پیل سوختی به صورت رابطه ۲-۱ در نظر گرفته شده است:

$$\eta(I_{st}) = \frac{2FP_{net}}{Hn_{cell}I_{st}} \quad (1-2)$$

P_{net} : توان خالص خروجی، n_{cell} : تعداد سلول‌های پیل سوختی، H : حداقل ارزش حرارتی هیدروژن، I_{st} : جریان پشته و F : ثابت فارادی می‌باشد.

همانطور که در رابطه بازده دیده می‌شود بازده پیل سوختی تابعی از جریان پشته پیل سوختی می‌باشد. در این مرجع با کنترل جریان پشته پیل سوختی نقطه‌ی حداکثر بازده ردیابی شده است. شکل ۲-۱ سیستم پیشنهادی که در این مرجع برای کنترل MEPT^۱ استفاده شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱- سیستم پیشنهادی [۷]

^۱ Maximum Efficiency Point Tracking

کنترل کننده MEPT از توان خالص خروجی و اطلاعات جریان پشته پیل سوختی استفاده می کند تا بازده را تخمین بزند و MEP¹ را جستجو کند (شکل ۲-۲). سپس دستورالعمل کنترلی را برای مبدل تولید می کند. و بعد سیستم پیل سوختی در جریان تعیین شده توسط کنترل کننده MEPT قرار می گیرد. کنترل کننده MEPT یک سیگنال اغتشاش سینوسی کوچک در جریان $\hat{I}$ که تخمینی از جریان بهینه I^* (نامعلوم) می باشد تولید می کند. تابع بازده $\eta(I)$ در نزدیکی MEP به صورت سری تیلور تقریب زده می شود.

$$\eta(I) = \eta^* + \frac{\eta''}{2}(I - I^*)^2 \quad (2-2)$$

$$\bar{I} = I^* - \hat{I} \quad (3-2)$$

$$I = \hat{I} + a \sin \omega t \quad (4-2)$$

$\bar{I}$: خطای تخمین می باشد.

با ترکیب سه معادله بالا داریم:

$$\eta(I) = \eta^* + \frac{\eta''}{2}(a \sin \omega t - \bar{I})^2 \quad (5-2)$$

$$= \eta^* + \frac{a^2 \eta''}{4} + \frac{\eta''}{2} \bar{I}^2 - a \eta'' \bar{I} \sin \omega t - \frac{a^2 \eta''}{4} \cos 2\omega t \quad (6-2)$$

با صرف نظر از $\bar{I}^2$ داریم:

$$\eta(I) = \eta^* + \frac{a^2 \eta''}{4} - a \eta'' \bar{I} \sin \omega t - \frac{a^2 \eta''}{4} \cos 2\omega t \quad (7-2)$$

$$\frac{s}{s + \omega_h} [\eta] \approx -a \eta'' \bar{I} \sin \omega t - \frac{a^2 \eta''}{4} \cos 2\omega t \quad (8-2)$$

این سیگنال با ضرب در $\sin \omega t$

¹ Maximum Efficiency Point

$$\xi \approx -a\eta'' \bar{I} \sin \omega t - \frac{a^2 \eta''}{4} \cos 2\omega t \sin \omega t \quad (9-2)$$

$$= -\frac{a\eta''}{2} \bar{I} + \frac{a\eta''}{2} \bar{I} \cos 2\omega t - \frac{a^2 \eta''}{8} (\sin 3\omega t - \sin \omega t) \quad (10-2)$$

جریان تخمین زده شده

$$\hat{I} \approx \frac{k}{s} \left[-\frac{a\eta''}{2} \bar{I} + \frac{a\eta''}{2} \bar{I} \cos 2\omega t - \frac{a^2 \eta''}{8} (\sin 3\omega t - \sin \omega t) \right] \quad (11-2)$$

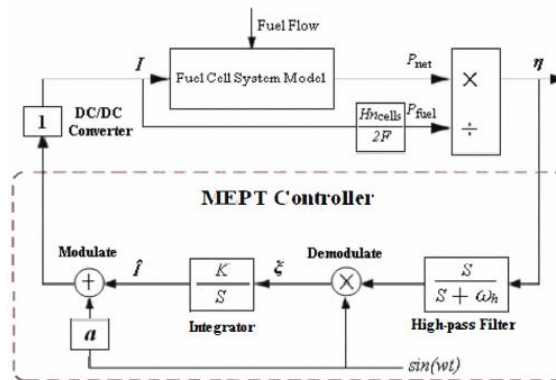
$$\hat{I} \approx \frac{k}{s} \left[-\frac{a\eta''}{2} \bar{I} \right] \quad (12-2)$$

از آنجایی که I^* ثابت می باشد داریم:

$$\dot{\bar{I}} = -\hat{I} \quad (13-2)$$

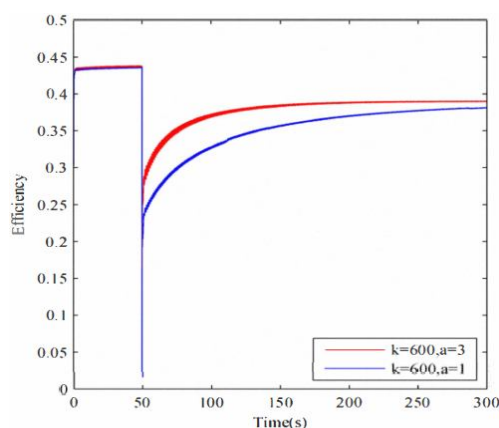
$$\dot{\bar{I}} = \frac{ka\eta''}{2} \bar{I} \quad (14-2)$$

هنگامی η حداکثر است که مشتق مرتبه دوم آن منفی باشد ($ka\eta'' \leq 0$). بنابراین جریان خطا $\bar{I}$ به صفر همگرا می شود. که بدان معنی می باشد که جریان به I^* همگرا شده است. و سیستم تولید توان پیل سوختی به MEP می رسد. سیستم به طور کامل برای بررسی عملکردش در محیط Matlab/Simulink شبیه سازی شده است.

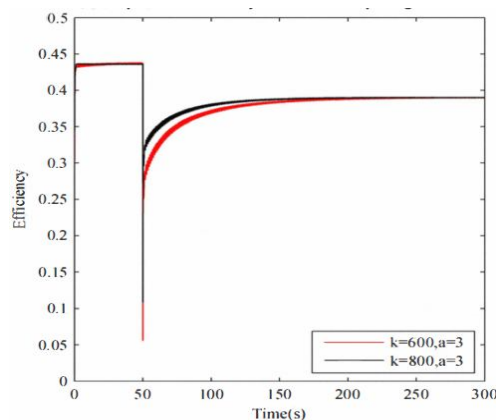


شکل ۲-۲- سیستم کنترل MEPT پیل سوختی [۷]

همانطور که می‌دانیم به ازای هر میزان شارش سوخت یک نقطه‌ی حداکثر بازده داریم. در این مرجع یک تغییر از ۴۴٪ حداکثر شارش سوخت به ۷۲٪ حداکثر شارش سوخت در زمان ۵۰ ثانیه ایجاد شده است. در این مرجع حداکثر بازده پیل در ۴۴٪ حداکثر سوخت، ۴۴٪ و در ۷۲٪ حداکثر سوخت، ۳۹٪ می‌باشد. فرکانس اغتشاش $\omega=2\pi$ و فرکانس hp، $\omega_h = \pi$ می‌باشد. شکل ۲-۳ نشان می‌دهد که کنترل‌کننده MEPT توانسته است MEP را از ۴۴٪ به ۳۹٪ ردیابی کند.



(الف)



(ب)

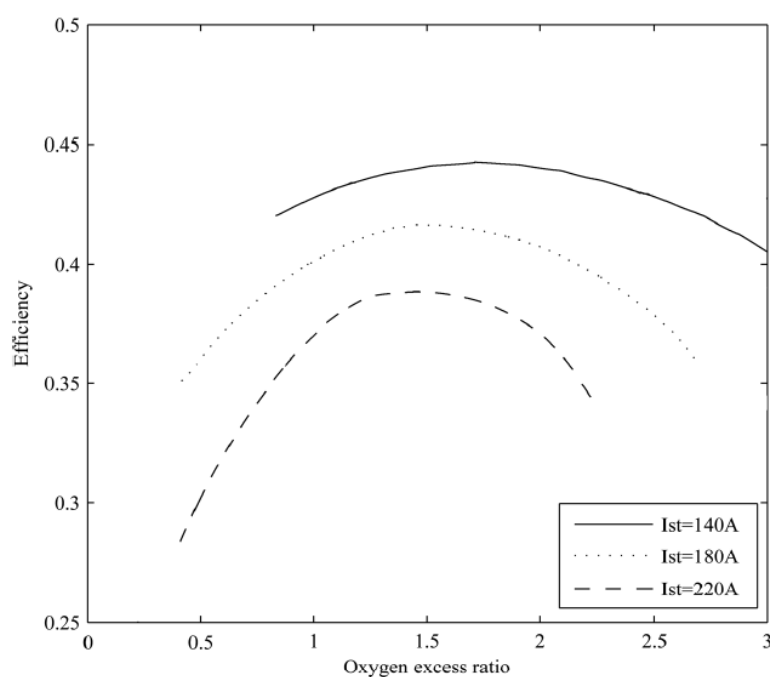
شکل ۲-۳- (الف) و (ب) پاسخ کنترل‌کننده MEPT به تغییرات شارش سوخت [۷]

با افزایش k و a سیستم سریعتر به MEP همگرا شده است. با افزایش a ریبیل افزایش می‌یابد. که به دلیل بیشتر شدن تلفات توان در حالت دائمی می‌باشد. از مزایای این روش می‌توان مواردی

چون نیاز نداشتن به دانش قبلی از مدل سیستم و اینکه می‌توان از این روش برای کنترل سیستم‌های متغیر با زمان استفاده نمود، را نام برد.

۲-۳- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی با کنترل هوا

در مرجع [۸] از مرتبط بودن λ_{O_2} با ولتاژ کمپرسور استفاده نموده است. λ_{O_2} یا نسبت اکسیژن اضافی برابر است با نسبت مقدار اکسیژن ورودی به کاتد به اکسیژن مصرف شده در واکنش شیمیایی می‌باشد. شکل ۲-۴ ارتباط بازده پیل سوختی با λ_{O_2} در جریان‌های مختلف پیل سوختی را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل دیده می‌شود در هر جریان پیل سوختی، به ازای یک λ_{O_2} بهینه پیل سوختی در حداکثر بازده قرار گرفته است.



شکل ۲-۴- ارتباط بازده پیل سوختی با نسبت اکسیژن اضافی در جریان‌های مختلف پیل سوختی [۸]

با توجه به رابطه بازده گفته شده در قسمت قبلی و با صرفنظر از تلفات ثابت می‌توان توان خالص خروجی از پیل سوختی را به صورت $P_{net} = P_{st} - P_{cm}$ تعریف کرد. که با تعریف توان کمپرسور

به صورت $P_{cm} = \frac{V_{cm}(V_{cm} - K_V \omega_{Cp})}{R_{cm}}$ و توان خروجی پیل سوختی به صورت $P_{st} = V_{st} \cdot I_{st}$ و با توجه

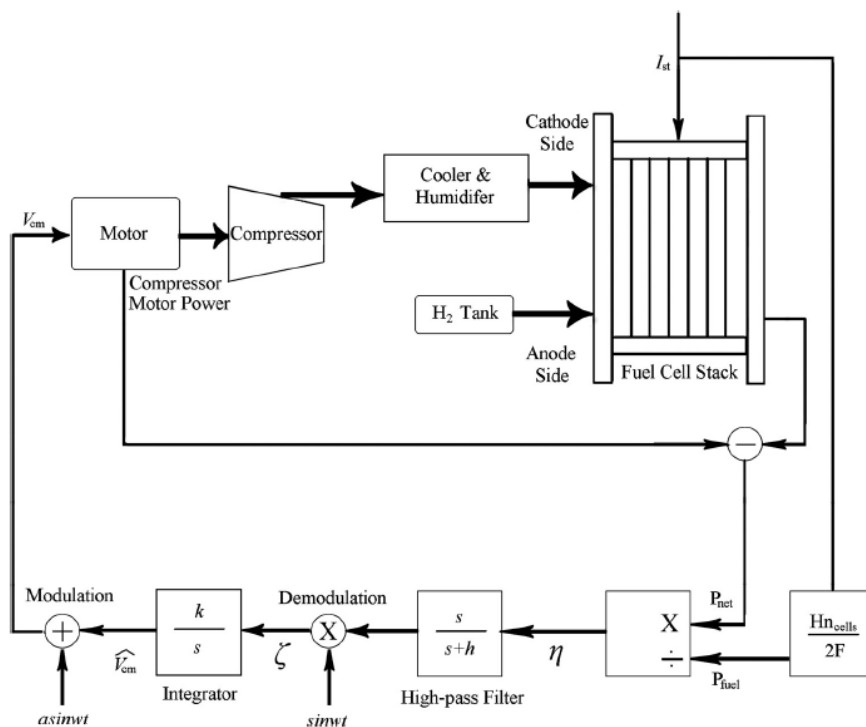
به مطالب گفته شده در قسمت قبلی، بازده پیل سوختی را به صورت رابطه ۱۵-۲ در نظر گرفته شده است.

$$\eta(I_{st}, V_{cm}) = \frac{P_{st} - P_{cm}}{P_{fuel}} = \frac{2F[I_{st} V_{st} R_{cm} - V_{cm}(V_{cm} - K_V \omega_{Cp})]}{Hn_{cell} R_{cm} I_{st}} \quad (15-2)$$

که I_{st} : جریان پشته، V_{st} : ولتاژ پشته، V_{cm} : ولتاژ کمپرسور، ω_{Cp} : سرعت چرخشی کمپرسور و K_V

و R_{cm} ثابت‌های موتور کمپرسور می‌باشند. همانطور که در رابطه ۱۵-۲ می‌بینیم بازده به ولتاژ

کمپرسور مرتبط می‌باشد. پس با کنترل V_{cm} می‌توان نقطه‌ی حداکثر بازده را ردیابی نمود.



شکل ۵-۲- طرح یک سیستم کنترل MEPT [۸]

در این مرجع یک سیستم کنترل MEPT پیل سوختی به صورت شکل ۵-۲ در نظر گرفته

شده است. کنترل کننده MEPT یک سیگنال اغتشاش سینوسی کوچک را در ولتاژ کمپرسور $\hat{V}_{cm}$ که

تخمینی از ولتاژ بهینه نامعلوم V_{cm}^* می‌باشد، تغذیه می‌کند. تابع بازده η در نزدیکی MEP به وسیله‌ی سری تیلور تخمین زده می‌شود:

$$\eta = \eta^* + \frac{\eta''}{2}(V_{cm} - V_{cm}^*)^2 \quad (۱۶-۲)$$

$\bar{V}_{cm}$: خطای تخمین با رابطه ۱۷-۲ محاسبه می‌شود:

$$\bar{V}_{cm} = V_{cm}^* - \hat{V}_{cm} \quad (۱۷-۲)$$

مطابق با شکل ۴-۲ داریم:

$$V_{cm} = \hat{V}_{cm} + a \sin \omega t \quad (۱۸-۲)$$

با توجه به معادلات ۱۶-۲، ۱۷-۲ و ۱۸-۲ داریم:

$$\eta = \eta^* + \frac{\eta''}{2}(a \sin \omega t - \bar{V}_{cm})^2 = \eta^* + \frac{a^2 \eta''}{4} + \frac{\eta''}{2} \bar{V}_{cm}^2 - a \eta'' \bar{V}_{cm} \sin \omega t - \frac{a^2 \eta''}{4} \cos 2\omega t \quad (۱۹-۲)$$

با توجه به اینکه $\bar{V}_{cm}$ مقدار کوچکی می‌باشد بنابراین $\bar{V}_{cm}^2$ را می‌توان نادیده گرفت.

$$\eta = \eta^* + \frac{a^2 \eta''}{4} - a \eta'' \bar{V}_{cm} \sin \omega t - \frac{a^2 \eta''}{4} \cos 2\omega t \quad (۲۰-۲)$$

با عبور از فیلتر بالاگذر جز DC را می‌توان حذف کرد.

$$\frac{s}{s + \omega_h}[\eta] \approx -a \eta'' \bar{V}_{cm} \sin \omega t - \frac{a^2 \eta''}{4} \cos 2\omega t \quad (۲۱-۲)$$

با ضرب در $\sin \omega t$ داریم:

$$\begin{aligned} \xi \approx & -a \eta'' \bar{V}_{cm} \sin^2 \omega t - \frac{a^2 \eta''}{4} \cos 2\omega t \sin \omega t = -\frac{a \eta''}{2} \bar{V}_{cm} + \frac{a \eta''}{2} \bar{V}_{cm} \cos 2\omega t \\ & - \frac{a^2 \eta''}{8} (\sin 3\omega t - \sin \omega t) \end{aligned} \quad (۲۲-۲)$$

$$\hat{V}_{cm} \approx \frac{k}{s} \left[-\frac{a \eta''}{2} \bar{V}_{cm} + \frac{a \eta''}{2} \bar{V}_{cm} \cos 2\omega t - \frac{a^2 \eta''}{8} (\sin 3\omega t - \sin \omega t) \right] \quad (۲۳-۲)$$

دو جمله فرکانس بالا توسط انتگرال تضعیف شده و داریم:

$$\hat{V}_{cm} \approx \frac{k}{s} \left[-\frac{a\eta''}{2} \bar{V}_{cm} \right] \quad (24-2)$$

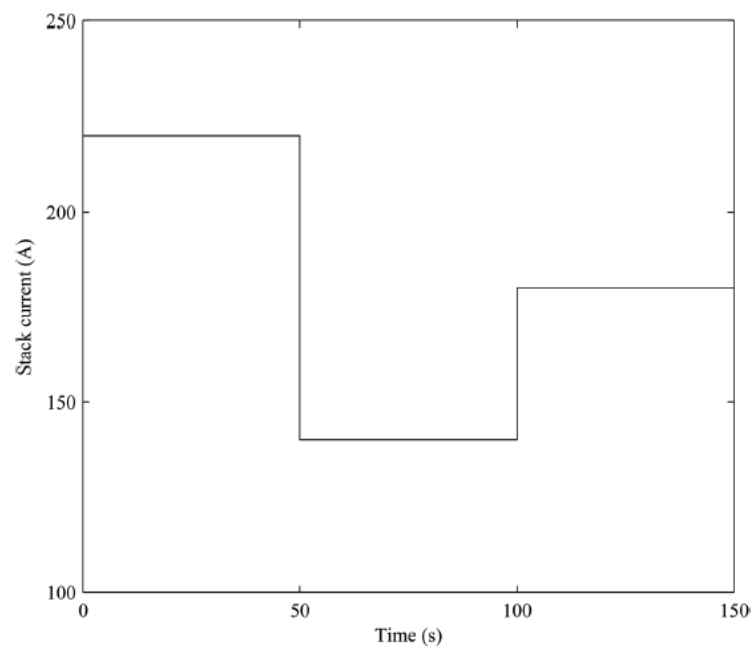
با توجه به اینکه V_{cm}^* ثابت است:

$$\dot{\bar{V}}_{cm} = -\dot{V}_{cm} \quad (25-2)$$

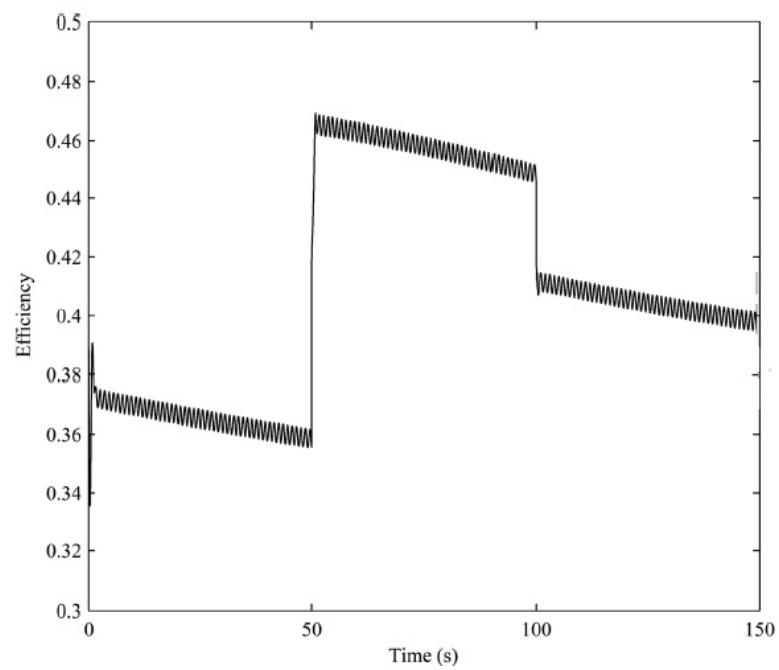
و سرانجام داریم:

$$\dot{\bar{V}}_{cm} = \frac{ka\eta''}{2} \bar{V}_{cm} \quad (26-2)$$

هنگامی η حداکثر است که مشتق دوم آن منفی باشد. بنابراین خطای تخمین $\bar{V}_{cm}$ به صفر همگرا می‌شود. که نشان می‌دهد ولتاژ موتور کمپرسور به V_{cm}^* همگرا شده است. و سیستم پیل سوختی به حداکثر بازده η^* می‌رسد. این روش کنترلی در محیط Matlab/Simulink پیاده‌سازی شده است. برای درک عملکرد این کنترل‌کننده، جریان پیل سوختی در گام‌های مختلف تغییر داده شده است. که این تغییرات در شکل ۲-۶ مشاهده می‌شود. در این شبیه‌سازی $\omega = 2\pi$ ، $\omega_h = \pi$ ، $a = 2$ و $k = 10$ در نظر گرفته شده است. در شکل ۲-۷ نتایج شبیه‌سازی آورده شده است. و مشاهده شده که کنترل‌کننده MEPT می‌تواند MEP را از ۳۷٪ به ۴۵٪ و سرانجام به ۴۱٪ ردیابی کند که مطابق با مقدار حداکثر بازده در حالت دائمی به ازای جریان‌های مورد نظر می‌باشد [۸].



شکل ۲-۶- گام‌های تغییر در جریان پشته [۸]



شکل ۲-۷- پاسخ بازده سیستم [۸]

از مزایای این روش می‌توان همان موارد گفته شده در حالت قبل را برشمرد.

۴-۲- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی با کنترل شارش اکسیژن

در مرجع [۹] ولتاژ پیل سوختی را به صورت رابطه ۲-۲۹ در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} v_{fc} &= VOC + V_{an,H_2} + V_{ca,O_2} \\ &= VOC + \log(p_{an,H_2}) \times K_{PH_2} \times (T_{fc} - 298.15) + \log(p_{ca,O_2}) \times K_{PO_2} \times (T_{fc} - 298.15) \end{aligned} \quad (29-2)$$

VOC : ولتاژ مدار باز، T_{fc} : دمای پیل سوختی، K_{PO_2} : ثابت، K_{PH_2} : ثابت، V_{an,H_2} : ولتاژ آند، V_{ca,H_2} : ولتاژ کاتد، P_{an,H_2} : فشار جزئی هیدروژن و P_{ca,O_2} : فشار جزئی اکسیژن می‌باشد.

وقتی مقدار هوای فراهم شده برای پیل سوختی افزایش می‌یابد. فشار جزئی در کاتد افزایش می‌یابد. و ولتاژ همانطور که در رابطه ۲-۲۹ نشان داده شده است افزایش می‌یابد. این بدان معنا می‌باشد که افت ولتاژ کاهش یافته و توان خروجی نسبت به وقتی که فشار هوا کمتر است بیشتر شده است. پس بازده پیل بهبود یافته است. لازم به ذکر است که افزایش توان خروجی تا نقطه‌ی مطلوب مدنظر می‌باشد. و از یک مقدار مشخص به بعد توان کمپرسور افزایش می‌یابد.

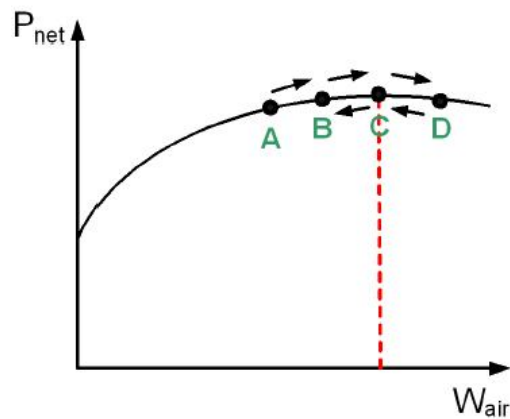
الگوریتم MEPT که از روش اغتشاش و مشاهده^۱ (P&O) استفاده می‌کند. مقدار هوای تأمین شده برای پیل سوختی را تغییر می‌دهد و سپس توان خالص خروجی را با توان قبلی مقایسه می‌کند و سپس مقدار هوا را تغییر می‌دهد تا به نقطه‌ی بهینه توان تولیدی برسد. مقدار هوای به کار رفته توسط کمپرسور هوا کنترل می‌شود. در این مرجع دو الگوریتم یکی الگوریتم با گام ثابت و دیگری الگوریتم با گام متغیر پیشنهاد شده است.

الگوریتم با گام ثابت یک دینامیک کند در MEPT دارد. به ویژه وقتی که نقطه‌ی عملکرد دور از نقطه‌ی حداکثر بازده باشد. که روی بازده کلی تأثیر می‌گذارد. بنابراین الگوریتم با گام متغیر پیشنهاد شده است. عملکرد حالت دائمی این دو الگوریتم مشابه هم می‌باشد. الگوریتم MEPT با گام

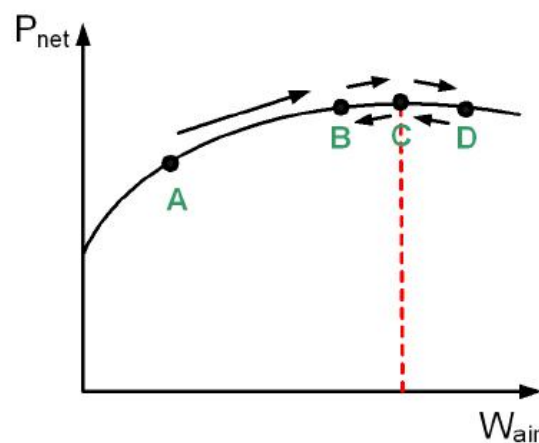
¹ Perturbation and Observe (P&O)

متغیر اندازه گام را وقتی که نقطه‌ی عمل دور از نقطه‌ی حداکثر بازده باشد افزایش می‌دهد. شکل ۲-۲-

۸ و ۹-۲ عملکرد الگوریتم MEPT با گام ثابت و متغیر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸- عملکرد الگوریتم با گام ثابت [۹]



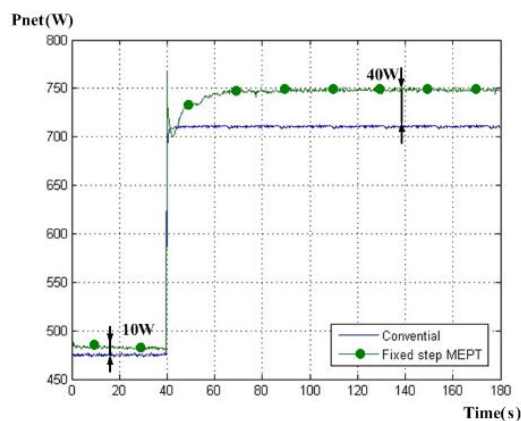
شکل ۲-۹- عملکرد الگوریتم با گام متغیر [۹]

این الگوریتم بر روی یک سیستم پیل سوختی PEMFC، ۱ KW، پیاده شده است. در شکل ۲-۲-

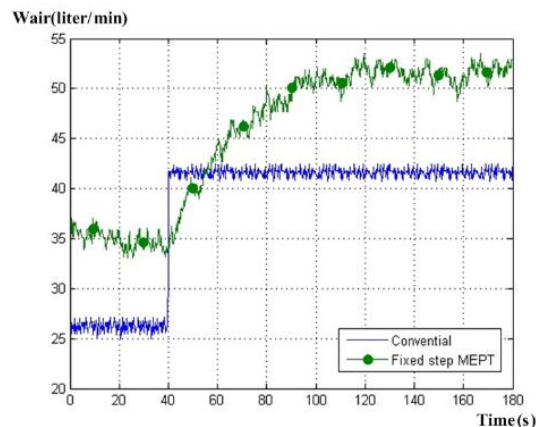
۱۰ عملکرد الگوریتم با گام ثابت نشان داده شده است. و در شکل ۲-۱۱ عملکرد دو الگوریتم با گام

ثابت و گام متغیر را زمانی که جریان بار از ۱۵ A به ۲۵ A تغییر می‌کند نشان داده شده است. هر دو

توان حالت دائمی مشابهی را ردیابی می‌کنند.

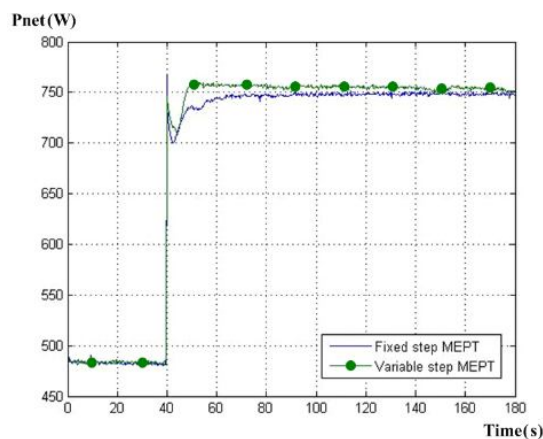


(ب) توان خالص پیل سوختی

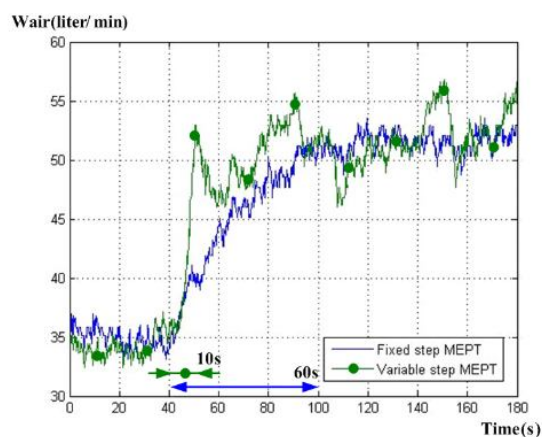


(الف) شارش هوای کمپرسور

شکل ۲-۱۰- مقایسه نتایج آزمایش بین الگوریتم با گام ثابت و بدون اعمال الگوریتم در شرایط تغییر بار از ۱۵A به ۲۵ A [۹]



(ب) توان خالص پیل سوختی



(الف) شارش هوای کمپرسور

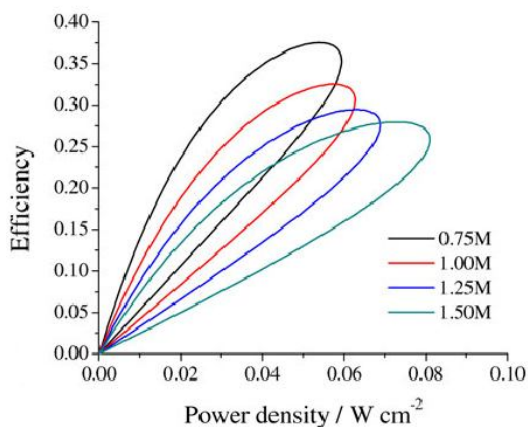
شکل ۲-۱۱- مقایسه نتایج آزمایش بین الگوریتم با گام متغیر و با گام ثابت در شرایط تغییر بار از ۱۵A به ۲۵A [۹]

۲-۵- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی با ردیابی حداکثر توان

در مرجع [۱۰] ردیابی حداکثر بازده در پیل‌های سوختی متانول مستقیم (DMFC)^۱ بررسی شده است. از معایب این نوع پیل‌ها عبور متانول یعنی نفوذ داخلی سوخت متانول از آند به کاتد در سراسر غشای پلیمری بدون تولید جریان الکتریکی است. که باعث از دست دادن مقدار قابل توجهی از

^۱ Direct Methanol Fuel Cell

انرژی سوخت متانول مصرف شده می‌گردد. و به شکل گرما از بین می‌رود. تحقیقات در این نوع پیل‌ها نشان می‌دهد که نقطه‌ی حداکثر بازده در مجاورت نقطه‌ی حداکثر توان قرار دارد (شکل ۲-۱۲).



شکل ۲-۱۲- منحنی بازده - چگالی توان، درجه حرارت ۳۲۳ درجه کلوین و غلظت متانول از ۰/۷۵ به ۱/۵ مولار متغیر [۱۰]

پس سعی شده با ردیابی حداکثر توان، به نقطه‌ی حداکثر بازده برسیم. در دیگر انواع پیل‌های سوختی که در آن عبور سوخت وجود ندارد با افزایش چگالی جریان، توان خروجی افزایش می‌یابد ولی بازده کاهش می‌یابد. MEP در این نوع پیل با اختلاف ناچیزی در سمت چپ نقطه‌ی MPP^۱ قرار دارد. از آنجایی که MEP به MPP نزدیک می‌باشد و از طرفی که مقدار دقیق I_{mcr} (چگالی جریان متانول عبوری) بدون دانستن خصوصیات پیشرفته DMFC، برای ردیابی حداکثر بازده قابل تعیین نمی‌باشد. پس می‌توان با ردیابی حداکثر توان به یک بازده، با انحراف کوچک از حداکثر بازده رسید.

^۱ Maximum Power Point

۳- فصل سوم

طراحی و مدل سازی سیستم تولید توان پیل سوختی،

باتری و مبدل DC-DC افزایشده

۳-۱- مقدمه

در این فصل در ابتدا مدل سازی پیل سوختی با غشای تبادل یونی مطرح شده است. در ادامه باتری و مفاهیم مربوط به آن بیان شده است. و در انتها به معرفی مبدل به کار برده شده در پایان نامه و طراحی المان های آن پرداخته شده است.

۳-۲- مدل سازی پیل سوختی با غشای تبادل یونی

همانطور که در فصل های قبل بیان شد پیل سوختی با غشای تبادل یونی دارای ویژگی هایی چون دمای عملکرد پایین، کوچک و سبک بودن، زمان راه اندازی سریع و داشتن بهترین پاسخ گذرا در میان دیگر انواع پیل های سوختی می باشد. این ویژگی ها موجب شده تا در این پایان نامه از این نوع پیل استفاده گردد. مدل ارائه شده در این پایان نامه بر اساس مدل صحنه گذاری شده در مرجع [۱۱] می باشد. پارامترهای استفاده شده برای این مدل به شرح ذیل می باشد.

جدول ۳-۱- پارامترهای مدل سازی

N_0	تعداد پیل های سری شده در یک پشته
E_0	ولتاژ بی باری استاندارد $[V]$
R	ثابت جهانی گازها $[(1atm)/(kmol.K)]$
T	دمای مطلق $[K]$
I_{fc}	جریان پیل سوختی $[A]$
F	ثابت فارادی $[C/kmol]$
K_{H_2}	ثابت مولار دریچه هیدروژن $[kmol/(atm.s)]$
K_{H_2O}	ثابت مولار دریچه آب $[kmol/(atm.s)]$
K_{O_2}	ثابت مولار دریچه اکسیژن $[kmol/(atm.s)]$

K_r	ثابت مدل سازی $[kmol/(s.A)]$
P_{H_2}	فشار جزئی هیدروژن $[atm]$
P_{H_2O}	فشار جزئی آب $[atm]$
P_{O_2}	فشار جزئی اکسیژن $[atm]$
$q_{H_2}^{in}$	فلوی ورودی هیدروژن $[kmol/s]$
$q_{H_2}^{out}$	فلوی خروجی هیدروژن $[kmol/s]$
$q_{O_2}^{in}$	فلوی ورودی اکسیژن $[kmol/s]$
$q_{H_2}^r$	مقدار فلوی هیدروژنی که واکنش می دهد $[kmol/s]$
r	مقاومت داخلی پیل سوختی $[\Omega]$
t_{H_2}	ثابت زمانی هیدروژن $[s]$
t_{O_2}	ثابت زمانی اکسیژن $[s]$
t_{H_2O}	ثابت زمانی آب $[s]$
t	زمان $[s]$
V_{fc}	ولتاژ پیل سوختی $[V]$
E	انرژی $[J]$

P_{H_2} ، P_{O_2} و P_{H_2O} توسط رابطه ۱-۳، ۲-۳ و ۳-۳ مشخص می شوند:

$$\dot{P}_{H_2} = \frac{1}{t_{H_2}} (-P_{H_2} + \frac{1}{K_{H_2}} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{fc})) \quad (۱-۳)$$

$$\dot{P}_{O_2} = \frac{1}{t_{O_2}} (-P_{O_2} + \frac{1}{K_{O_2}} (q_{O_2}^{in} - K_r I_{fc})) \quad (2-3)$$

$$\dot{P}_{H_2O} = \frac{1}{t_{H_2O}} (-P_{H_2O} + \frac{2}{K_{H_2O}} K_r I_{fc}) \quad (3-3)$$

ثابت K_r که توسط رابطه ۳-۴ مشخص می‌شود نشان‌دهنده ارتباط بین هیدروژن واکنشی و جریان پیل سوختی می‌باشد.

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 I_{fc}}{2F} = 2K_r I_{fc} \quad (4-3)$$

متغیر دیگری که در عملکرد پیل سوختی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. ضریب بهره‌برداری واکنش می‌باشد که با U_f نشان داده می‌شود. این پارامتر معرف مقدار سوختی است که در واکنش شیمیایی واکنش نشان می‌دهد. و به صورت رابطه ۳-۵ نشان داده می‌شود:

$$U_f = \frac{q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out}}{q_{H_2}^{in}} = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} \quad (5-3)$$

۳-۳- ولتاژ پیل سوختی

انرژی خروجی در پیل سوختی با رابطه ۳-۶ تعیین می‌شود.

$$Energy = V_{fc} . I_{fc} . t \quad (6-3)$$

انرژی شیمیایی ورودی و خروجی به آسانی تعریف نمی‌شوند. در پیل سوختی انرژی آزاد گیبس برای این منظور استفاده شده است. در یک پیل سوختی تغییر در انرژی آزاد گیبس تشکیل ΔG_f ، همان انرژی آزاد شده می‌باشد. که این تغییر، اختلاف بین انرژی آزاد گیبس محصول و انرژی آزاد گیبس مواد واکنش‌دهنده ورودی را بیان می‌کند.

$$\Delta G_f = G_{f \text{ of products}} - G_{f \text{ of reactants}} \quad (7-3)$$

برای سادگی مقایسه، مقادیر را به ازای هر مول در نظر می‌گیریم. به عنوان مثال $(\bar{g}_f)_{H_2O}$ ، انرژی آزاد گیبس تشکیل مولی آب می‌باشد. واکنش اساسی ۳-۸ را در نظر می‌گیریم:



که معادل است با:



محصول یک مول آب و واکنش‌دهنده‌ها یک مول H_2 و نیم مول O_2 می‌باشد. بنابراین:

$$\Delta \bar{g}_f = \bar{g}_f \text{ of products} - \bar{g}_f \text{ of reactants} \quad (۳-۱۰)$$

انرژی آزاد گیبس تشکیل ثابت نبوده و با دما و حالت مواد تغییر می‌کند. جدول ۳-۲ حالت‌های $\Delta \bar{g}_f$ را برای واکنش ساده ۳-۱۱ می‌باشد. توجه کنید که مقادیر داده شده منفی می‌باشند که به معنی آزاد شدن و تولید انرژی می‌باشد.



جدول ۳-۲- حالت‌های $\Delta \bar{g}_f$ برای دماهای مختلف [۱]

Form of water product	Temperature (°C)	$\Delta \bar{g}_f$ ($kJmol^{-1}$)
Liquid	25	-237.2
Liquid	80	-228.2
Gas	80	-226.1
Gas	100	-225.2
Gas	200	-220.4
Gas	400	-210.3
Gas	600	-199.6
Gas	800	-188.6
Gas	1000	-177.4

در صورت بازگشت پذیر بودن پروسه، تمام این انرژی آزاد گیبس به انرژی الکتریکی تبدیل می گردد. برای هر مول از هیدروژن مصرفی $2N$ الکترون حول مدار می چرخد که N عدد آووگادرو می باشد. چنانچه $(-e)$ بار روی یک الکترون باشد، پس باری که جریان می یابد برابر است با:

$$-2Ne = -2Fcoulombs \quad (۱۲-۳)$$

که F ثابت فارادی یا بار روی یک مول الکترون است. اگر E ولتاژ پیل سوختی باشد. کار الکتریکی جهت حرکت دادن این بار حول مدار به صورت زیر می باشد.

$$joules \quad -2FE = \text{ولتاژ} \times \text{بار} = \text{کار الکتریکی انجام شده} \quad (۱۳-۳)$$

اگر سیستم بازگشت پذیر باشد، کار الکتریکی انجام شده برابر با $\Delta \bar{g}_f$ خواهد بود:

$$\Delta \bar{g}_f = -2FE \quad (۱۴-۳)$$

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F} \quad (۱۵-۳)$$

رابطه ۳-۱۵، EMF یا ولتاژ مدار باز بازگشت پذیر پیل سوختی را ارائه می دهد.

به عنوان مثال برای یک پیل سوختی در ۲۰۰ درجه سانتیگراد که $\Delta \bar{g}_f = -220 \text{ kJ}$ دارد بنابراین:

$$E = \frac{220000}{2 \times 96485} = 1.14V \quad (۱۶-۳)$$

عبارت $\frac{-\Delta \bar{g}_f}{2F}$ ولتاژ مدار باز را در فشار و درجه حرارت استاندارد بیان می کند.

انرژی آزاد گیبس در واکنش های شیمیایی با دما و فشار ماده واکنش دهنده تغییر می کند.

۳-۳-۱- تأثیر فشار بر ولتاژ مدار باز

واکنش کلی ۳-۱۷ را در نظر بگیرید:



که در آن j مول از J با k مول از K واکنش داده و m مول از ماده M را تولید می‌کند. هر یک از واکنش‌دهنده‌ها و محصولات دارای فعالیت مربوط به خود می‌باشند که a_j و a_k نماینده فعالیت واکنش‌دهنده‌ها و a_m نماینده فعالیت محصول می‌باشند. در گاز ایده‌آل فعالیت به صورت رابطه ۳-۱۸ تعریف می‌شود:

$$\text{activity } a = \frac{P}{P^0} \quad (۳-۱۸)$$

که P فشار یا فشار جزئی گاز و P^0 فشار استاندارد می‌باشد ($P^0=1\text{Mpa}$). فعالیت متناسب با فشار جزئی می‌باشد. در مورد مواد شیمیایی حل‌شونده، فعالیت متناسب با مولاریته (قدرت) محلول می‌باشد. برای آب تولید شده در پیل سوختی این مورد کمی مشکل است چرا که این آب می‌تواند هم به صورت بخار و هم به صورت مایع تولید شود:

برای حالت بخار:

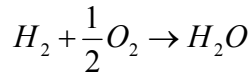
$$a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^0} \quad (۳-۱۹)$$

که $P_{H_2O}^0$ فشار بخار در دمای مربوطه می‌باشد که از جداول بخار بدست می‌آید. در مورد آب مایع a_{H_2O} برابر یک فرض می‌شود. فعالیت واکنش‌دهنده و محصولات تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش را نشان می‌دهد. بر طبق روابط ترمودینامیک در واکنش شیمیایی مربوطه داریم:

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^0 - RT \ln \left[\frac{a_J^j \cdot a_K^k}{a_M^m} \right] \quad (۳-۲۰)$$

که $\Delta \bar{g}_f^{-0}$ تغییر در انرژی گیبس تشکیل در فشار استاندارد می‌باشد.

در مورد واکنش پیل سوختی هیدروژنی داریم:



(۲۱-۳)

$$\Delta \bar{g}_f = \Delta \bar{g}_f^{-0} - RT \ln \left[\frac{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right] \quad (22-3)$$

مشاهده می‌شود، چنانچه فعالیت واکنش‌دهنده‌ها افزایش یابد، $\Delta \bar{g}_f$ منفی‌تر می‌شود. بدین معنی که انرژی بیشتری آزاد می‌گردد. از طرفی اگر فعالیت محصول افزایش یابد $\Delta \bar{g}_f$ افزایش یافته و انرژی کمتری آزاد می‌گردد. برای مشاهده میزان تأثیر معادله فوق برروی ولتاژ آن را در رابطه ۳-۱۵ جاگذاری می‌کنیم.

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}_f^{-0}}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right] = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right] \quad (23-3)$$

که E_0 ، EMF در فشار استاندارد می‌باشد. این معادله دقیقاً بیانگر چگونگی تغییرات ولتاژ به همراه افزایش فعالیت مواد واکنش‌دهنده است.

مجدداً معادله ۳-۲۴ را در نظر بگیرید:



در درجه حرارت بالا (برای مثال در SOFC) می‌توان فرض کرد که بخار به صورت گاز ایده‌آل رفتار کرده و خواهیم داشت:

$$a_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P^0} \quad a_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P^0} \quad a_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P^0} \quad (25-3)$$

پس معادله ۲۳-۳ به صورت رابطه ۲۶-۳ در می‌آید:

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{\frac{P_{H_2}}{P^0} \cdot \left[\frac{P_{O_2}}{P^0} \right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{P_{H_2O}}{P^0}} \right] \quad (26-3)$$

اگر تمام فشارها به Bar داده شوند پس $P^0=1$ بوده و معادله به صورت رابطه ۲۷-۳ ساده می‌شود:

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right] \quad (27-3)$$

معادله ۲۷-۳ رابطه بین فشار و ولتاژ مدار باز را بیان می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود نرخ واکنش شیمیایی متناسب با فشار جزئی هیدروژن و اکسیژن بوده و بنابراین ولتاژ پیل سوختی به همراه افزایش فشار کاری افزایش می‌یابد [۱].

۳-۳-۲- تأثیر دما بر ولتاژ مدار باز

درجه حرارت بالاتر نرخ انتقال توده را در پیل سوختی افزایش داده و منجر به کاهش مقاومت کلی سلول می‌گردد (با افزایش درجه حرارت، هدایت الکترونی در فلزات کاهش یافته اما هدایت یونی در الکترولیت افزایش می‌یابد). در هر حال، تمام این اثرات سبب بهبود نرخ واکنش می‌گردند [۱].

۳-۴- انواع تلفات در پیل‌های سوختی

۳-۴-۱- تلفات برانگیختگی^۱

¹ Activation Losses

این تلفات به دلیل کندی واکنش در سطح الکترودها رخ می‌دهد. این کندی سبب می‌شود که هنگام انتقال الکترون‌ها از یک الکتروود به الکتروود دیگر مقداری افت ولتاژ داشته باشیم.

این افت ولتاژ برابر است با:

$$\Delta V_{act} = A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad i > i_0 \quad (28-3)$$

که در آن i چگالی جریان پیل سوختی و $A = \frac{RT}{2aF}$ است. هرچه واکنش کندتر باشد مقدار A بزرگتر است. i_0 برابر حداقل چگالی جریانی است که در آن افت ولتاژ شروع می‌شود. a ثابت انتقال بار بوده و مقدارش بستگی به جنس الکتروود و الکترولیت دارد. برای پیل سوختی نوع هیدروژنی مقدار a برابر 0.5 است. T دما بر حسب درجه کلوین می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌کنیم با افزایش دما ثابت A زیاد می‌شود بنابراین ممکن است این تصور پیش آید که با افزایش دما افت ولتاژ بیشتر می‌شود. اما باید دقت کرد که افزایش دما باعث افزایش i_0 نیز می‌شود به نحوی که این افزایش خیلی بیشتر از افزایش A است. بنابراین در دماهای بالا افت ولتاژ برانگیختگی کم می‌شود [۱].

۳-۴-۲- تلفات اهمی^۱

این تلفات ناشی از مقاومت الکترودها در برابر عبور الکترون‌ها و همچنین مقاومت الکترولیت در برابر عبور یون‌ها می‌باشد. افت ولتاژ ناشی از این نوع تلفات رابطه مستقیم با چگالی جریان دارد، به همین دلیل به آن تلفات اهمی می‌گویند. افت ولتاژ ناشی از تلفات اهمی برابر است با:

$$\Delta V_{ohmic} = i \times r = i \times \alpha \times \exp\left(\beta\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (29-3)$$

که در آن α و β مقادیر ثابت، T دمای پیل سوختی و T_0 برابر دمای محیط می‌باشد [۱].

¹ Ohmic Losses

۳-۴-۳- تلفات انتقال یا تراکم^۱

این تلفات ناشی از تغییر غلظت واکنش‌گرها در سطح الکترودها می‌باشد. یعنی تغییر غلظت سوخت هیدروژن و اکسیژن باعث تغییر ولتاژ می‌شود. در پیل سوختی هیدروژنی، اکسیژن معمولاً از هوا تأمین می‌شود. بنابراین فشار آن را ثابت می‌گیریم اما فشار هیدروژن به مرور زمان کاهش می‌یابد. این افت ولتاژ برابر است با:

$$\Delta V_{trans} = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (3-30)$$

اگر در چگالی جریان صفر فشار پیل سوختی را برابر P_1 در نظر بگیریم با فرض اینکه فشار پیل سوختی به صورت خطی با افزایش جریان، کاهش یابد خواهیم داشت:

$$P_2 = P_1 \left(1 - \frac{i}{i_1}\right) \quad (3-31)$$

که i_1 حداکثر چگالی جریانی است که پیل سوختی می‌تواند در آن کار کند. بنابراین می‌توان نوشت:

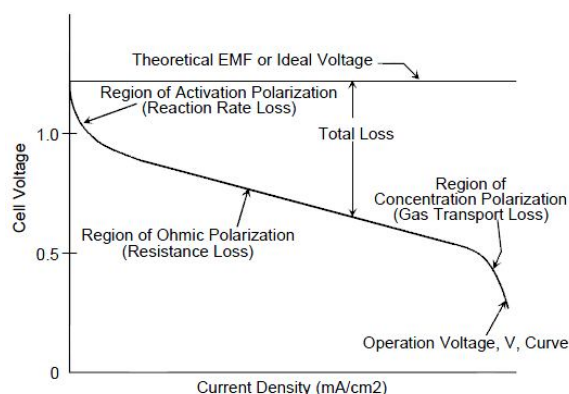
$$\Delta V_{trans} = -\frac{RT}{2F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_1}\right) \quad (3-32)$$

با توجه به مطالب گفته شده، رابطه‌ی ۳-۳۳ رابطه ولتاژ پیل سوختی را براساس پارامترهای موجود در مدل و با در نظر گرفتن تلفات اهمی نشان می‌دهد (از دو تلفات دیگر در این پایان نامه صرف‌نظر شده است):

$$V_{fc} = N_0 \left(E_0 + \frac{RT}{2F} \left(\ln\left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right) \right) \right) - rI_{fc} \quad (3-33)$$

شکل ۳-۱ مشخصه ولتاژ - جریان پیل سوختی در عملکرد ایده‌آل و واقعی نشان می‌دهد (در این شکل تمام تلفات در نظر گرفته شده است):

¹ Concentration or Transportation Losses



شکل ۳-۱- مشخصه ولتاژ - چگالی جریان پیل سوختی [۵]

۳-۵- تعریف بازده و توان

بازده پیل سوختی را به صورت نسبت توان خالص خروجی به توان شیمیایی سوخت تعریف می‌کنند. که توان خالص خروجی برابر با اختلاف توان تولیدی پشته با توان پارازیتی می‌باشد. توان پشته برابر با حاصلضرب ولتاژ پشته در جریان پشته می‌باشد. و توان مصرف شده توسط کمپرسور و تلفات ثابت، تلفات پارازیتی را تشکیل می‌دهند [۷]:

$$\eta = \frac{P_{net}}{P_{fuel}} \quad (3-34)$$

$$P_{fuel} = \frac{Hn_{cell}}{2F} \cdot I_{st} \quad (3-35)$$

$$\eta(I_{st}) = \frac{2FP_{net}}{Hn_{cell}I_{st}} \quad (3-36)$$

$$P_{net} = P_{stack} - P_{parasitic} \quad (3-37)$$

$$P_{stack} = V_{st} \cdot I_{st} \quad (3-38)$$

$$P_{parasitic} = P_{compressor} + P_{others} \quad (3-39)$$

P_{net} : توان خالص خروجی، P_{fuel} : توان سوخت، H : حداقل ارزش حرارتی هیدروژن، n_{cell} : تعداد سلول‌های پیل سوختی، I_{st} : جریان پشته، V_{st} : ولتاژ پشته، $P_{compressor}$: تلفات کمپرسور، P_{others} : تلفات ثابت، P_{stack} : توان پشته، $P_{parasitic}$: تلفات پارازیتی و F : ثابت فارادی می‌باشد.

در این پایان‌نامه تلفات کمپرسور در نظر نگرفته شده است. تلفات ثابت با توجه به مرجع [۷] و باتوجه به اینکه در این پایان‌نامه از یک پیل سوختی با غشای تبادل یونی ۵۰ کیلووات استفاده شده است، ۱۶۰۰ وات در نظر گرفته شده است.

۳-۶- باتری

باتری‌ها یک نوع از ذخیره‌سازهای انرژی هستند. آنها انرژی را از طریق فرآیندهای الکتروشیمیایی ذخیره و آزاد می‌کنند. تمام فناوری‌های باتری دارای دو ویژگی اساسی که بر طراحی باتری، تولید، هزینه اجرا، عملکرد و دوام تأثیر می‌گذارد می‌باشند.

چگالی توان مقدار انرژی که در یک پریود زمانی معین تحویل داده می‌شود.

چگالی انرژی ظرفیت برای ذخیره انرژی است [۱۲].

۳-۶-۱- حالت شارژ باتری

سه چیز در مورد باتری‌ها حائز اهمیت است و باید در مدیریت و کنترل باتری، آنها را در نظر گرفت: حالت شارژ باتری یا SOC^۱، دوم حالت سلامت باتری و سوم باقیمانده زمان فعالیت (t_f) می‌باشند.

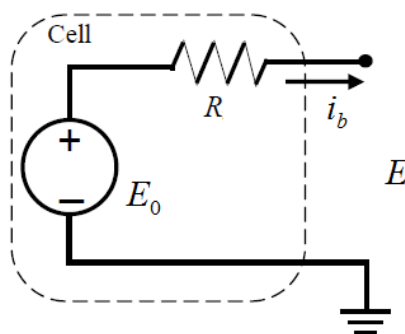
SOC باتری را می‌توان تعریف کرد:

”حالت شارژ باتری عبارت است از درصدی از حداکثر شارژ ممکن که باتری قابل شارژ می‌تواند ارائه دهد.“

¹ State Of Charge

۳-۶-۲- مدل باتری

مدل‌های باتری را می‌توان به سه دسته، مدل عملی، مدل الکتروشیمیایی و مدل مدار معادل تقسیم کرد. مدل مدار معادل مناسب‌ترین مدل برای تحلیل و شبیه‌سازی دینامیکی باتری است. در شکل ۳-۲ یک مدل ساده از باتری نشان داده شده است.



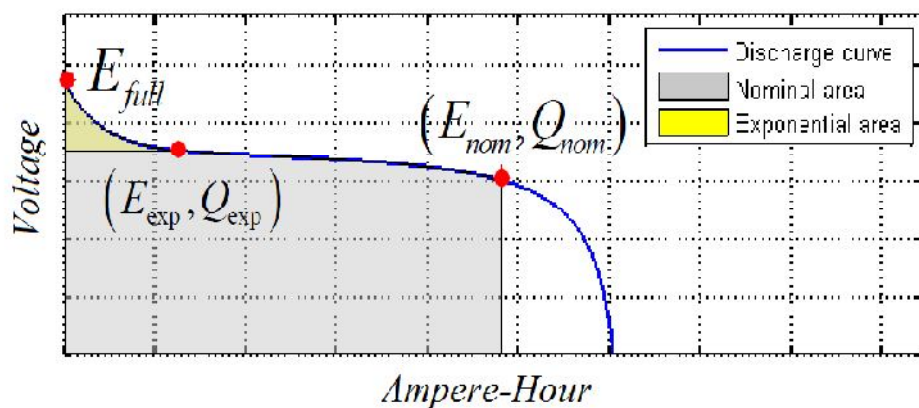
شکل ۳-۲- مدل باتری

این مدل، باتری را به عنوان یک منبع ولتاژ قابل کنترل که با یک مقاومت سری متصل شده است، در نظر گرفته است. در بیان منبع ولتاژ کنترل شونده داریم:

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int i_b \cdot dt} + A \cdot \exp(-B \cdot \int i_b \cdot dt) \quad (3-40)$$

که E_0 ولتاژ بدون بار، E ولتاژ ثابت باتری، K ولتاژ قطبش، Q ظرفیت باتری (Ah)، A دامنه ناحیه‌ی نمایی و B عکس ثابت زمانی ناحیه‌ی نمایی است. در مدل ارائه شده فرض شده است که مقاومت داخلی باتری در طول شارژ و دشارژ ثابت خواهد ماند. فرض شده که معادلات بیان شده، هم برای حالت شارژ و هم برای حالت دشارژ درست است.

شکل ۳-۳ منحنی ولتاژ - ظرفیت باتری را نشان می‌دهد. سه نقطه E_{full} ، ولتاژ نامی باتری که پر شده است، (E_{exp}, Q_{exp}) مختصات نقطه‌ی پایانی نمایی و (E_{nom}, Q_{nom}) مختصات نقطه‌ی پایانی ناحیه‌ی نرمال را نشان می‌دهند.

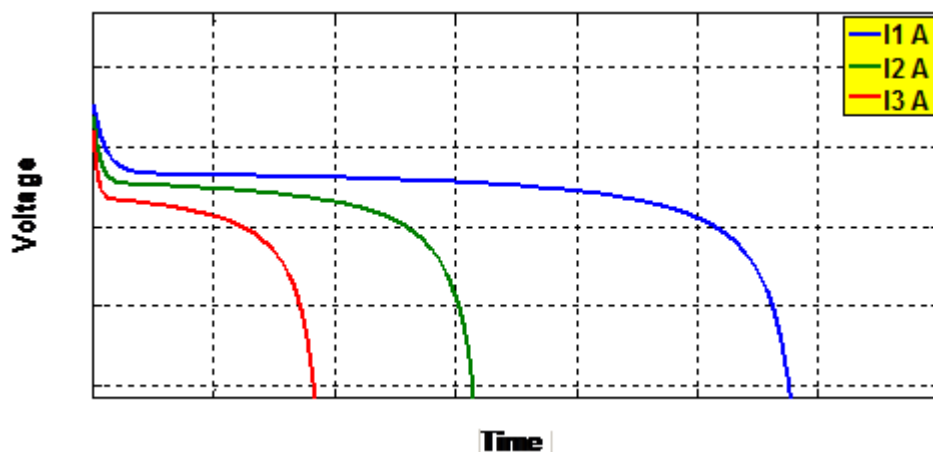


شکل ۳-۳- منحنی ولتاژ - ظرفیت باتری [۱۳]

با توجه به توضیحات ارائه شده و معادله ۴۱-۳ داریم:

$$\begin{cases} A = E_{full} - E_{exp} \\ B = 3 / Q_{exp} \\ k = [E_{full} - E_{nom} + A(\exp(-B \cdot Q_{nom}) - 1)] \cdot (Q - Q_{nom}) / Q_{nom} \end{cases} \quad (41-3)$$

همچنین در شکل ۴-۳ منحنی تغییرات ولتاژ ترمینال باتری در اثر تخلیه باتری در سه جریان مختلف $(I_3 > I_2 > I_1)$ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳- منحنی تغییرات ولتاژ ترمینال باتری در اثر تخلیه باتری در سه جریان مختلف

۳-۶-۳- انواع باتری

باتری‌ها از نظر اندازه، نوع، ساختار و کاربرد دسته‌بندی می‌شوند. معمول‌ترین نوع باتری‌ها به شرح زیر می‌باشد:

۳-۶-۳-۱- باتری اسید سربی^۱

این باتری برای سال‌های زیادی به صورت تجاری و به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. دارای قابلیت بازیافت بالا و نسبتاً ارزان می‌باشد. ایرادی که به این نوع باتری وارد است چگالی انرژی پایین می‌باشد.

۳-۶-۳-۲- باتری نیکل - کادمیوم^۲

این نوع باتری‌ها دارای یک چرخه عمر بالا و مقاومت داخلی کم می‌باشند که برای نرخ دشارژ بالا مورد نیاز می‌باشد. و از چگالی انرژی کم برخوردارند. از معایب این نوع باتری‌ها می‌توان نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از کادمیوم، و اثر حافظه‌ای قابل توجه (یعنی آن قبل از شارژ باید کاملاً تخلیه گردد در غیر این صورت ظرفیت آن کاهش می‌یابد)، را نام برد.

۳-۶-۳-۳- باتری هیبرید نیکل - فلز^۳

این باتری‌ها در جایگزینی باتری‌های نیکل - کادمیوم ایجاد شده است. و در بسیاری از کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرند. که دلیل آن یک مصالحه خوب بین پارامترهای عملکردی مختلف، چگالی توان و انرژی، طول عمر و قیمت و... است. ضعف اصلی این باتری نرخ دشارژ خودی بالا، مدیریت شارژ پیچیده است و در ضمن قیمت این باتری از قیمت باتری اسید سرب کمتر نیست.

¹ Lead-Acid

² Nickel-cadmium

³ Nickel-metal Hybride

۳-۶-۳-۴- باتری لیتیومی^۱

مشهورترین نوع باتری‌های لیتیومی باتری لیتیم - یون^۲ می‌باشد. این باتری چرخه عمر بالا و چگالی توان و انرژی بالا دارد. تکنولوژی این باتری هنوز کامل نیست. بنابراین این باتری‌ها در مقایسه با دیگر باتری‌ها نسبتاً گران می‌باشند. یک سری نگرانی از لحاظ ایمنی این نوع باتری‌ها وجود دارد که باید حل گردد. بسیار سبک وزن، اندازه مناسب، شارژ و دشارژ سریع، راندمان شارژ و دشارژ بالا با مقاومت داخلی کم و بدون اثر حافظه می‌باشد [۱۴] و [۱۵].

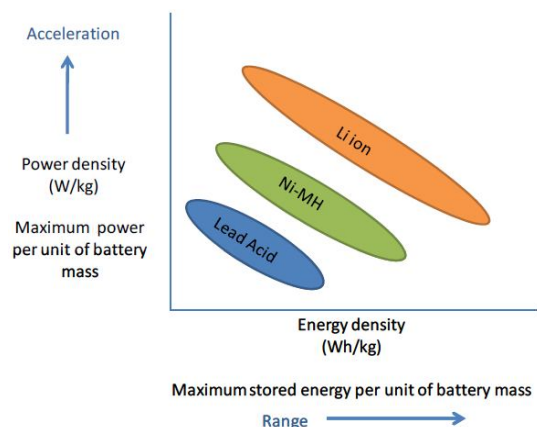
باتری لیتیم - یون یک باتری قابل شارژ می‌باشد. که در آن یون‌های لیتیم بین کاتد و آند حرکت می‌کند. جریان الکتریسته ایجاد شده برای کاربردهای الکتریکی استفاده می‌شود. در سیکل دشارژ لیتیم در آند یونیزه شده و به سمت الکترولیت خارج می‌شود و از یک جداکننده پلاستیکی عبور کرده و وارد کاتد می‌شود. و جریان الکتریکی در مدار خارجی حرکت می‌کند. در زمان شارژ یون‌های لیتیم از کاتد به آند از طریق جداکننده می‌رود [۱۵].

این نوع باتری‌ها به عنوان منابع انرژی برای دستگاه‌های ارتباطی، مانند تلفن‌های همراه و رایانه‌های شخصی و همچنین به عنوان باتری‌های ذخیره‌ساز در وسایل نقلیه سازگار با محیط زیست و همچنین به عنوان ذخیره‌ساز قدرت و تثبیت بار در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر مانند مزرعه بادی و تولید برق خورشیدی توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱۶].

در شکل ۳-۵ و ۳-۶ و در جدول ۳-۳ یک سری مقایسه بین باتری لیتیم - یون با دیگر باتری‌ها آورده شده است.

¹ Lithium

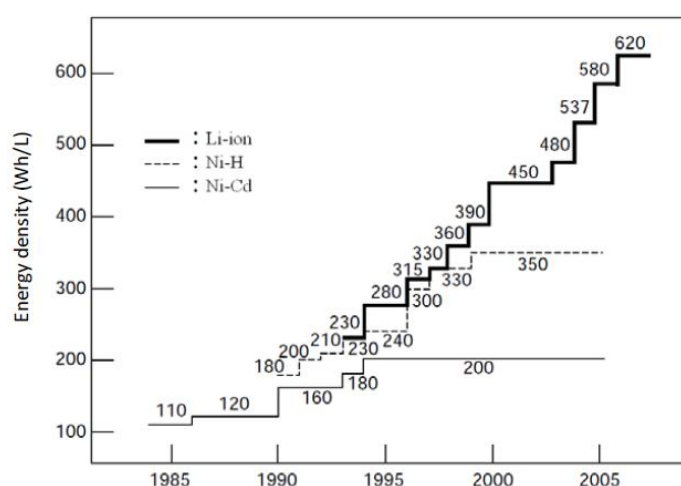
² Lithium-Ion



شکل ۳-۵- چگالی توان و انرژی براساس نوع باتری [۱۵]

جدول ۳-۳- مقایسه فنی براساس نوع باتری ها [۱۵]

Battery type	Lead acid	Ni-Cd	Ni-MH	Lithium-ion
Energy density (Wh/Kg)	35	40-60	60	120
Power density (W/kg)	180	150	250-1000	1,800
Cycle life	4,500	2,000	2,000	3,500
Cost (\$/kWh)	269	280	500-1,000	Consumer electronics: 300-800 Vehicles: 1,000-2,000
Battery characteristics	High reliability, low cost	Memory effect	Currently, best value and most popular battery for HEVs	Small size, light weight
Application	Car battery, forklift, golf cart, backup power	Replacement for flashlight battery	HEVs, replacement for flashlight battery	Consumer electronics



شکل ۳-۶- پیشرفت در چگالی انرژی در سه نوع باتری با سال [۱۵]

با توجه به مزایای باتری لیتیم - یون، در این پایان نامه از باتری لیتیم - یون استفاده شده است. که در شبیه سازی از مدل باتری موجود در کتابخانه Matlab استفاده شده است. مشخصات این باتری در جدول ۳-۴ داده شده است.

جدول ۳-۴- مشخصات باتری لیتیم - یون

Nominal Voltage (V)	500
Rated Capacity (Ah)	50
Initial State-Of-Charge (%)	60

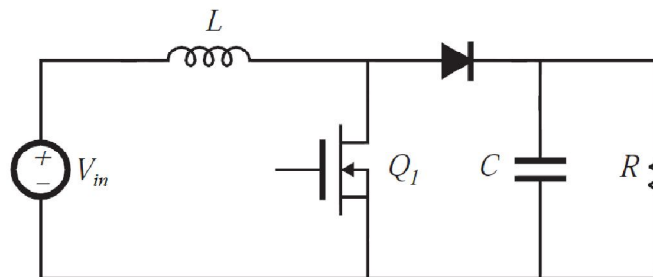
۳-۷- مبدل DC-DC

مبدل های قدرت DC-DC در کاربردهای مختلفی به کار گرفته می شوند. از جمله این کاربردها رایانه های شخصی، سیستم های قدرت فضاپیما، تجهیزات ارتباط راه دور و همچنین درایو موتور DC می باشد. ورودی یک مبدل DC-DC ولتاژ غیرقابل تنظیم می باشد. مبدل یک ولتاژ خروجی تنظیم شده تولید می کند. از انواع مبدل های DC-DC می توان مبدل Boost، مبدل Cuk، مبدل Buck و مبدل Buck-Boost را می توان نام برد.

در این پایان نامه از مبدل Boost استفاده شده است. نقش مبدل Boost در سیستم پیل سوختی افزایش ولتاژ برای کنترل توان و تنظیم ولتاژ می باشد [۱۷]. در ادامه مدل سازی این نوع مبدل شرح داده شده است.

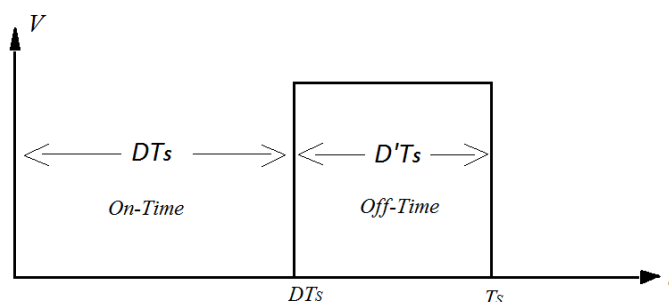
۳-۷-۱- مدل سازی مبدل افزایش دهنده

مبدل افزایش دهنده یا Boost همانطور که از نامش مشخص است ولتاژ سطح پایین تر را به ولتاژی با سطح بالاتر تبدیل می کند. یک مبدل Boost در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷- مبدل Boost [۱۳]

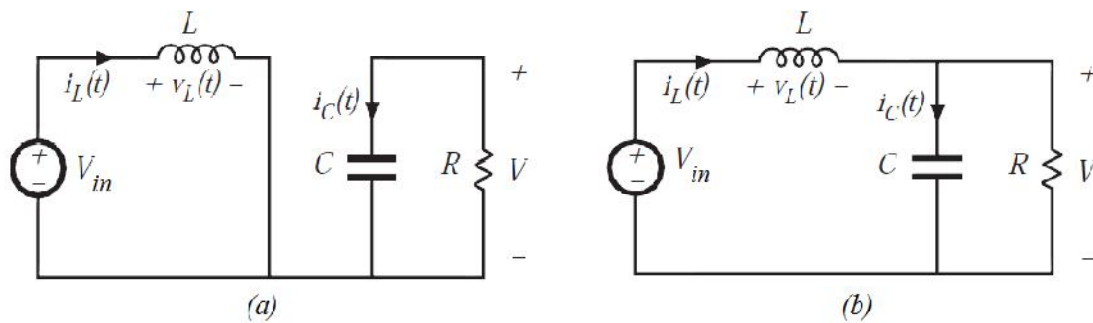
سوئیچ این مبدل در یک فرکانس کاری ثابت عمل خواهد کرد. این فرکانس را f_s می‌نامند. مدت زمان کل یک بار خاموش و روشن شدن سوئیچ برابر T_s ثانیه خواهد بود. سوئیچ به مدت DT_s ثانیه روشن خواهد بود. لازم به ذکر است که D نسبت زمان روشن بودن سوئیچ به کل زمان عملکرد سوئیچ است. همچنین سوئیچ به مدت $(1-D)T_s$ یا $D'T_s$ ثانیه خاموش خواهد بود. در شکل ۳-۸ منحنی ولتاژ دو سر سوئیچ برحسب زمان نشان داده شده است.



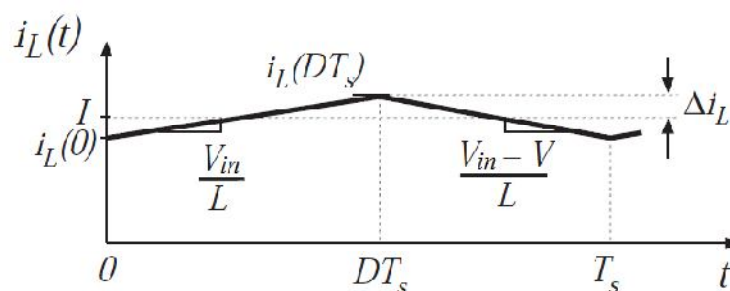
شکل ۳-۸- ولتاژ دو سر سوئیچ در مبدل Boost [۱۳]

در طول فاصله زمانی اول سوئیچینگ (DT_s)، با بسته شدن سوئیچ جریان از منبع ورودی در سلف L جاری می‌شود و انرژی در سلف ذخیره می‌شود و دیود در بایاس معکوس قرار می‌گیرد و جریان به سمت بار جاری نمی‌شود. اما در فاصله زمانی دوم سوئیچینگ ($D'T_s$) یعنی زمانی که سوئیچ باز می‌شود، اثر سلف و منبع ورودی هر دو در خروجی ظاهر می‌شود. در شکل (۳-۹-۱) مبدل Boost را زمانی که سوئیچ بسته است، نشان می‌دهد و شکل (۳-۹-۲) مبدل Boost را زمانی که سوئیچ باز است، نشان می‌دهد.

در ابتدا در بررسی و محاسبات لازم برای المان‌های مبدل، فرض بر این است که تمامی مدت مبدل در حالت جریان پیوسته یا CCM^۱ کار می‌کند، در شکل ۳-۱۰ حالت جریان پیوسته برای جریان سلف نشان داده شده است که در آن شرط $i_L(t) > 0$ برقرار است.



شکل ۳-۹- مبدل Boost در حالت باز و بسته بودن سوئیچ [۱۳]



شکل ۳-۱۰- حالت جریان پیوسته برای جریان سلف در مبدل Boost [۱۳]

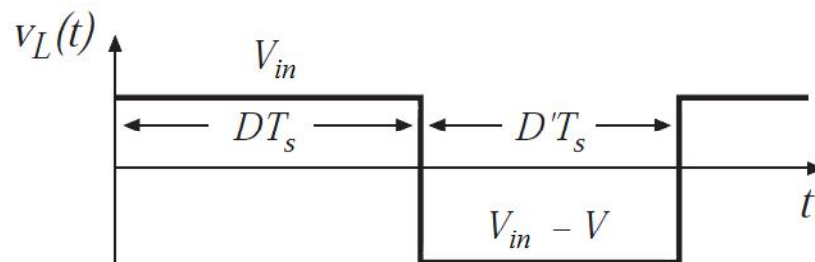
در شکل ۳-۱۱ ولتاژ دو سر سلف در دو حالت سوئیچ بسته و باز نشان داده شده است. زمانی که سوئیچ بسته است ولتاژ منبع ورودی در دو سر سلف قرار می‌گیرد و سرعت افزایش جریان سلف به ولتاژ ورودی و اندازه سلف بستگی دارد. با توجه به شکل ۳-۱۱ ولتاژ مثبت در دو سر سلف قرار می‌گیرد و داریم:

$$V_L = V_{in} \quad (۳-۴۲)$$

^۱ Continuous Conduction Mode

و زمانی سوئیچ باز است مقدار معلوم در شکل ۱۱-۳ در دو سر سلف قرار می‌گیرد و ولتاژ سلف خواهد شد:

$$V_L = V_{in} - V \quad (۴۳-۳)$$



شکل ۱۱-۳- ولتاژ دو سر سلف در دو حالت سوئیچ بسته و باز [۱۳]

در شرایط پایدار، در طول یک پریود زمانی (T_s)، شکل موج‌ها تکرار می‌شوند. بنابراین مقدار میانگین جریان و ولتاژ سلف باید برابر صفر شود. زمان سوئیچینگ را می‌توان به دو زمان t_{on} و t_{off} تقسیم کرد. که به ترتیب مدت زمان روشن و خاموش شدن سوئیچ است. رابطه $T_s = t_{on} + t_{off}$ برقرار است. با توجه به شکل ۱۱-۳ برای کل زمان سوئیچینگ داریم:

$$V_{in} \times t_{on} + (V_{in} - V) \times t_{off} = 0 \quad (۴۴-۳)$$

با تقسیم هر دو طرف بر T_s داریم:

$$\frac{V}{V_{in}} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (۴۵-۳)$$

با فرض اینکه بازده مبدل ۱۰۰ درصد باشد، توان ورودی به مبدل با توان دریافتی در طرف دیگه مبدل برابر خواهد بود. ($V_{in} \times I_{in} = V \times I$) از اینرو:

$$\frac{I}{I_{in}} = (1 - D) \quad (46-3)$$

$$\frac{V_{in}}{V} = (1 - D) \quad (47-3)$$

۳-۷-۱-۱-ریپل ولتاژ و جریان

آنچه در تعیین ریپل معمول است، برای ولتاژ خروجی (ΔV) ریپل حدود ۱ درصد مقدار مولفه DC ولتاژ خروجی در نظر گرفته می‌شود. و برای ریپل جریان سلف مقدار متغیر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد مقدار DC جریان سلف لحاظ می‌شود. در مورد ریپل جریان سلف این نکته حائز اهمیت است؛ که اگر ریپل از این حدود کمتر در نظر گرفته شود اندازه سلف را باید بزرگتر در نظر گرفت. که هم از نظر حجم و هم از نظر هزینه ساخت، مقرون به صرفه نخواهد بود.

۳-۷-۱-۱-۱-Boost ریپل جریان سلف در مبدل

طبق آنچه بیان شده، ولتاژ دو سر سلف برابر است با:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (48-3)$$

با استفاده از معادلات ۳-۴۲ و ۳-۴۸ معادله زیر بدست خواهد آمد:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in}}{L} \quad (49-3)$$

که $\frac{di_L}{dt}$ شیب منحنی جریان سلف در قسمت اول زمان سوئیچینگ یعنی، مدت زمانی که سوئیچ روشن است خواهد بود. برای دومین قسمت از زمان سوئیچینگ که سوئیچ خاموش خواهد بود، با استفاده از معادلات ۳-۴۳ و ۳-۴۸ داریم:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in} - V}{L} \quad (50-3)$$

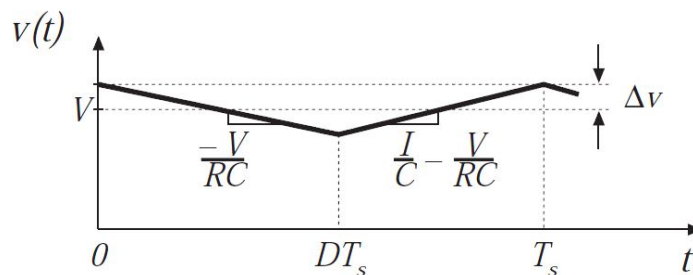
در شکل ۳-۱۰ مقدار Δi_L نشان داده شده است. مقدار I_{Lp-p} دو برابر Δi_L است و با توجه به بیان خطی $\frac{di_L}{dt}$ مقدار ریپل پیک تا پیک جریان سلف خواهد بود:

$$I_{Lp-p} = 2\Delta i_L = \frac{V_{in} \times D \times T_s}{L} \quad (۳-۵۱)$$

از آنجایی که برای مبدل شرایطی با بازده ۱۰۰ درصد فرض شده است، اینکه در حالت DT_s یا $D'T_s$ ریپل محاسبه شود فرقی نخواهد کرد. با توجه به معادله ۳-۵۱ مقدار سلفی که ریپل مطلوب را ایجاد می کند را می توان تعیین کرد.

$$L = \frac{(V_{in} \times D \times T_s)}{(2 \times \Delta i_L)} \quad (۳-۵۲)$$

۳-۷-۱-۱-۲- ریپل ولتاژ خروجی در مبدل Boost



شکل ۳-۱۲- ریپل ولتاژ خروجی مبدل Boost [۱۳]

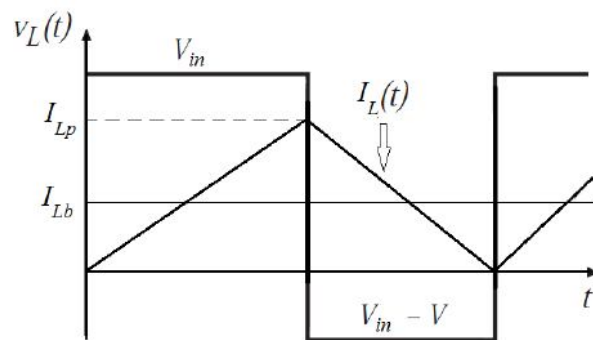
شکل ۳-۱۲ ریپل ولتاژ خروجی مبدل Boost را نشان می دهد. در شرایط عملکردی پیوسته، مقدار پیک تا پیک ولتاژ خروجی می تواند با توجه به شکل ۳-۱۲ محاسبه شود. این مقدار با رابطه ۳-۵۳ تعیین می شود.

$$\Delta V = I \times D \times \frac{T_s}{C} = \frac{(V \times D \times T_s)}{R \times C} \quad (۳-۵۳)$$

بنابراین می توان مقدار اندازه خازن مورد نیاز برای برآوردن مقدار مطلوب ریپل از معادله ۳-۵۴ تعیین کرد. همانطور که مشاهده می شود به ازای مقدار بزرگتر C مقدار ریپل ولتاژ در خروجی کاهش می یابد. از اینرو خازن در خروجی به عنوان یک فیلتر عمل می کند [۱۳].

$$C = \frac{(D \times I \times T_s)}{\Delta V} \quad (54-3)$$

در ادامه در بررسی و محاسبات لازم برای المان‌های مبدل، فرض بر این است که تمامی مدت مبدل در حالت جریان گسسته یا DCM^۱ کار می‌کند، اولین گام در تحلیل مبدل Boost در حالت جریان گسسته، بدست آوردن مقدار سلف به ازای شرایط مرزی می‌باشد. شکل ۳-۱۳ ولتاژ و جریان سلف را در شرایط مرزی نشان می‌دهد. در این شکل I_{Lp} مقدار پیک جریان سلف و I_{Lb} مقدار متوسط جریان سلف در شرایط مرزی می‌باشد.



شکل ۳-۱۳- ولتاژ و جریان سلف در حالت مرزی در مبدل Boost [۱۳]

با محاسبه مقدار میانگین جریان می‌توان مقدار سلفی که به ازای آن شرایط DCM و یا CCM برقرار می‌شود را محاسبه نمود. مقدار میانگین جریان سلف مبدل Boost در شرایط مرزی از رابطه ۳-۵۵ محاسبه می‌گردد.

$$I_{Lb} = \frac{1}{2} I_{LP} = \frac{D(1-D)T_s V}{2L} \quad (55-3)$$

مقدار میانگین جریان خروجی از رابطه ۳-۵۶ محاسبه می‌گردد.

$$I_{oB} = \frac{D(1-D)^2 T_s V}{2L} \quad (56-3)$$

بنابراین می‌توان مقدار سلف را از رابطه ۳-۵۷ یا ۳-۵۸ بدست آورد.

¹ Discontinuous Conduction Mode

$$L = \frac{D(1-D)T_s V}{2I_{Lb}} \quad (57-3)$$

$$L = \frac{D(1-D)^2 T_s V}{2I_{oB}} \quad (58-3)$$

و اندازه خازن با توجه به رابطه ۵۹-۳ بدست می‌آید.

$$C = \frac{DVT_s}{\Delta V \times R} \quad (59-3)$$

با توجه به مطالب گفته شده در مورد مبدل Boost، خازن و سلف مبدل را با توجه به روابط

گفته شده برای یک مبدل Boost ۲۰۰/۵۰۰ ولت طراحی می‌شود:

جریان خروجی مبدل را در بازه (۱۵-۱۰۰) آمپر در نظر گرفته شده است. و ریپل جریان خروجی مبدل ۱۰ درصد و ریپل ولتاژ ۱ درصد در نظر گرفته شده است. و با فرض اینکه مبدل در فرکانس ۵۰ KHz ($T_s = 20\mu S$) کار می‌کند. مقدار سلف و خازن در حالت CCM محاسبه شده است.

پس با توجه به رابطه ۴۷-۳ سیکل کاری مبدل محاسبه می‌گردد:

$$\frac{200}{500} = (1-D) \Rightarrow D = 0.6$$

با توجه به روابط گفته شده در قسمت‌های قبل در مورد سلف و خازن در حالت CCM داریم:

$$L_1 = \frac{(V_{in} \times D \times T_s)}{(2 \times \Delta i_L)} = \frac{200 \times 0.6 \times 2 \times 10^{-5}}{2 \times 0.1 \times 15} = 800\mu H$$

$$C_1 = \frac{(D \times I \times T_s)}{\Delta V} = \frac{0.6 \times 15 \times 2 \times 10^{-5}}{0.01 \times 500} = 36\mu F$$

$$L_2 = \frac{(V_{in} \times D \times T_s)}{(2 \times \Delta i_L)} = \frac{200 \times 0.6 \times 2 \times 10^{-5}}{2 \times 0.1 \times 100} = 120\mu H$$

$$C_2 = \frac{(D \times I \times T_s)}{\Delta V} = \frac{0.6 \times 100 \times 2 \times 10^{-5}}{0.01 \times 500} = 240\mu F$$

از بین سلف و خازن بدست آمده مقادیر بزرگتر را به عنوان سلف و خازن مبدل در نظر گرفته شده است. مقادیر المان‌های مبدل در جدول ۳-۵ آورده شده است.

جدول ۳-۵- المان‌های مبدل افزاینده

L	$800\mu H$
C	$240\mu F$

در این پایان‌نامه مبدل در حالت جریان پیوسته در نظر گرفته شده است. و حالت جریان گسسته مطلوب نبوده و در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار نگرفته است.

۴- فصل چهارم

معرفی کنترل کننده پیشنهادی برای ردیابی حداکثر بازده
پیل سوختی

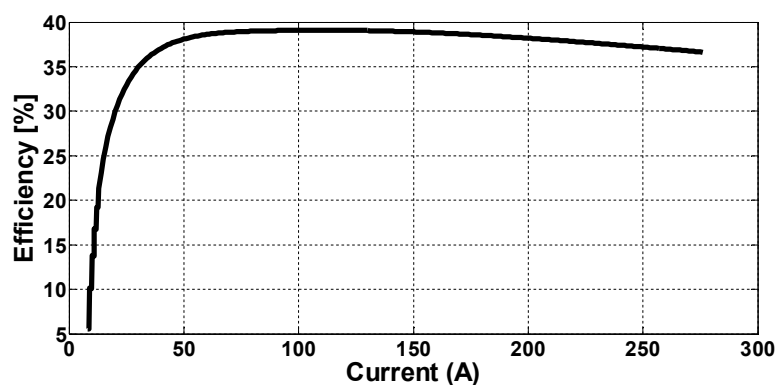
۴-۱- مقدمه

در این فصل به معرفی کنترل کننده پیشنهادی پرداخته شده است. این کنترل کننده شامل دو بخش می باشد: بخش اول کنترل جریان پیل سوختی با استفاده از الگوریتم اغتشاش و مشاهده و بخش دوم کنترل میزان سوخت ورودی پیل سوختی می باشد.

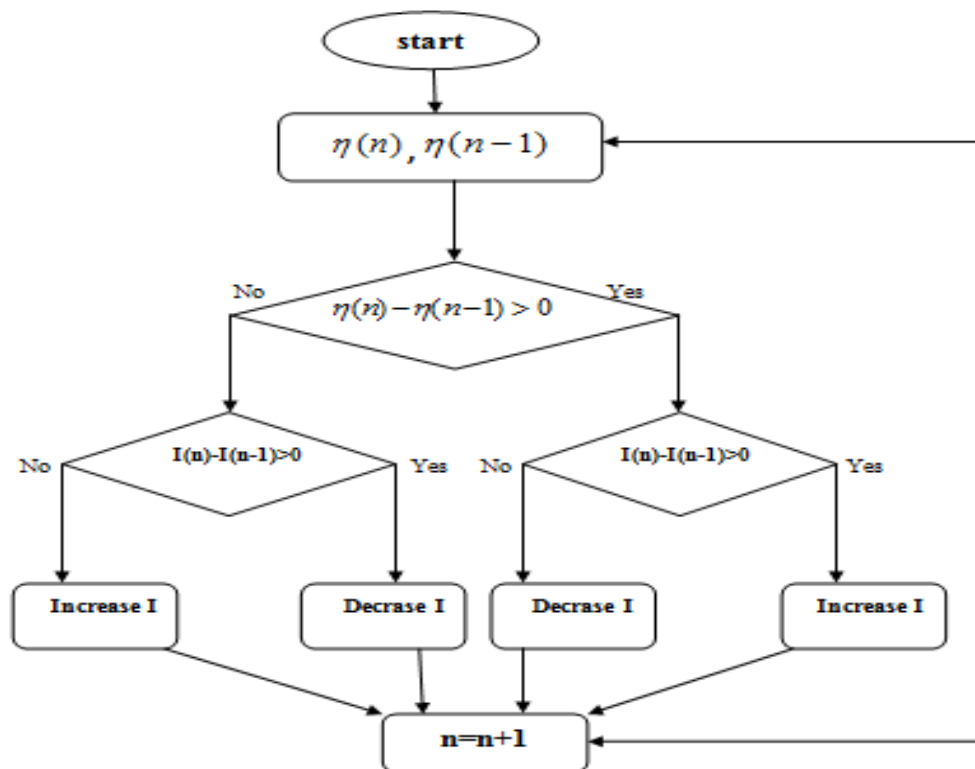
۴-۲- کنترل جریان پیل سوختی با استفاده از الگوریتم اغتشاش و مشاهده

الگوریتم اغتشاش و مشاهده به دلیل ساختار ساده و نیز به دلیل نیاز داشتن به پارامترهای خیلی کم در خیلی از مواقع برای ردیابی حداکثر توان در سیستم های فتوولتاییک مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸]، [۱۹]، [۲۰] و [۲۱]. در سیستم های فتوولتاییک با توجه به اینکه منحنی توان - جریان (یا ولتاژ) دارای یک نقطه ی حداکثر توان می باشد. ابتدا تغییرات توان را بررسی نموده و بعد با توجه به تغییرات جریان (یا ولتاژ) دستورالعمل کنترلی برای افزایش یا کاهش جریان (یا ولتاژ) صادر می گردد. و این روند تا ردیابی حداکثر توان ادامه دارد.

در منحنی بازده - جریان پیل سوختی که در شکل ۴-۱ آورده شده است. مشاهده می شود که به ازای جریان های مختلف، مقادیر بازده متفاوت است. و در یک جریان مشخص بازده پیل سوختی در مقدار حداکثر قرار دارد. با توجه به ارتباط بازده با جریان، الگوریتم اغتشاش و مشاهده در مورد این سیستم به کار گرفته شده است. و این الگوریتم به صورت فلوچارت شکل ۴-۲ اصلاح شده است.



شکل ۴-۱- منحنی بازده - جریان پیل سوختی



شکل ۴-۲- الگوریتم اغتشاش و مشاهده

اساس این الگوریتم، محاسبه بازده (η) با توجه به روابط گفته شده در فصل‌های قبل و مقایسه آن با مقدار قبلی می‌باشد. این روش متناوباً تکرار می‌شود. یعنی به صورت دائم نقطه‌ی حداکثر بازده را ردیابی می‌کند. جهت رسیدن به نقطه‌ی حداکثر بازده، تغییرات بازده مشاهده می‌شود و در صورت مثبت بودن تغییرات جریان بررسی می‌شود که اگر تغییرات مثبت باشد به افزایش جریان ادامه داده می‌شود و اگر هم منفی بود که جریان همچنان کاهش خواهد یافت. ولی اگر تغییرات بازده منفی بود سپس تغییرات جریان مقداری مثبت به خود گرفت، جریان کاهش داده می‌شود و اگر تغییرات جریان مقداری منفی شد جریان افزایش داده خواهد شد.

به بیان ساده‌تر، الگوریتم اغتشاش و مشاهده با تنظیم سیکل کاری مبدل افزایشده جریان پیل سوختی یا همان جریان ورودی مبدل را همواره در مقدار بهینه قرار می‌دهد. مقدار بهینه جریان، مقداری است که به ازای آن پیل سوختی در حداکثر بازده قرار می‌گیرد. در این پایان‌نامه از الگوریتم اغتشاش و مشاهده با گام ثابت استفاده شده است.

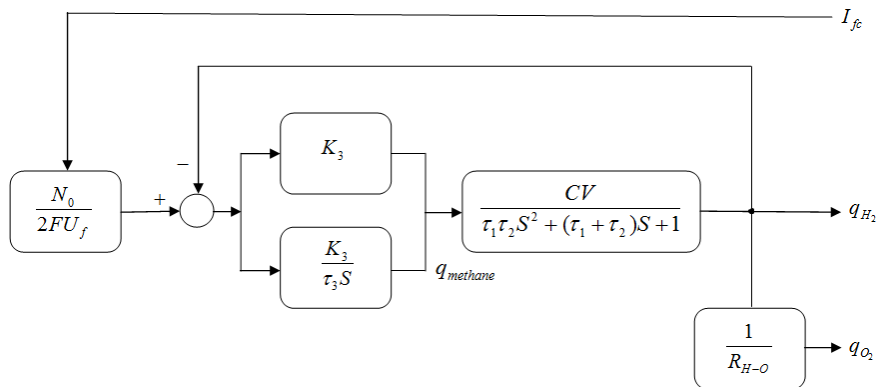
۳-۴ - کنترل میزان سوخت ورودی پیل سوختی

در مرجع [۱۱] و [۱۷] یک مدل ساده از ریفورمر که هیدروژن را از ریفرمینگ متان تولید می‌کند آورده شده است. تابع انتقال یک تابع مرتبه دو می‌باشد. مدل ریاضی آن به صورت رابطه ۱-۴ می‌باشد.

$$\frac{q_{H_2}}{q_{methane}} = \frac{CV}{\tau_1 \tau_2 S^2 + (\tau_1 + \tau_2)S + 1} \quad (۱-۴)$$

$q_{methane}$ مقدار شارش متان ($kmol / s$) می‌باشد.

CV ضریب تبدیل ($kmolhydrogen / kmolmethane$) می‌باشد. و τ_1 و τ_2 ثابت زمانی ریفورمر می‌باشند. برای کنترل شارش اکسیژن با توجه به توان خروجی پیل سوختی، یک فیدبک از جریان پشته در نظر گرفته شده است. یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی (PI) برای کنترل میزان شارش متان در ریفورمر استفاده شده است. با توجه به واکنش کلی پیل سوختی که در فصل اول بیان شد. ضریب استوکیومتری هیدروژن به اکسیژن ۲ به ۱ می‌باشد. برای جلوگیری از آسیب به الکترولیت پیل سوختی اختلاف فشار بین هیدروژن و اکسیژن عبوری از محفظه کاتد و آنود برای عملکرد نرمال باید زیر 4Kpa باشد. بنابراین شارش اکسیژن ورودی می‌بایست کنترل گردد. میزان شارش اکسیژن با استفاده از نسبت R_{H-O} (نسبت فلوی هیدروژن ورودی به فلوی اکسیژن ورودی) تعیین شده است. پس R_{H-O} در ۱/۱۴۵ با کنترل سرعت کمپرسور هوا نگه داشته می‌شود. کنترل‌کننده در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. K_3 بهره کنترل‌کننده PI و τ_3 ثابت زمانی کنترل‌کننده PI می‌باشد.



شکل ۴-۳- مدل ریفرمر و کنترل کننده

به طور معمول ضریب بهره‌برداری سوخت بین ۸۰-۹۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.

برای یک شارش هیدروژن ورودی معین جریان پیل سوختی می‌تواند در محدوده زیر محدود شود.

$$\frac{0.8q_{H_2}^{in}}{2K_r} \leq I_{fc} \leq \frac{0.9q_{H_2}^{in}}{2K_r} \quad (۲-۴)$$

برای بهره‌برداری بهینه، ضریب بهره‌برداری U_f ، ۸۵ درصد پیشنهاد می‌شود.

$$q_{H_2}^{in} = \frac{2K_r I_{fc}}{0.85} \quad (۳-۴)$$

ضریب CV عدد ۲ در نظر گرفته شده است. و $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 2$ می‌باشد. و مقدار $k_3 = \frac{1}{2} CV$ در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن این دو ساختار برای کنترل جریان خروجی پیل سوختی و شارش هیدروژن برای سیستم ترکیبی پیل سوختی - باتری مشاهده شده است که پیل سوختی مورد نظر تا حد قابل قبولی در حداکثر بازده قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در فصل پنجم آورده شده است.

۵- فصل پنجم

نتایج شبیه‌سازی

۵-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا شبیه‌سازی پیل سوختی مورد نظر آورده شده است و مشخصه‌های آن استخراج گردیده است. سپس نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در سه حالت مختلف آورده شده است:

الف) ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی در سیستم تولید توان، شامل: پیل سوختی، مبدل افزایشنده و بار

ب) ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی در سیستم تولید توان، شامل: پیل سوختی، مبدل افزایشنده، باتری و بار

ج) ردیابی حداکثر توان پیل سوختی در سیستم تولید توان، شامل: پیل سوختی، مبدل افزایشنده، باتری و بار

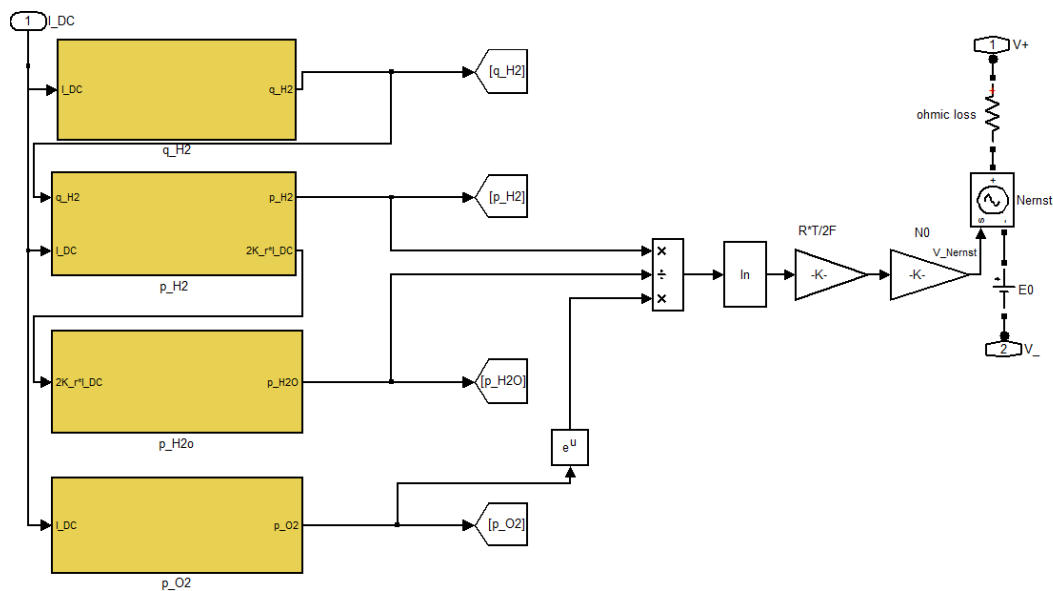
۵-۲- پیاده‌سازی مدل پیل سوختی در سیمولینک

با توجه به معادلات گفته شده در فصل‌های قبل می‌توان پیل سوختی را به صورت شکل ۵-۱ مدل نمود. برای این منظور از یک پیل سوختی غشای تبادل یونی با توان نامی ۵۰ کیلووات استفاده شده است. مقادیر پارامترهای به کار گرفته شده در شبیه‌سازی پیل سوختی در جدول ۵-۱ آورده شده است:

جدول ۵-۱- پارامترهای شبیه‌سازی پیل سوختی [۱۷]

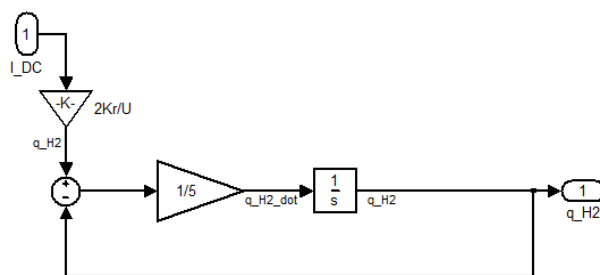
۳۸۴	N_0	تعداد پیل‌های سری شده در یک پشته
۰/۶	E_0	ولتاژی باری استاندارد $[V]$
۸۳۱۴/۴۷	R	ثابت جهانی گازها $[(1atm)/(kmol.K)]$
۳۴۳	T	دمای مطلق $[K]$

ثابت فارادی $[C/kmol]$	F	۹۶۴۸۴۶۰۰
ثابت مولار دریچه هیدروژن $[kmol/(atm.s)]$	K_{H_2}	$۸/۴۳ \times ۱۰^{-۴}$
ثابت مولار دریچه آب $[kmol/(atm.s)]$	K_{H_2O}	$۲/۸۱ \times ۱۰^{-۴}$
ثابت مولار دریچه اکسیژن $[kmol/(atm.s)]$	K_{O_2}	$۲/۵۲ \times ۱۰^{-۳}$
ثابت مدل سازی $[kmol/(s.A)]$	K_r	$۹/۹۴۹۷ \times ۱۰^{-۷}$
مقاومت داخلی پیل سوختی $[\Omega]$	r	۰/۱۲۶
ثابت زمانی هیدروژن $[s]$	t_{H_2}	۲۶/۱
ثابت زمانی اکسیژن $[s]$	t_{O_2}	۲/۹۱
ثابت زمانی آب $[s]$	t_{H_2O}	۷۸/۳
ضریب بهره برداری	U_f	۰/۸

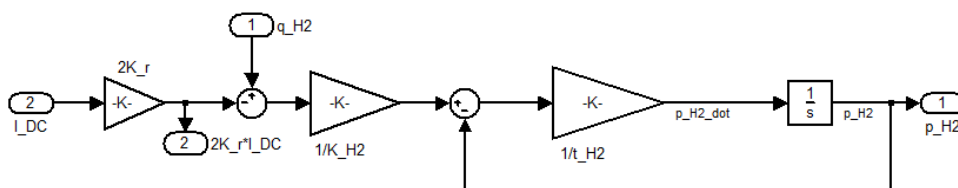


شکل ۵-۱- بلوک پیل سوختی

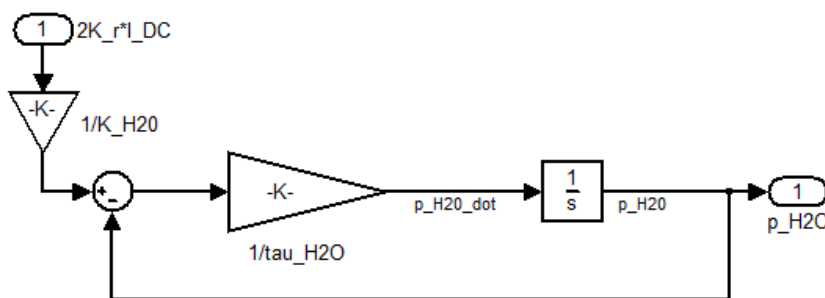
که زیر بلوک‌های q_{H_2} ، P_{H_2} ، P_{H_2O} و P_{O_2} به صورت شکل‌های ۵-۲، ۵-۳، ۵-۴ و ۵-۵ پیاده شده‌اند:



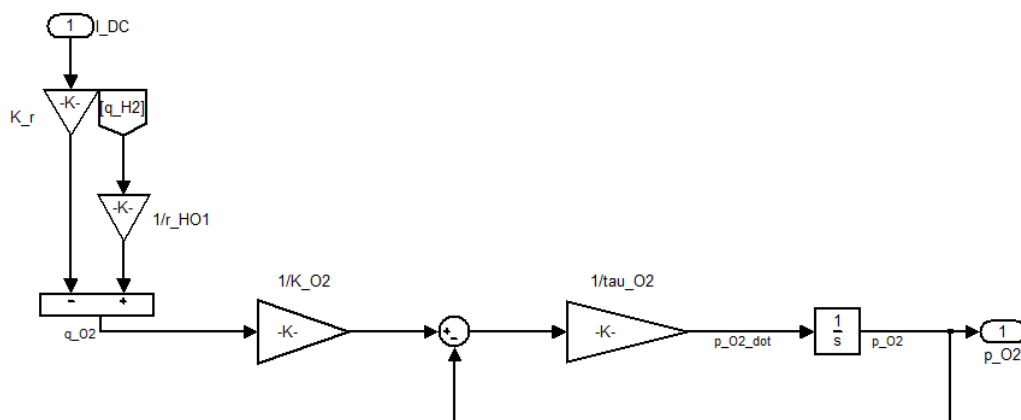
شکل ۵-۲- زیر بلوک q_{H_2}



شکل ۵-۳- زیر بلوک P_{H_2}

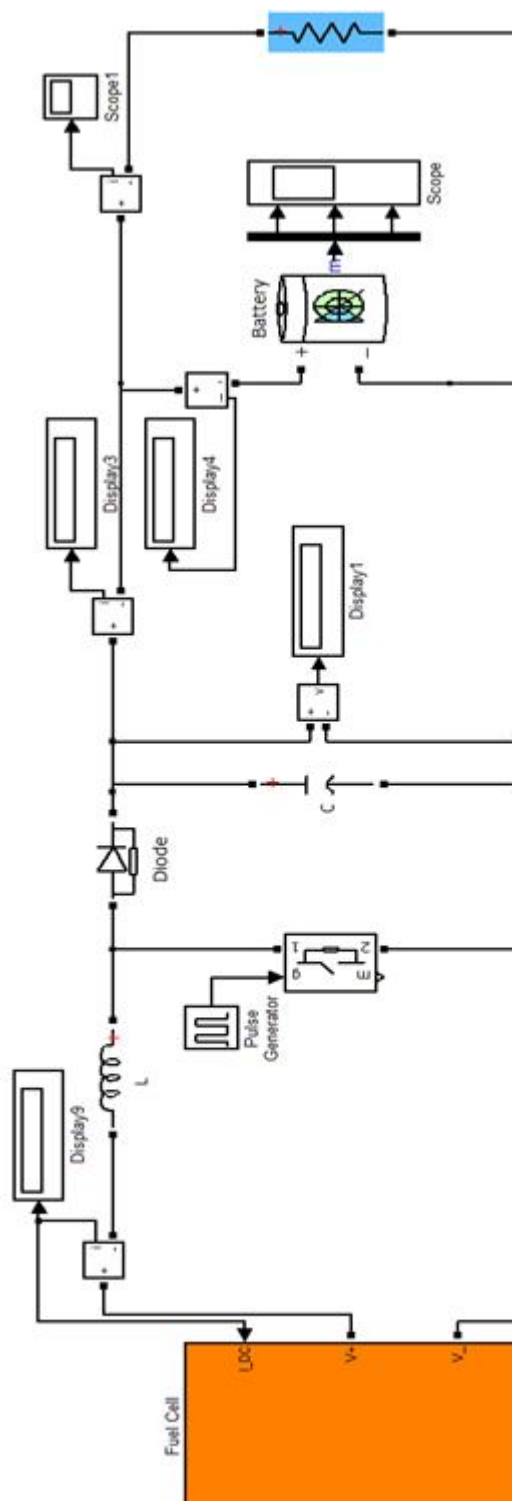


شکل ۵-۴- زیر بلوک P_{H_2O}



شکل ۵-۵- زیر بلوک P_{O_2}

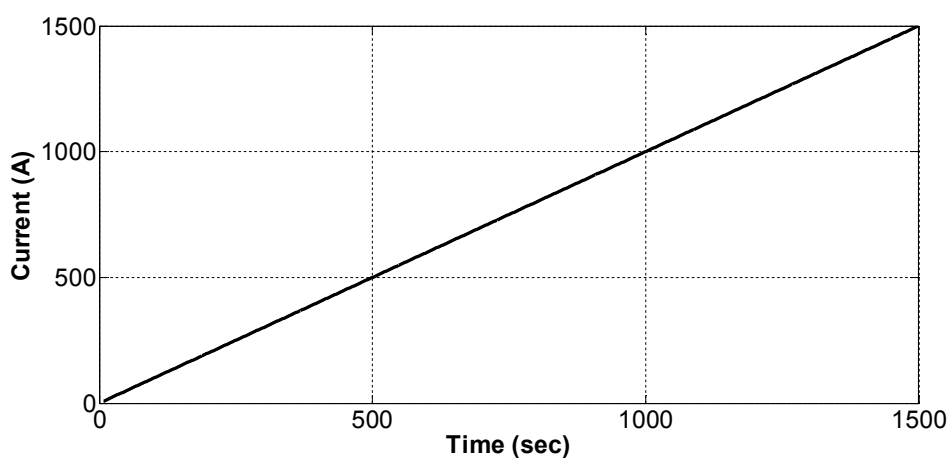
سیستم کلی مورد بررسی در محیط سیمولینک به صورت شکل ۵-۶ می باشد.



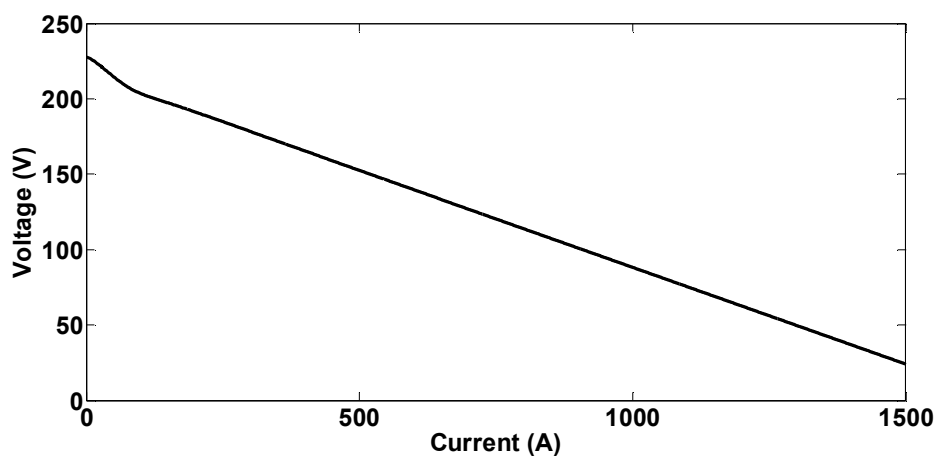
شکل ۵-۶- سیستم ترکیبی پیل سوختی - باتری شبیه سازی شده در محیط سیمولینک

۵-۳- مشخصه‌ی پیل سوختی

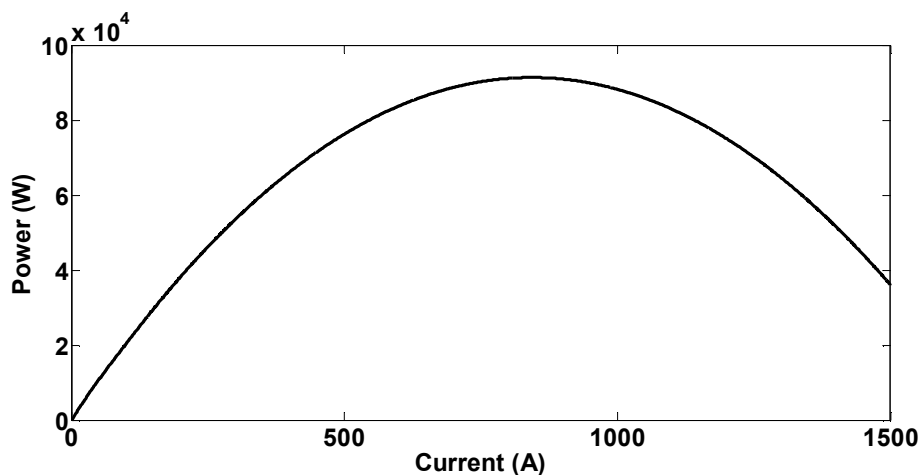
برای مشاهده‌ی تمام نقاط عملکرد پیل سوختی، فرض می‌کنیم که جریانی مانند شکل ۵-۷ به پیل سوختی اعمال شود. در این صورت شکل موج‌های ولتاژ، توان و بازده برحسب جریان به صورت شکل‌های ۵-۸، ۵-۹ و ۵-۱۰ می‌باشد.



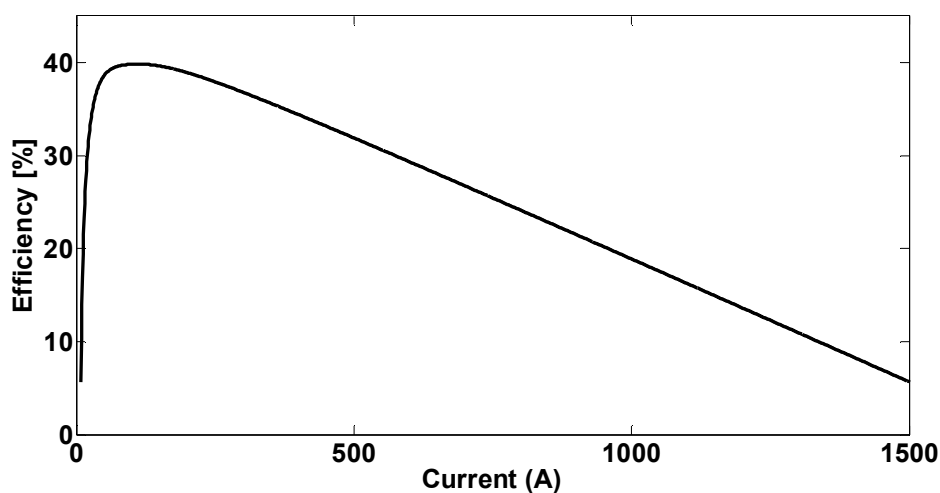
شکل ۵-۷- منحنی جریان - زمان



شکل ۵-۸- منحنی ولتاژ - جریان



شکل ۵-۹- منحنی توان - جریان



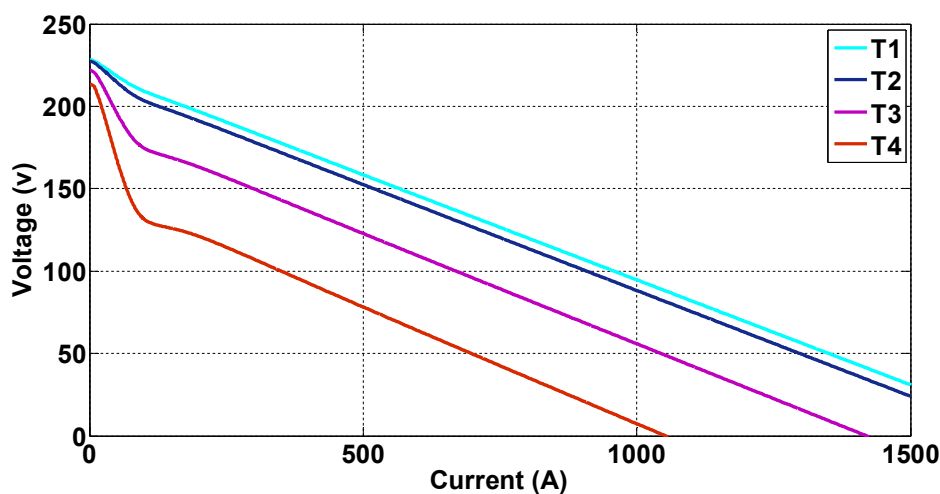
شکل ۵-۱۰- منحنی بازده - جریان

هنگامی که فاکتورهایی چون دما، نسبت فلوی هیدروژن به فلوی اکسیژن ثابت باشند. با افزایش جریان پیل سوختی، توان پیل افزایش می‌یابد و به مقدار ماکزیممی می‌رسد. افزایش بیشتر جریان و نزدیک شدن به مقدار جریان حدی، بر اثر افزایش فراوان افت‌ها، باعث کاهش ولتاژ و در نتیجه باعث کاهش توان پیل سوختی می‌گردد. همچنین افزایش بیشتر جریان پیل سوختی باعث کاهش بازده پیل سوختی می‌گردد؛ که به دلیل افزایش میزان سوخت ورودی به پیل می‌باشد. در منحنی بازده - جریان در پیل سوختی نقطه‌ی کاری وجود دارد که در آن نقطه پیل سوختی دارای بیشترین بازده می‌باشد. لذا می‌توان طرح‌هایی برای کنترل پیل سوختی و قرار گرفتن در نقطه‌ی

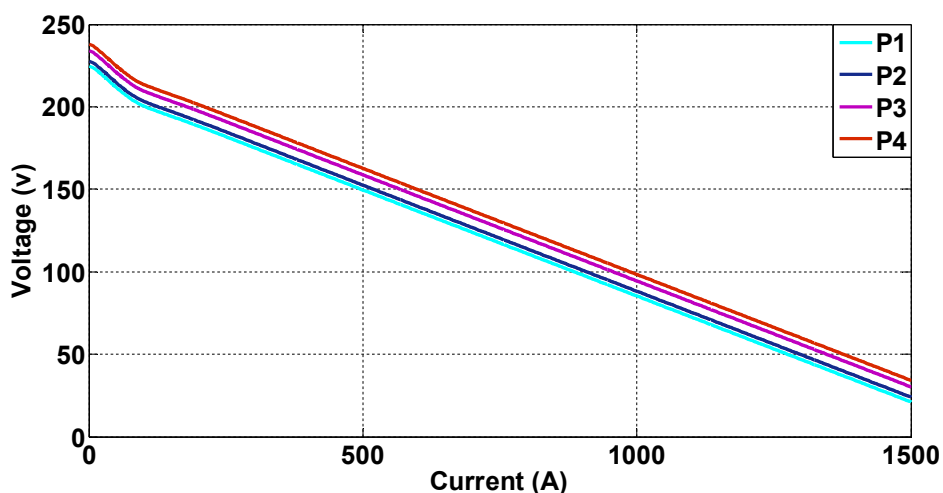
حداکثر بازده ارائه داد. با توجه به منحنی بازده پیل سوختی، حداکثر بازده در پیل سوختی مورد نظر حدود ۴۱ درصد می‌باشد.

۵-۳-۱- تأثیر دما و فشار هیدروژن بر منحنی ولتاژ- جریان پیل سوختی

با توجه به روابط بیان شده در فصل‌های قبل، با کاهش دما ولتاژ افت می‌کند و با کاهش فشار هیدروژن نیز ولتاژ افت می‌کند. منحنی ولتاژ - جریان در شکل ۵-۱۱ به ازای دماهای $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ رسم شده است. وقتی دما از T_4 به T_1 افزایش می‌یابد ولتاژ نیز افزایش یافته است. منحنی ولتاژ - جریان در شکل ۵-۱۲ به ازای فشارهای $P_1 < P_2 < P_3 < P_4$ رسم شده است. وقتی فشار از P_1 به P_4 افزایش یافته است ولتاژ نیز افزایش یافته است. با توجه به منحنی‌ها مشاهده می‌شود تأثیر دما بیشتر از تأثیر فشار می‌باشد.



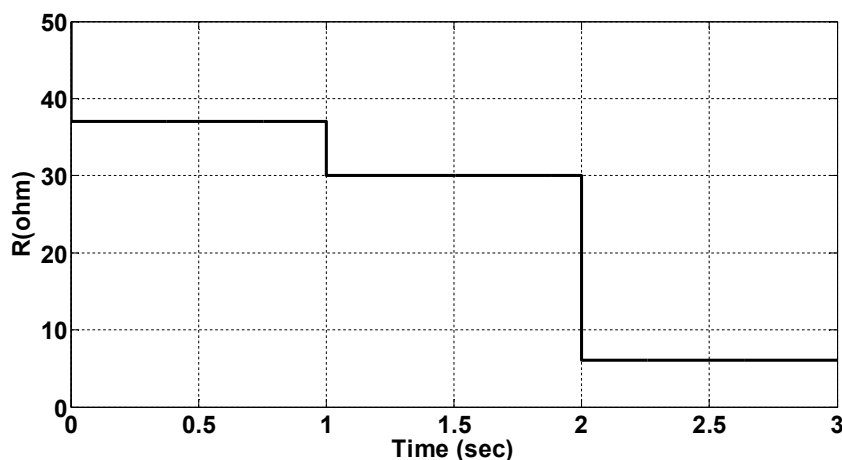
شکل ۵-۱۱- منحنی ولتاژ - جریان در دماهای مختلف



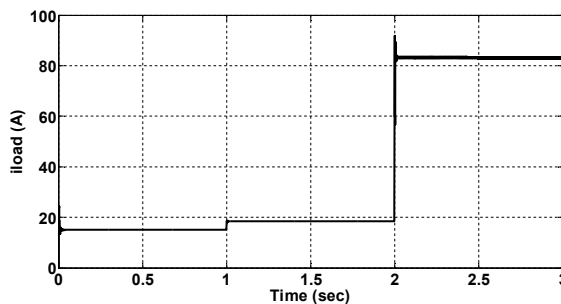
شکل ۵-۱۲- منحنی ولتاژ - جریان در فشارهای مختلف هیدروژن

۵-۴- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی در سیستم تولید توان، شامل: پیل سوختی، مبدل افزایشنده و بار

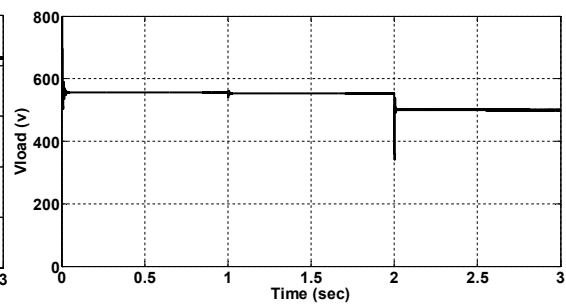
سیستم را با توجه به مقادیر پارامترهای گفته شده و بدون اعمال کنترل کننده پیشنهادی، شبیه سازی نموده و نتایج زیر از شبیه سازی حاصل شده است. یک پروفایل بار مشخص (شکل ۵-۱۳) برای سیستم در نظر گرفته شده است. منحنی ولتاژ، جریان و توان بار در شکل ۵-۱۴ آورده شده است. متناسب با تغییرات بار این سه پارامتر نیز تغییر کرده اند.



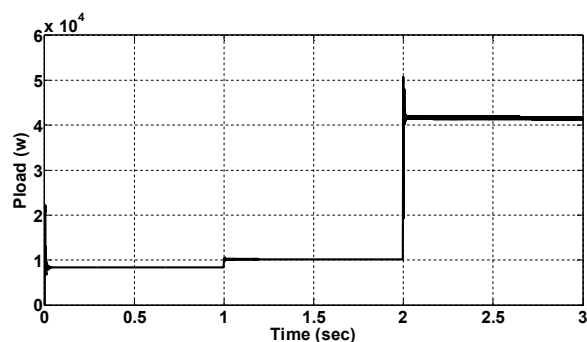
شکل ۵-۱۳- پروفایل بار



(ب)



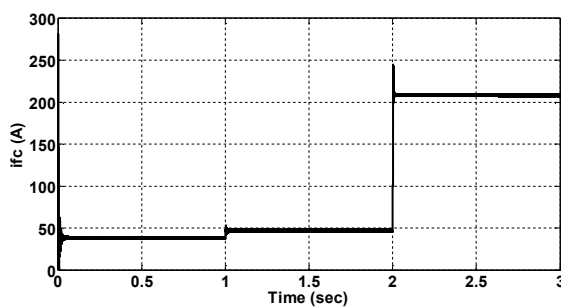
(الف)



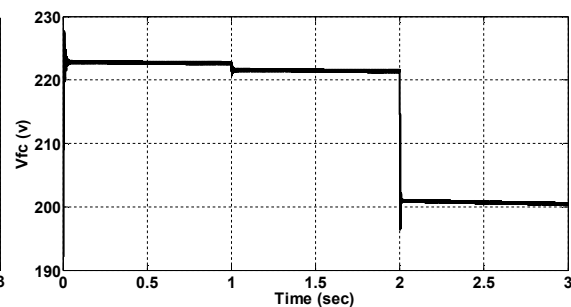
(ج)

شکل ۵-۱۴- (الف) ولتاژ بار، (ب) جریان بار و (ج) توان بار

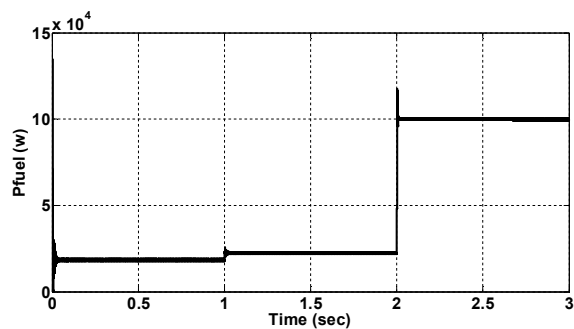
منحنی‌های ولتاژ، جریان، توان خروجی پیل سوختی، توان سوخت ورودی پیل و بازده پیل سوختی به ازای پروفایل بار مشخص اعمال شده به سیستم در شکل ۵-۱۵ آورده شده است. منحنی بازده به ازای مقادیر مختلف بار مقدار متفاوتی دارد. که این مقادیر به ترتیب ۳۶، ۳۸ و ۴۰ درصد می‌باشد. در شکل ۵-۱۶ منحنی مربوط به فلوی هیدروژن، فشار جزئی هیدروژن، فشار جزئی آب و فشار جزئی اکسیژن آورده شده است.



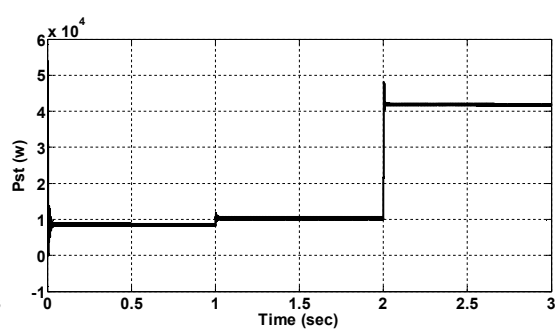
(ب)



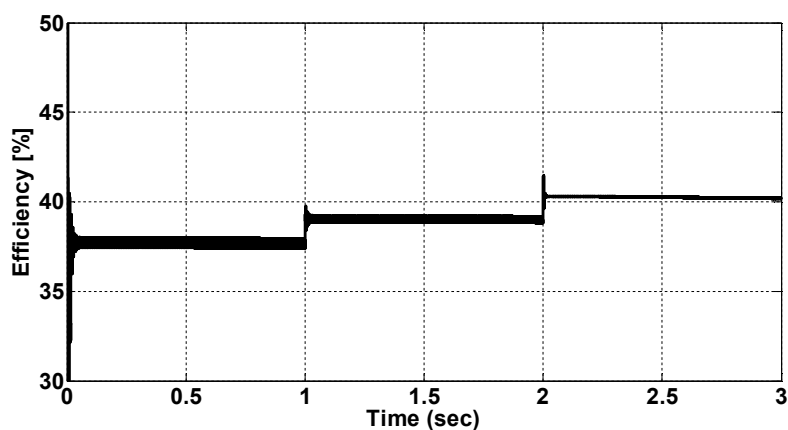
(الف)



(د)



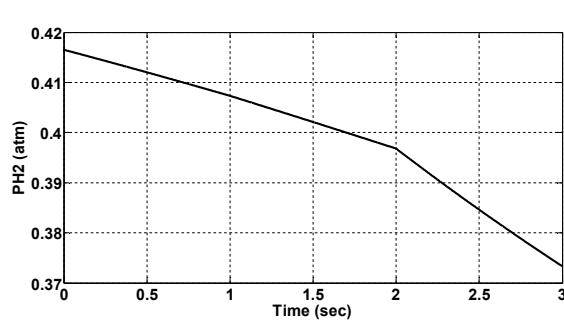
(ج)



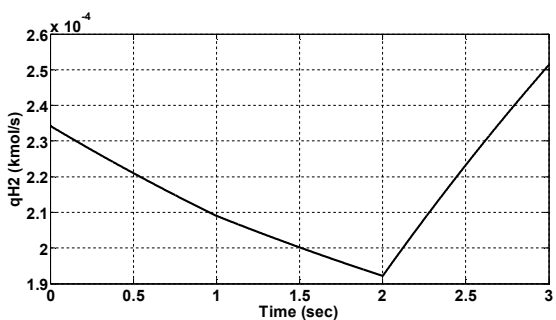
(و)

شکل ۵-۱۵- (الف) ولتاژ پیل سوختی، (ب) جریان پیل سوختی، (ج) توان خروجی پیل سوختی، (د) توان سوخت ورودی پیل و (و) بازده پیل سوختی

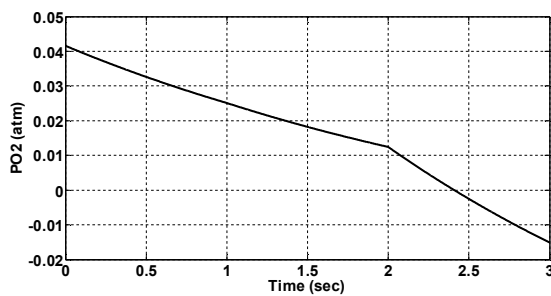
در همه منحنی‌ها در زمان‌هایی که تغییر بار داریم اثر گذرا دیده می‌شود. که این اثر به علت تغییر غلظت مواد واکنش‌دهنده در کاتد و آنود، تحت تأثیر تغییر آنی جریان کشیده شده از سیستم ایجاد می‌شود.



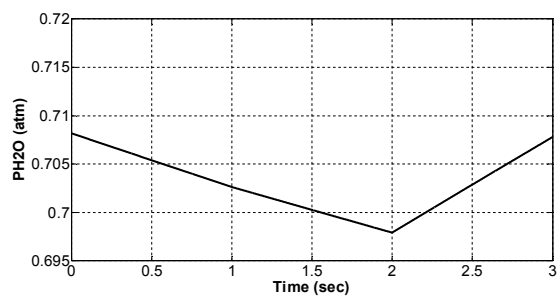
(ب)



(الف)

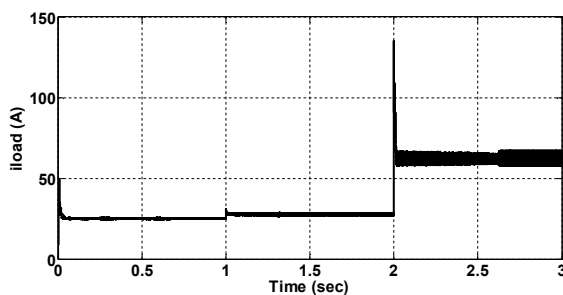


(د)

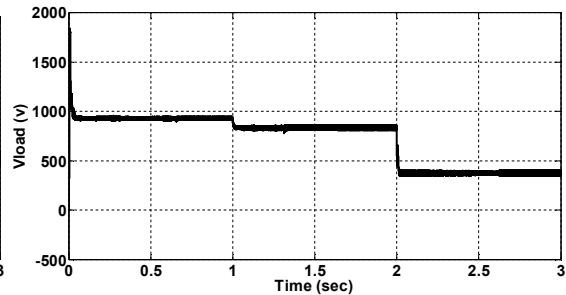


(ج)

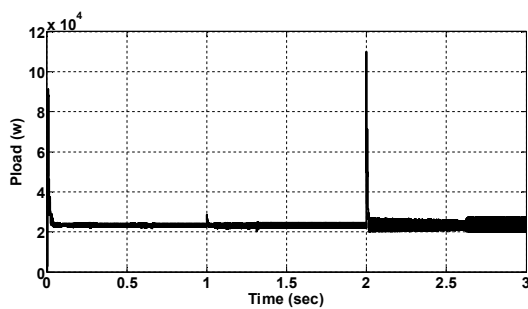
شکل ۵-۱۶- (الف) فلوی هیدروژن، (ب) فشار جزئی هیدروژن، (ج) فشار جزئی آب و (د) فشار جزئی اکسیژن
با اعمال کنترل کننده پیشنهادی به سیستم، منحنی‌های مربوط به بار و پیل سوختی به صورت شکل ۵-۱۷ و ۵-۱۸ تغییر می‌کند.



(ب)

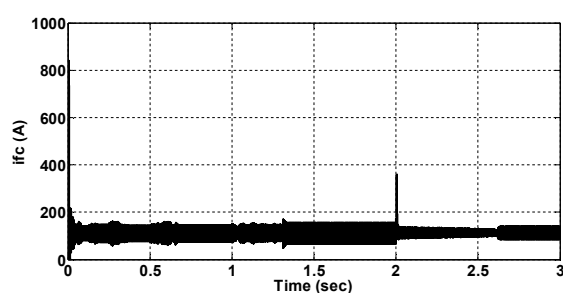


(الف)

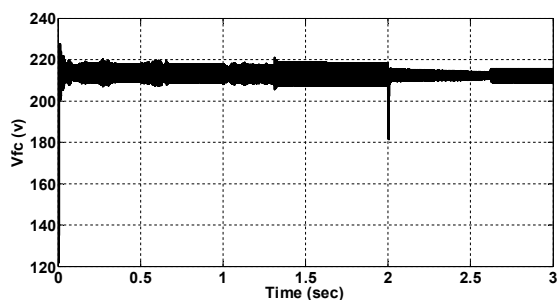


(ج)

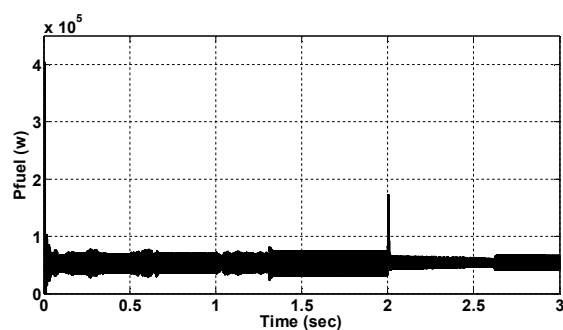
شکل ۵-۱۷- (الف) ولتاژ بار، (ب) جریان بار و (ج) توان بار



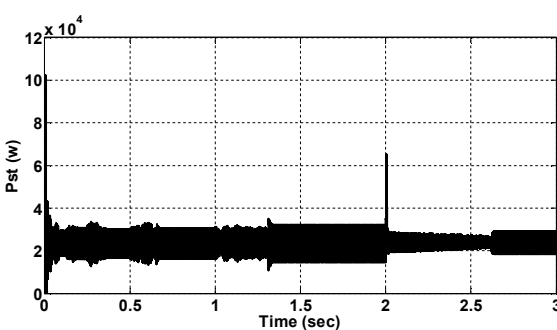
(ب)



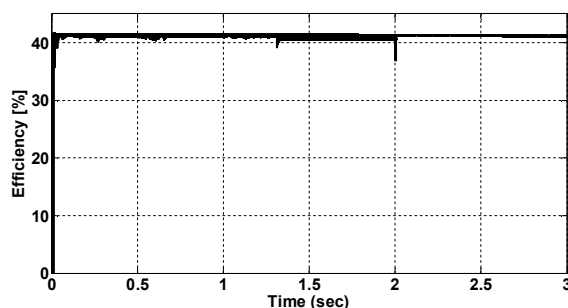
(الف)



(د)



(ج)



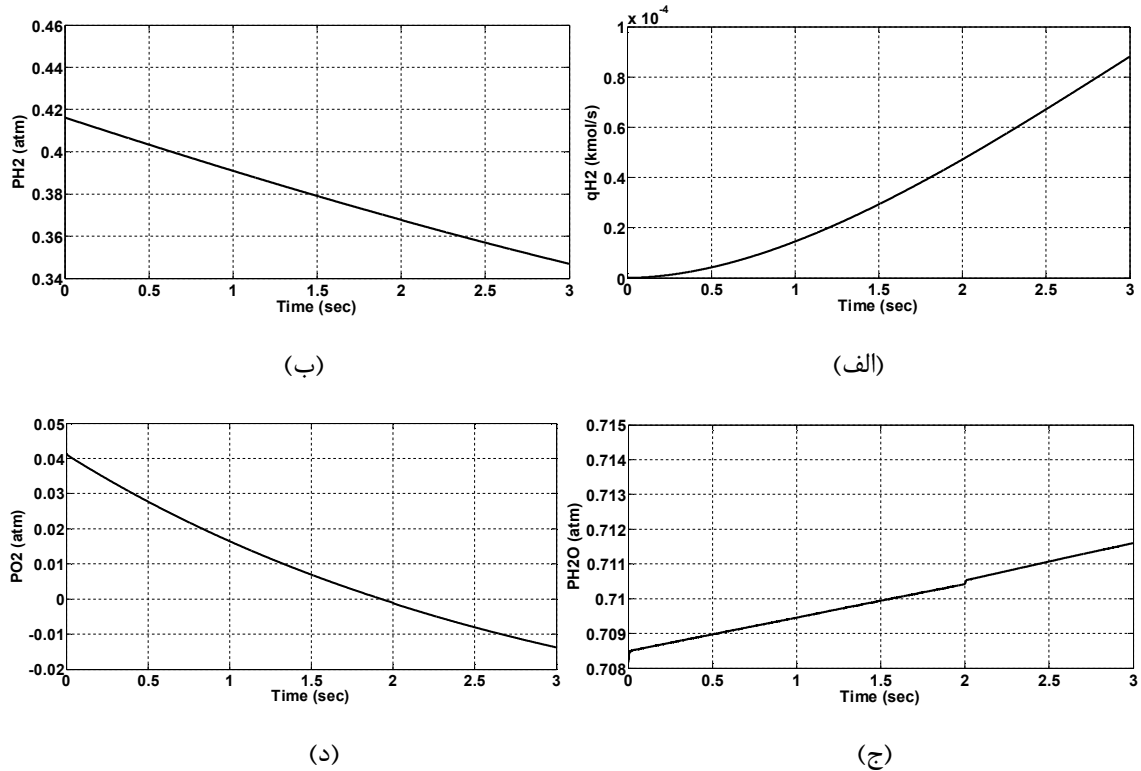
(و)

شکل ۵-۱۸- (الف) ولتاژ پیل سوختی، (ب) جریان پیل سوختی، (ج) توان خروجی پیل سوختی، (د) توان سوخت

ورودی پیل و (و) بازده پیل سوختی

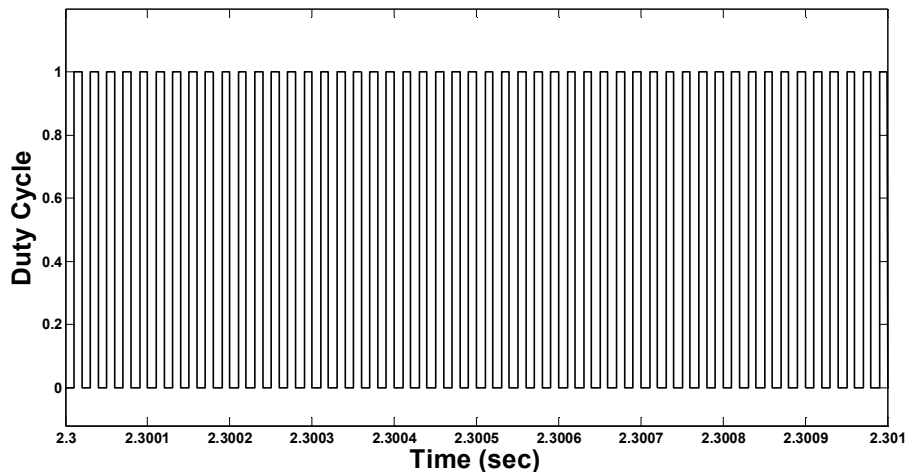
همانطور که در منحنی جریان پیل سوختی دیده می‌شود جریان پیل سوختی با اعمال کنترل‌کننده پیشنهادی در جریان بهینه ثابت شده است. که نمودار بازده نیز مطلب فوق را تأیید می‌کند. و بازده پیل سوختی در ۴۱ درصد، به ازای بارهای مختلف ثابت گشته است. پس این کنترل‌کننده توانسته است حداکثر بازده پیل سوختی را ردیابی نماید. با اعمال این کنترل‌کننده همواره توان ثابتی برای بار فراهم شده است. منحنی‌های مربوط به فلوی هیدروژن، فشار جزئی

هیدروژن، فشار جزئی آب و فشار جزئی اکسیژن با اعمال کنترل‌کننده به صورت شکل ۵-۱۹ تغییر می‌یابند.



شکل ۵-۱۹ - (الف) فلوی هیدروژن، (ب) فشار جزئی هیدروژن، (ج) فشار جزئی آب و (د) فشار جزئی اکسیژن

با مقایسه منحنی مربوط به فلوی هیدروژن در دو حالت، فلوی هیدروژن با اعمال کنترل‌کننده کاهش یافته است. به بیان ساده‌تر مصرف سوخت کاهش یافته است. در ادامه وضعیت سوئیچ مبدل در حالت MEPT در شکل ۵-۲۰ آورده شده است.



شکل ۵-۲۰- وضعیت سوئیچ مبدل در حالت MEPT

۵-۵- ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی در سیستم تولید توان، شامل: پیل

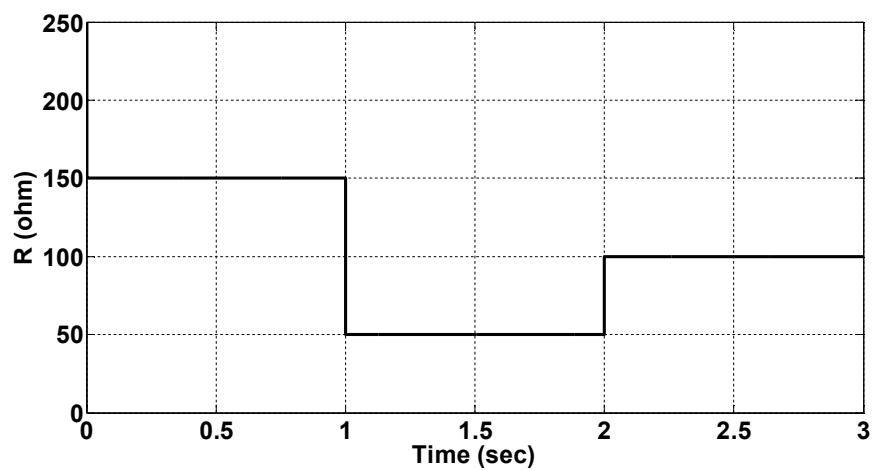
سوختی، مبدل افزایشنده، باتری و بار

همانطور که در قسمت‌های قبل گفته شد با توجه به اینکه پیل سوختی چگالی انرژی بالا و باتری چگالی توان بالا دارد، پیل سوختی را به همراه یک باتری برای داشتن یک چگالی توان بالا و چگالی انرژی بالا به صورت ترکیبی استفاده می‌شود. به بیان ساده‌تر باتری‌ها در سیستم ترکیبی برای دو منظور به کار می‌روند:

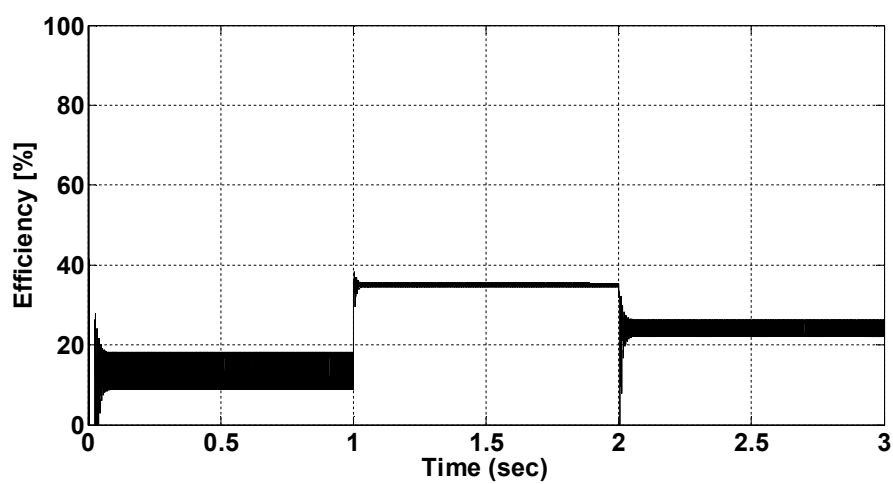
۱- ذخیره انرژی اضافی تولید شده توسط پیل سوختی

۲- تأمین توان اضافی بار

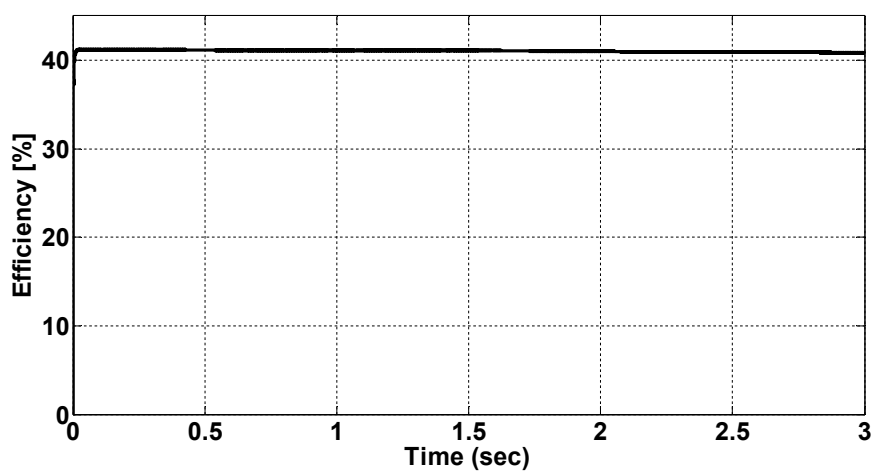
در این بخش پروفایل بار اعمال شده به سیستم به صورت شکل ۵-۲۱ می‌باشد. در ابتدا سیستم بدون باتری در نظر گرفته شده است. با اعمال بار مورد نظر به سیستم، بازده پیل سوختی به صورت شکل ۵-۲۲ می‌باشد. در ادامه باتری مورد نظر (۵۰ آمپر ساعت) به سیستم اضافه می‌شود و نمودار بازده پیل سوختی به صورت شکل ۵-۲۳ تغییر می‌نماید. از نمودار بازده نتیجه می‌شود که باتری موجب بهبود بازده پیل سوختی و قرار گرفتن پیل سوختی در حداکثر بازده شده است.



شکل ۵-۲۱- پروفایل بار

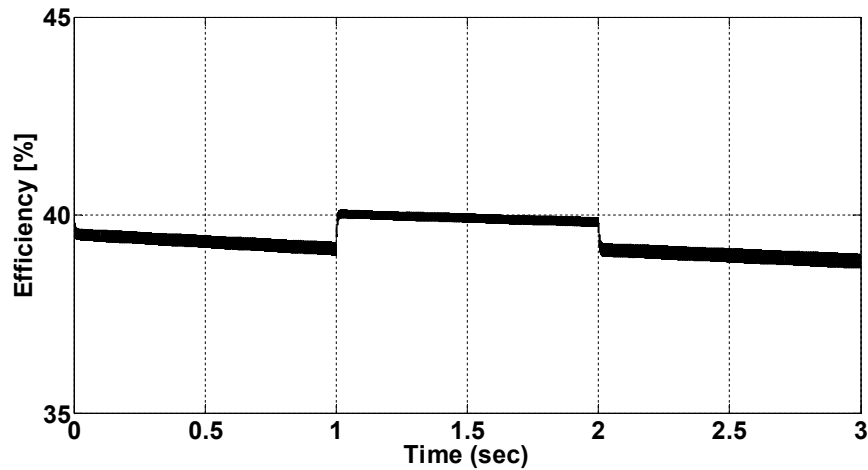


شکل ۵-۲۲- بازده پیل سوختی در سیستم بدون باتری



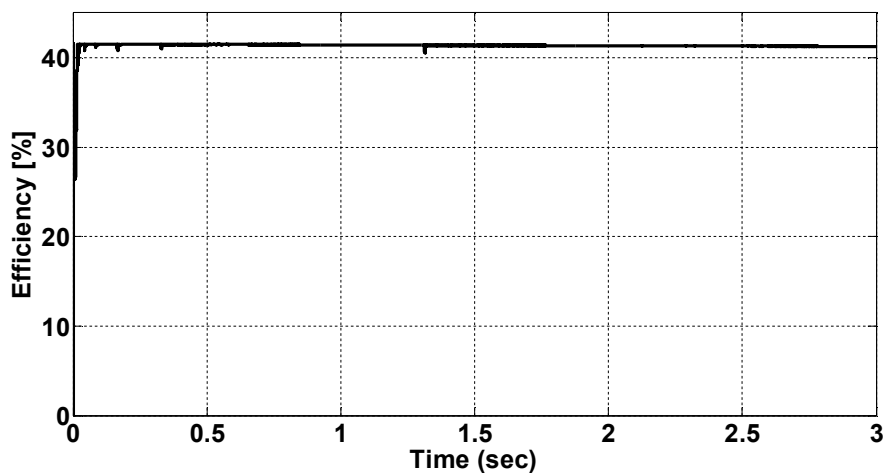
شکل ۵-۲۳- بازده پیل سوختی در سیستم با باتری

چنانچه ظرفیت نامی باتری را به $6/5$ آمپر ساعت کاهش دهیم. نمودار بازده پیل سوختی به صورت شکل ۲۴-۵ تغییر می‌یابد.



شکل ۲۴-۵- بازده پیل سوختی

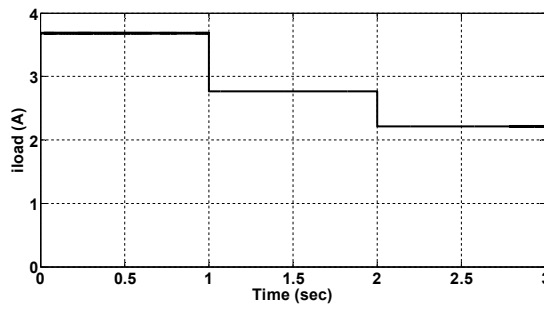
بازده پیل سوختی در این مورد کمتر از مقدار حداکثر می‌باشد. پس برای ردیابی حداکثر بازده، کنترل‌کننده پیشنهادی به سیستم اعمال شده است. شکل ۲۵-۵ نمودار بازده پیل سوختی در سیستم ترکیبی پیل سوختی - باتری را با اعمال کنترل‌کننده پیشنهادی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود کنترل‌کننده پیشنهادی به خوبی توانسته است حداکثر بازده را ردیابی نماید.



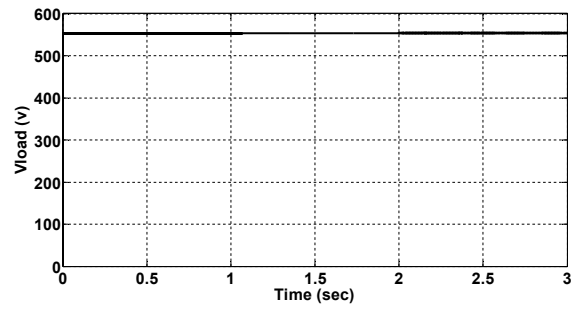
شکل ۲۵-۵- بازده پیل سوختی

جریان بار، ولتاژ بار و توان بار بدون اعمال کنترل کننده در شکل ۵-۲۶ آورده شده است.

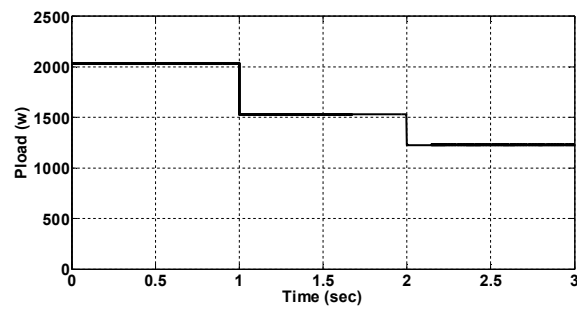
باتری، ولتاژ باتری، جریان باتری و توان باتری بدون اعمال کنترل کننده در شکل ۵-۲۷ آورده شده است.



(ب)

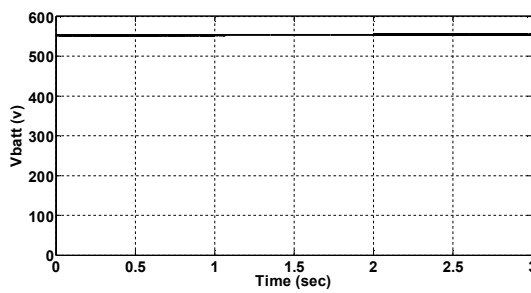


(الف)

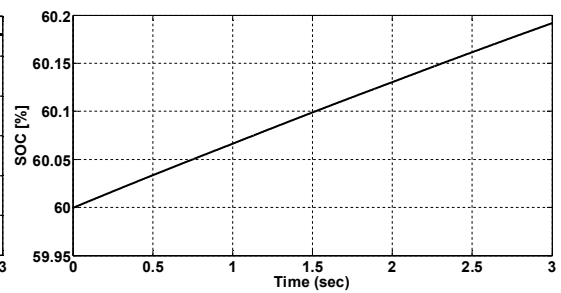


(ج)

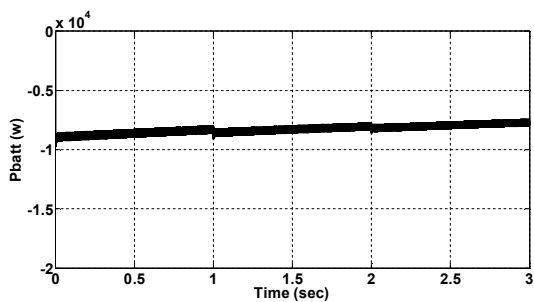
شکل ۵-۲۶- (الف) ولتاژ بار، (ب) جریان بار و (ج) توان بار



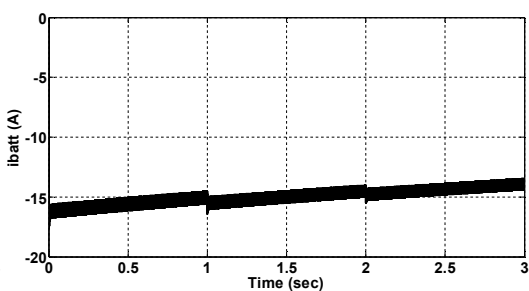
(ب)



(الف)

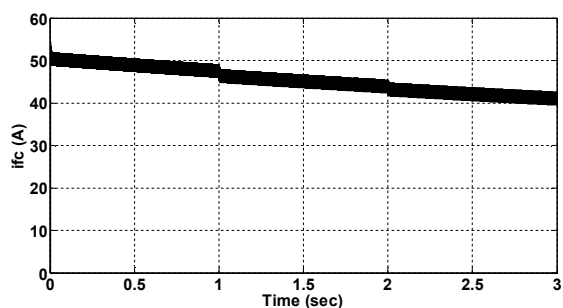


(د)

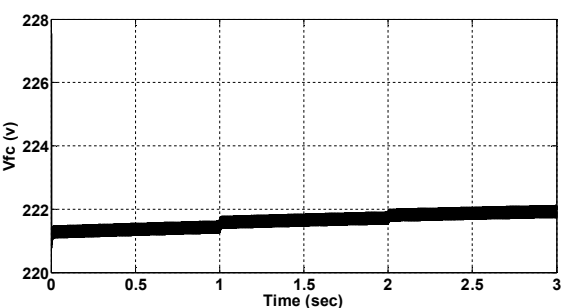


(ج)

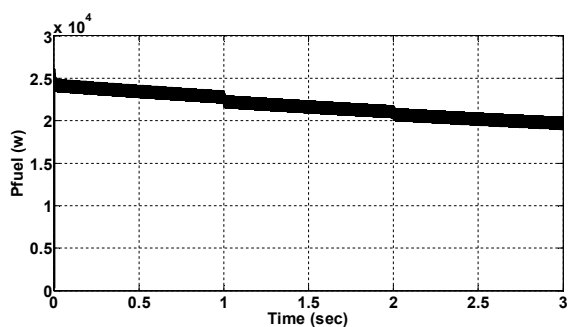
شکل ۵-۲۷- (الف) SOC، (ب) ولتاژ باتری، (ج) جریان باتری و (د) توان باتری



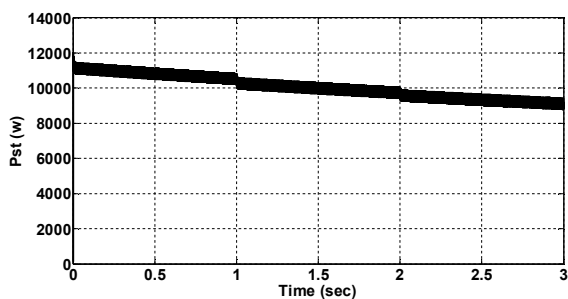
(ب)



(الف)

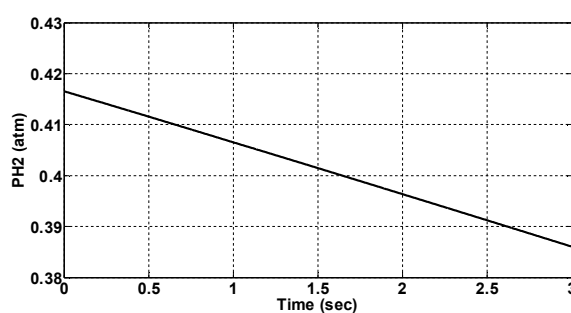


(د)

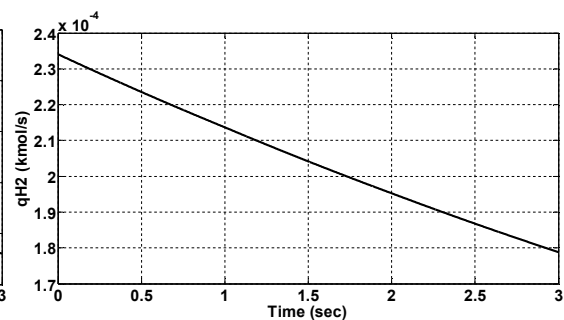


(ج)

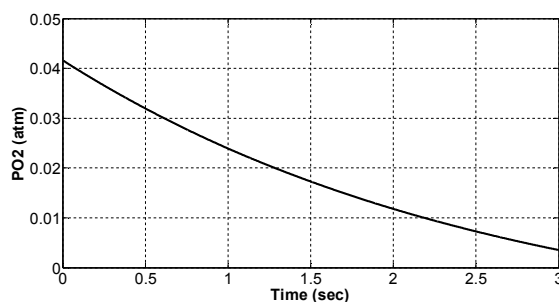
شکل ۵-۲۸- (الف) ولتاژ پیل سوختی، (ب) جریان پیل سوختی، (ج) توان خروجی پیل سوختی و (د) توان سوخت ورودی پیل سوختی



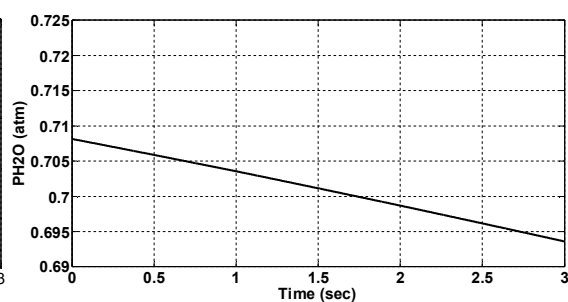
(ب)



(الف)



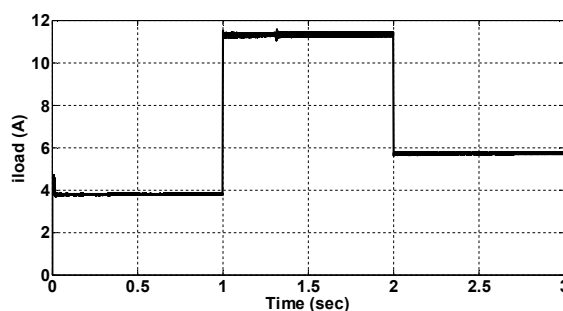
(د)



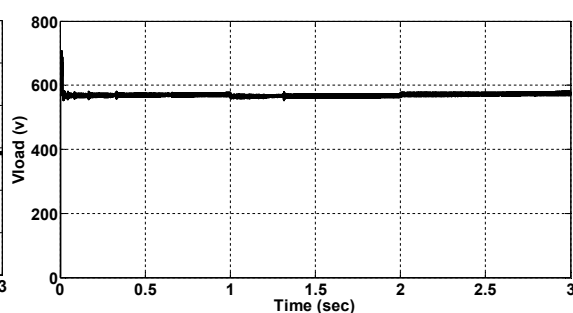
(ج)

شکل ۵-۲۹- (الف) فلوی هیدروژن، (ب) فشار جزئی هیدروژن، (ج) فشار جزئی آب و (د) فشار جزئی اکسیژن

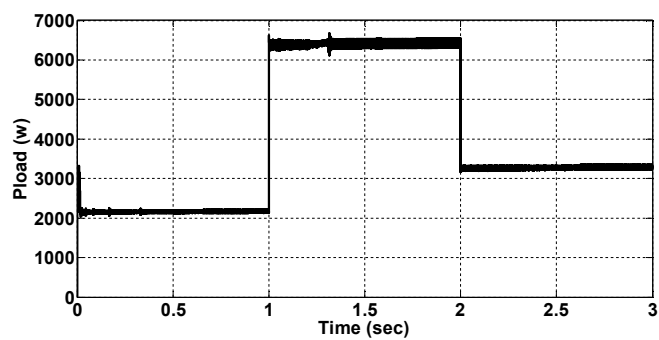
در شکل ۵-۲۸ و ۵-۲۹ پارامترهای پیل سوختی را قبل از اعمال کنترل کننده پیشنهادی به سیستم آورده شده است. در ادامه در شکل های ۵-۳۰، ۵-۳۱، ۵-۳۲ و ۵-۳۳ پارامترهای بار، باتری، و پیل سوختی بعد از اعمال کنترل کننده پیشنهادی آورده شده است. با مقایسه منحنی جریان در می یابیم که جریان پیل سوختی بعد از اعمال کنترل کننده در مقدار بهینه قرار گرفته است. از طرفی توان خروجی پیل سوختی نیز بعد از اعمال کنترل کننده در مقدار بهینه قرار گرفته است. و مازاد یا کمبود توان بار توسط باتری جبران می گردد. با مقایسه منحنی فلوی هیدروژن در دو حالت مشاهده می شود که مقدار هیدروژن مصرفی با اعمال کنترل کننده کاهش یافته است.



(ب)

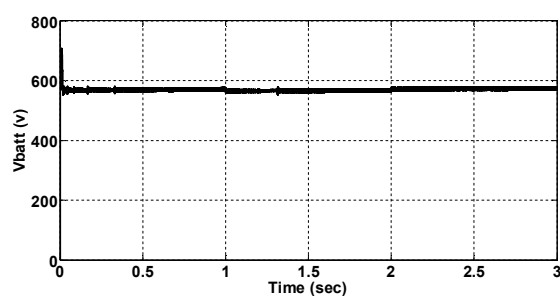


(الف)

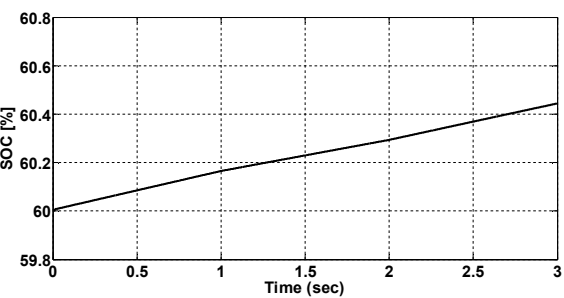


(ج)

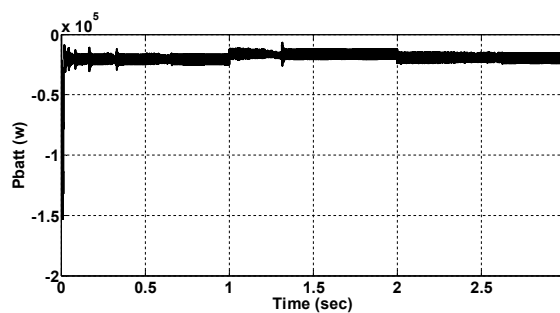
شکل ۵-۳۰- (الف) ولتاژ بار، (ب) جریان بار و (ج) توان بار



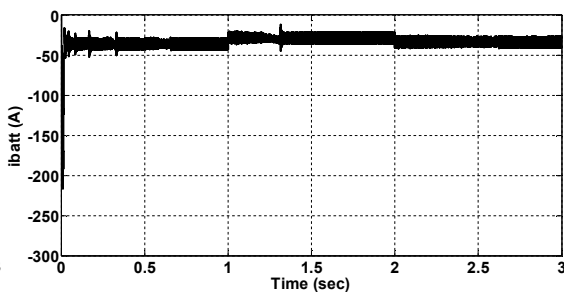
(ب)



(الف)

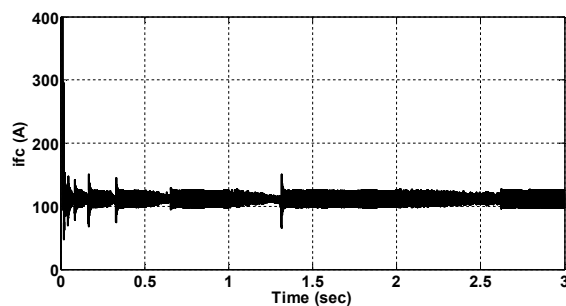


(د)

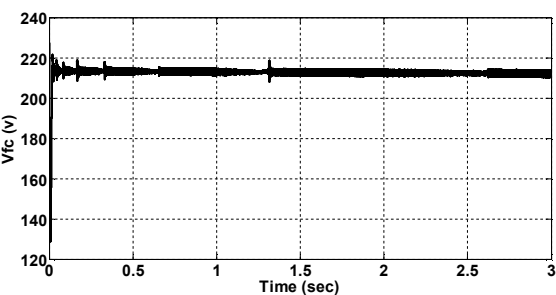


(ج)

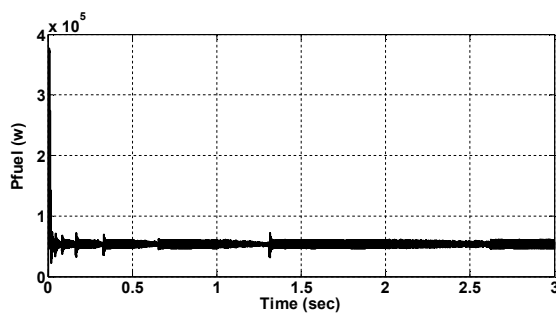
شکل ۵-۳۱- (الف) SOC، (ب) ولتاژ باتری، (ج) جریان باتری و (د) توان باتری



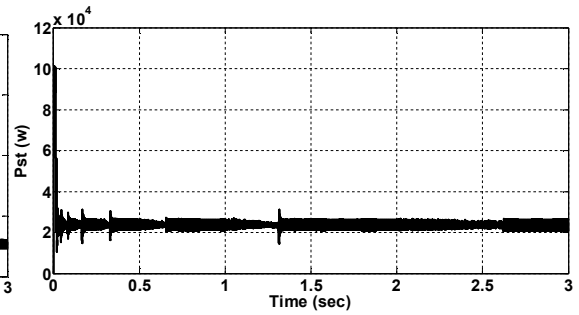
(ب)



(الف)

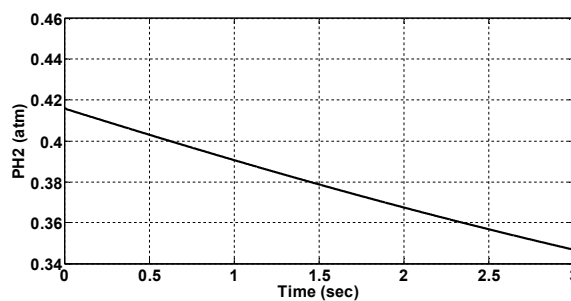


(د)

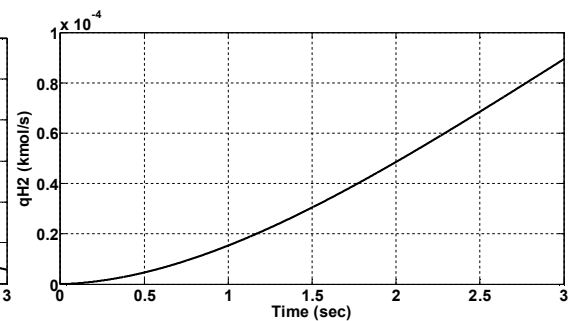


(ج)

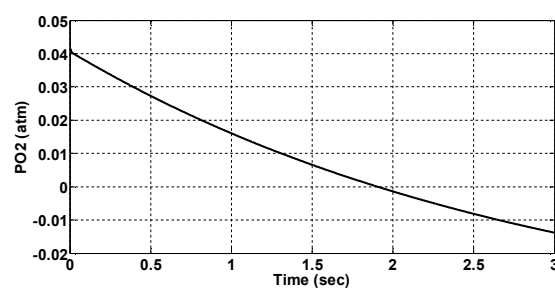
شکل ۵-۳۲- (الف) ولتاژ پیل سوختی، (ب) جریان پیل سوختی، (ج) توان خروجی پیل سوختی و (د) توان سوخت ورودی پیل سوختی



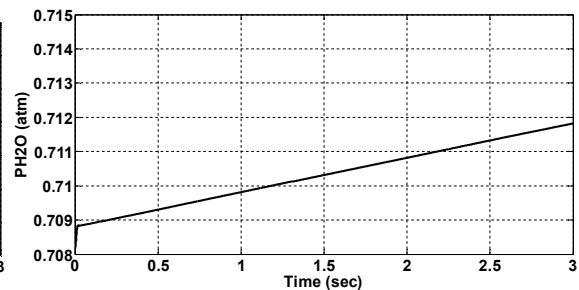
(ب)



(الف)

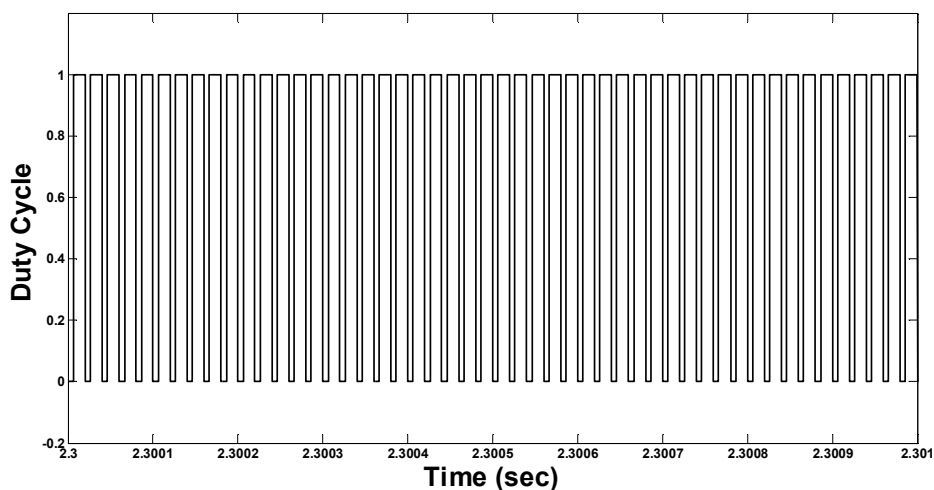


(د)



(ج)

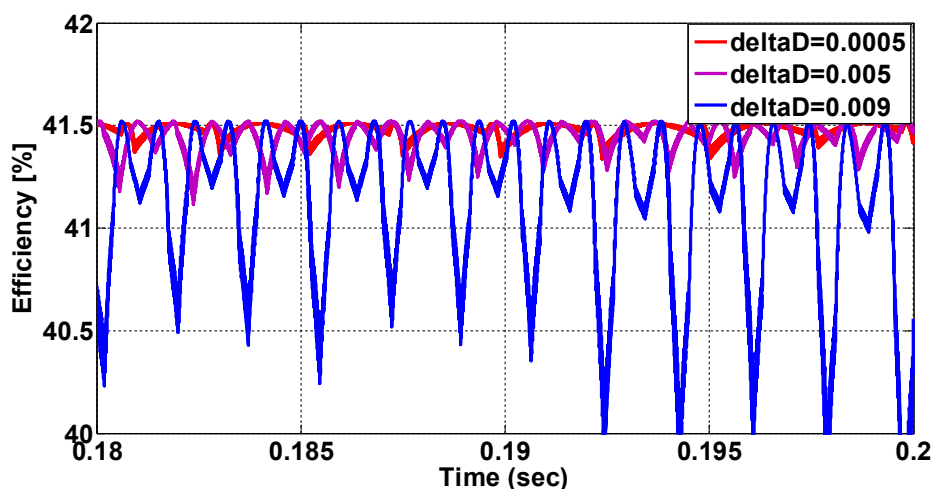
شکل ۵-۳۳- (الف) فلوی هیدروژن، (ب) فشار جزئی هیدروژن، (ج) فشار جزئی آب و (د) فشار جزئی اکسیژن
وضعیت سوئیچ مبدل با اعمال کنترل کننده در سیستم ترکیبی پیل سوختی- باتری به صورت شکل ۵-۳۴ می باشد.



شکل ۵-۳۴- وضعیت سوئیچ مبدل در حالت MEPT

۵-۵-۱- تأثیر مقدار اغتشاش الگوریتم اغتشاش و مشاهده بر همگرایی

مقدار اغتشاش الگوریتم اغتشاش و مشاهده بر سرعت همگرایی نقطه‌ی کار حداکثر بازده تأثیر می‌گذارد. برای دنبال کردن سریع نقطه‌ی کار حداکثر بازده، اغتشاش باید بزرگ باشد و این انتخاب باعث نوسان بیشتر در بازده پیل سوختی می‌گردد. اگر بخواهیم این نوسانات را کاهش دهیم، اغتشاشات باید کوچک باشند ولی زمان دنبال کردن بیشتر می‌شود. در شکل ۵-۳۵ این تأثیر به وضوح نشان داده شده است.

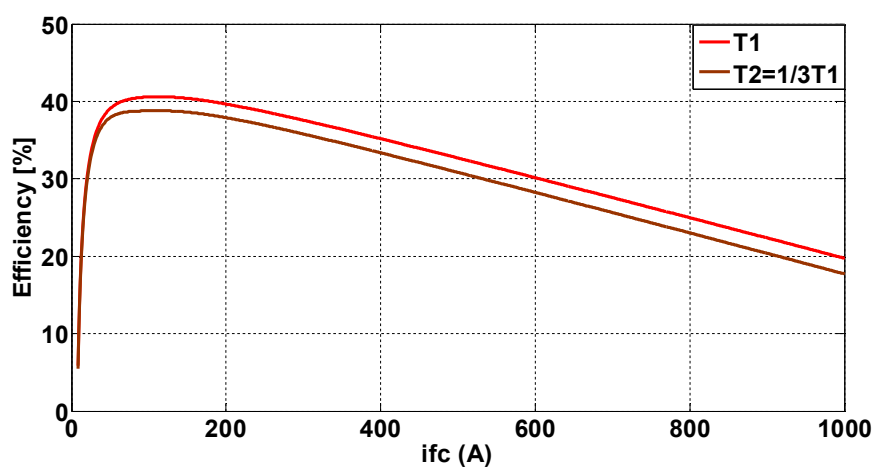


شکل ۵-۳۵- تأثیر مقدار اغتشاش بر همگرایی

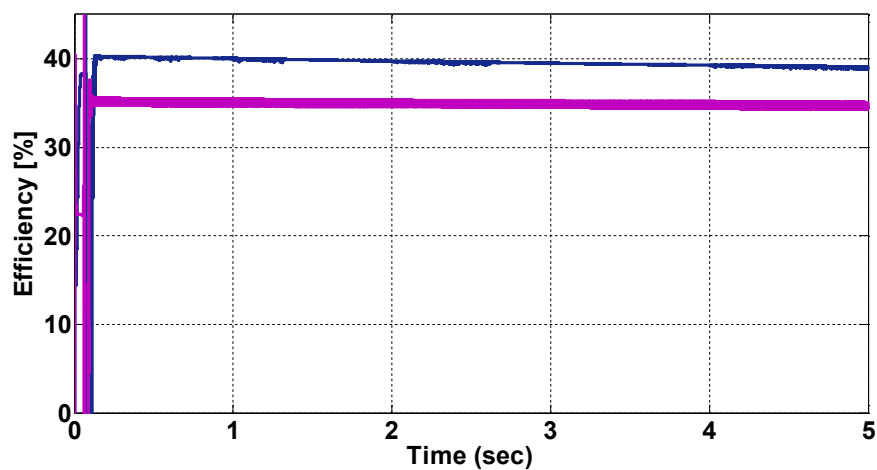
۵-۵-۲- تأثیر دما و فشار هیدروژن بر بازده پیل سوختی و بررسی عملکرد کنترل‌کننده

پیشنهادی در حالت جدید

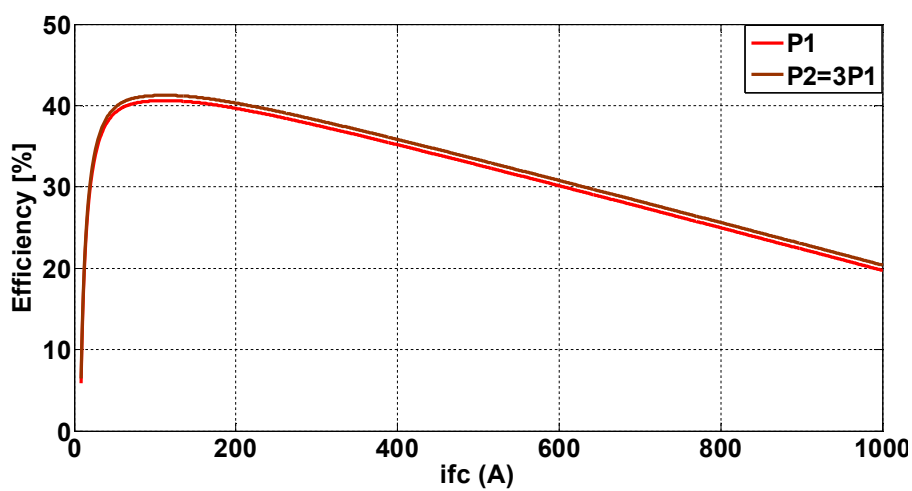
با توجه به روابط بیان شده در فصل‌های قبل نتیجه گرفته می‌شود بازده پیل سوختی با دما و فشار هیدروژن رابطه دارد. همانطور که در شکل ۵-۳۶ مشاهده می‌گردد با کاهش دما از T_1 به T_2 بازده پیل سوختی کاهش یافته است. و نقطه‌ی حداکثر بازده به نقطه‌ی جدیدی تغییر یافته است. در نمودار مربوط به شکل ۵-۳۷ ابتدا بازده پیل سوختی را به ازای یک بار مشخص (۵۰ اهم) و در دمای T_2 در نظر گرفته شده است (منحنی بنفش رنگ). سپس با اعمال کنترل‌کننده پیشنهادی در دمای T_2 به سیستم مشاهده شده است پیل سوختی در نقطه‌ی حداکثر بازده جدید، که حدود ۳۹ درصد می‌باشد قرار گرفته است (منحنی آبی رنگ). در شکل ۵-۳۸ تأثیر افزایش فشار بر بازده پیل سوختی نشان داده شده است. با افزایش فشار هیدروژن بازده پیل سوختی افزایش یافته است. در این مورد نیز مانند حالت قبل نقطه‌ی حداکثر بازده به نقطه‌ی جدیدی تغییر یافته است. در نمودار مربوط به شکل ۵-۳۹ مجدداً بازده پیل سوختی را به ازای یک بار مشخص (۵۰ اهم) و در فشار P_2 در نظر گرفته شده است (منحنی بنفش رنگ). سپس با اعمال کنترل‌کننده پیشنهادی در فشار P_2 به سیستم مشاهده شده است پیل سوختی در نقطه‌ی حداکثر بازده جدید، که حدود ۴۲ درصد می‌باشد قرار گرفته است (منحنی آبی رنگ).



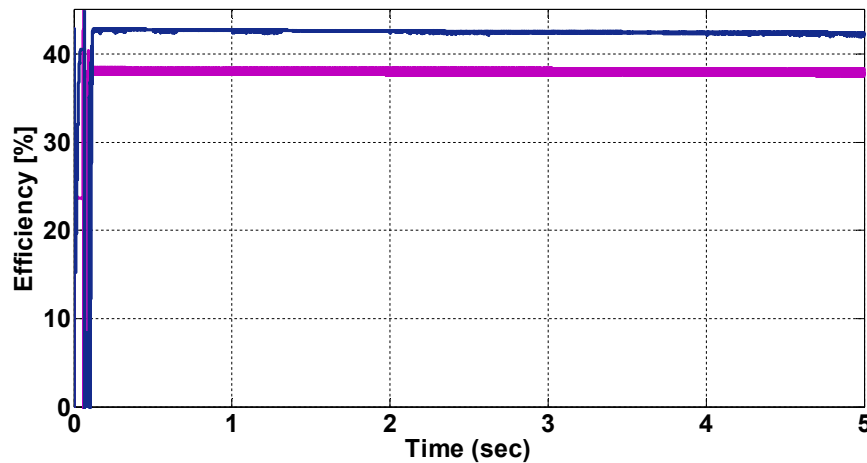
شکل ۵-۳۶- منحنی بازده - جریان پیل سوختی در دو دمای مختلف T_1, T_2



شکل ۵-۳۷- منحنی بازده - زمان در یک بار مشخص با اعمال کنترل کننده MEPT و بدون اعمال کنترل کننده (در دمای T_2)



شکل ۵-۳۸- منحنی بازده - جریان پیل سوختی در دو فشار هیدروژن مختلف P_1, P_2



شکل ۵-۳۹- منحنی بازده - زمان در یک بار مشخص با اعمال کنترل کننده MEPT و بدون اعمال کنترل کننده

(در فشار P_2)

پس کنترل کننده پیشنهادی این قابلیت را دارد که با تغییر شرایط نقطه‌ی حداکثر بازده جدید را ردیابی کند.

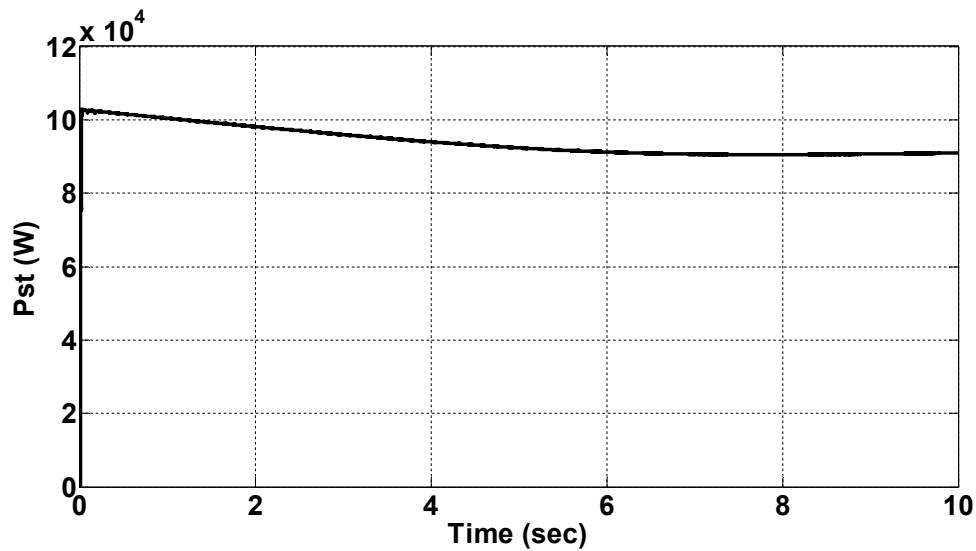
۵-۶- ردیابی حداکثر توان پیل سوختی در سیستم تولید توان، شامل: پیل

سوختی، مبدل افزایشنده، باتری و بار

در این بخش الگوریتم اغتشاش و مشاهده برای ردیابی حداکثر توان پیل سوختی در سیستم تولید توان ترکیبی پیل سوختی- باتری استفاده شده است. در این قسمت الگوریتم اغتشاش و مشاهده سیکل کاری مبدل افزایشنده را تنظیم می‌کند؛ تا جریان پیل سوختی یا همان جریان ورودی مبدل همواره در مقدار بهینه قرار گیرد. در این قسمت مقدار بهینه جریان، مقداری است که به ازای آن پیل سوختی در حداکثر توان قرار می‌گیرد. ابتدا تغییرات توان را بررسی نموده و بعد با توجه به تغییرات جریان دستورالعمل کنترلی برای افزایش یا کاهش جریان صادر می‌گردد. و این روند تا ردیابی حداکثر توان ادامه دارد.

بار مشخص ۵۰ اهمی در این قسمت در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۵-۴۰ دیده می‌شود پیل سوختی در حداکثر توان، که حدود ۹۰ کیلووات می‌باشد قرار گرفته است. اگرچه توان

نامی پیل سوختی ۵۰ کیلووات می‌باشد ولی همانطور که در شکل ۵-۹ دیده می‌شود حداکثر توانی که می‌توان از پیل جذب کرد، بدون در نظر گرفتن ملاحظات چگونگی کاهش عمر پیل، خارج شدن از ناحیه خطی، ظرفیت باتری و... حدود ۹۰ کیلووات می‌باشد. پس اگرچه پیل سوختی در حداکثر توان قرار می‌گیرد ولی لزوماً این توان مطلوب نمی‌باشد.



شکل ۵-۴۰- توان خروجی پیل سوختی

۶- فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه یک سیستم ترکیبی پیل سوختی- باتری پیشنهاد شده است. برای کنترل سیستم از مبدل افزایشده استفاده شده است. روش کنترلی پیشنهادی برای ردیابی حداکثر بازده پیل سوختی شامل دو بخش کنترل میزان سوخت ورودی (هیدروژن) و کنترل جریان خروجی پیل سوختی می باشد. کنترل جریان پیل سوختی با استفاده از الگوریتم اغتشاش و مشاهده انجام می شود. با استفاده از این الگوریتم سیکل کاری مبدل افزایشده به گونه ای تنظیم می شود که جریان مبدل که همان جریان خروجی پیل سوختی می باشد همواره در مقدار بهینه تنظیم شود. که در آن مقدار جریان بهینه، پیل سوختی دارای حداکثر بازده می باشد.

ابتدا این ساختار کنترلی به سیستم شامل پیل سوختی- مبدل افزایشده- بار اعمال شده است. در قسمت بعدی باتری را به سیستم اضافه نموده ایم در هر دو حالت پیل سوختی با اعمال کنترل کننده پیشنهادی به ازای بارهای مختلف با تقریب خوبی در حداکثر بازده قرار گرفته است. در ادامه عملکرد کنترل کننده در شرایط مختلف بررسی شده است.

در پایان نیز از الگوریتم اغتشاش و مشاهده برای ردیابی حداکثر توان پیل سوختی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی در این حالت نیز نشان می دهد که پیل سوختی در حداکثر توان قرار می گیرد. شبیه سازی و کنترل ساختار پیشنهادی در محیط نرم افزار Matlab/Simulink انجام شده است.

۶-۲- پیشنهادات

- ۱- در این پایان نامه SOC باتری با توجه به زمان شبیه سازی مدنظر همواره در بازه مطلوب $(0.55 \leq SOC \leq 0.85)$ قرار دارد. اما برای زمان های طولانی نیاز به کنترل SOC می باشد. پس برای کنترل SOC نیاز به یک مبدل دوطرفه می باشد.
- ۲- برای کارهای تکمیلی می توان سیستم را به گونه ای طراحی کرد که وقتی SOC باتری در محدوده مطلوب قرار دارد پیل سوختی همواره در حداکثر بازده قرار گیرد. و از طرفی وقتی که SOC باتری خارج از کران بالا و پایین قرار می گیرد باتری از مدار خارج شود و پیل سوختی حداکثر توان را به بار تحویل دهد.
- ۳- با توجه به مدل ساده در نظر گرفته شده برای پیل سوختی در این پایان نامه، برای رسیدن به نتایج مطلوب تر می بایست مدل کامل تری را برای پیل استفاده نمود.

[1] Larminie J, (2003), "*Fuel Cell Systems Explained*", Second Edition, John Wiley & Sons.

[۲] رخت اعلا م، (۱۳۸۵)، پایان نامه ارشد، "بهبود راندمان پیل های سوختی متانولی (DMFC) با استفاده از مدل سازی و شبیه سازی الکتریکی"، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی نوشیروانی، دانشگاه مازندران.

[3] <http://www.fcc.gov.ir/default.aspx>.

[4] Goldstein L, Hedman B, Knowles D, Freedman S.I., Woods R, Schweizer T, (2003), "*Gas-Fired Distributed Energy Resource Technology Characterizations*".

[5] Services EG&G and Parsons, (2000), "*Fuel Cell Handbook*", U.S. Department of Energy, Fifth Edition.

[۶] باجگیران محمدی ی و شیخانی ح، (۱۳۸۶)، "پیل های سوختی و کاربرد آنها"، کنفرانس سراسری بهینه سازی مصرف انرژی، مشهد.

[7] Lu J, Zahedi A., (2010), "Maximum Efficiency Point Tracking Control for Fuel Cell Power Systems", International Conference on Power System Technology, P1.

[8] Lu J. and Zahedi A., (2012), "Air supply control for maximum efficiency point tracking in fuel cell systems", *Journal of Renewable Sustainable Energy* 4, 033106.

[9] Jang M.H., Lee J.M., Kim J.H., Park J.H., and Cho B.H., (2011) "Maximum Efficiency Point Tracking Algorithm Using Oxygen Access Ratio Control for Fuel Cell Systems", *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 2, pp194.

[10] Zhu G.R., Loo K.H., Lai Y.M. and Tse C.K., (2012) "Quasi-Maximum Efficiency Point Tracking for Direct Methanol Fuel Cell in DMFC/Supercapacitor Hybrid Energy System", *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, pp1.

[11] Uzunoglu M, Alam M.S., (2006) "Dynamic Modeling, Design, and Simulation of a Combined PEM Fuel Cell and Ultracapacitor System for Stand-Alone Residential

Applications”, *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 21, NO. 3, pp767.

[12] Canis B, (2013), “*Battery Manufacturing for Hybrid and Electric Vehicles: Policy Issues*”.

[۱۳] سلیمانی ح، (۱۳۹۱)، پایان نامه ارشد، "طراحی و شبیه‌سازی مبدل چند ورودی/ چند خروجی"، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[14] Schaltz E, (2010), PhD. Thesis, “Design of a Fuel cell Hybrid Electric Vehicle Drive System”, Department of Energy Technology, Aalborg University.

[15] Lowe M, Tokuoka S, Trigg T and Gereffi G, (2010), “*Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles*”.

[16] Mukai D, Kobayashi K, Kurahashi T, Matsueda N, Hashizaki K and Kogure M, (2012), “Development of Large High-performance Lithium-ion Batteries for Power Storage and Industrial Use”, *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, Vol. 49, No. 1, pp6.

[17] Hajizadeh A, Aliakbar Golkar M and Feliachi A., (2010), “Voltage Control and Active Power Management of Hybrid Fuel-Cell/Energy Storage Power Conversion System Under Unbalanced Voltage Sag Conditions”, *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 25, NO. 4, pp1195.

[18] Yu T.C, Lin Y.C, (2010), “A Study on Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems”.

[19] Bennett T, Zilouchian A and Messenger A, “Perturb and Observe versus Incremental Conductance MPPT Algorithms”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*.

[20] Lin W.M, Hong C.M and Chen C.H, (2011), “Neural-Network-Based MPPT Control of a Stand-Alone Hybrid Power Generation System”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 26, NO. 12.

[21] Jiang J.A, Huang T.L, Hsiao Y.T, Chen C.H, (2005), “Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems”, *Tamkang Journal of Science and Engineering*, Vol. 8, No 2, pp. 147.

Abstract

In recent years, using of renewable energy resources have been increased. Among them, fuel cells are very promising. Due to the increasing usage of these sources in the automotive and army industries and the importance of their efficiency in the industry, this thesis has proposed a control method to tracking the maximum efficiency of fuel cell power sources.

In this thesis, a hybrid fuel cell - battery power generation system is considered. The boost converter is used to control of fuel cell power system. The proposed control method for tracking maximum efficiency consists of two parts. First part is control of input fuel (hydrogen) and second part is control of fuel cell current by using of perturbation and observation algorithm. This control method has been applied for different conditions on hybrid power system. Simulation results are presented for uncontrolled and controlled conditions and they are shown increasing of fuel cell efficiency in hybrid power generation system. Simulation and control strategy are implemented in MATLAB/SIMULINK software.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Dissertation Submitted in Partial Fulfillment for the Degree of
Master of Science in Power Electrical Engineering

Maximum Efficiency Tracking of Fuel Cells in Hybrid
Fuel Cell/ Energy Storage Power Generation Systems

Fahimeh Roholamini

Supervisor:

Dr.Amin Hajizadeh

Advisor:

Dr.Mehdi Rakhtala

January 2014