





دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)  
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد برق - قدرت

مدلسازی، شبیه سازی و ساخت سیمولاتور پیل سوختی

نگارش:

عباس مولوی داریانی

استاد راهنما:

دکتر حسن رستگار

شهریور ۱۳۸۶

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

## تشکر و قدردانی

قبل از هر چیز وظیفه خود می‌دانم از پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی و تحصیل، همواره مایه شادی و دلگرمی من بوده‌اند، صمیمانه تشکر کنم.

همچنین از استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر حسن رستگار که مرا در انجام این تحقیق و در طول مدت تحصیل همواره یاری نموده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

## چکیده

در سال‌های اخیر نگرانی‌های زیست محیطی و افزایش روز افزون قیمت منابع انرژی فسیلی محققین و دولت‌های مختلف را به یافتن منابع انرژی جایگزین ترغیب نموده است. پیل‌های سوختی به عنوان یکی از منابع تولید انرژی در قرن بیست و یکم معرفی شده و به علت مزایای زیاد از جمله آلودگی کم و بازدهی بالا سرمایه‌گذاری‌های زیادی را به سمت خود جلب نموده است. انتظار می‌رود در آینده نزدیک تبدیل به رقیبی قدرتمند برای نیروگاه‌های فعلی شوند. لذا حل مسائل مرتبط با آنها امری ضروری است. با توجه به اینکه تهیه یک پیل سوختی و انجام آزمایشات عملی بر روی آن به علت قیمت بالا و محدودیت تکنولوژی در حال حاضر امکان پذیر نمی‌باشد. لذا در این پروژه یک سیمولاتور پیل سوختی طراحی و ساخته شده است. بنابراین انجام مطالعات مختلف را بر روی پیل سوختی امکان‌پذیر می‌کند. در این پروژه پیل سوختی، عنصر ذخیره توان و مبدل رابط DC/DC آن در کامپیوتر شبیه‌سازی شده و ولتاژ الکتریکی خروجی مجموعه توسط یک رابط سخت افزاری در محیط بیرون فراهم می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که رابط سخت افزاری قادر به تعقیب ولتاژ مرجع نرم افزار با سرعت بالایی بوده و توسط این سیمولاتور می‌توان عملکرد پیل سوختی را در هنگام بهره‌برداری بصورت‌های مختلف مورد آزمایش قرار داد.

کلمات کلیدی: سیمولاتور، پیل سوختی، مبدل DC/DC، مدل‌سازی، Simulink/Matlab، رابط سخت افزاری، منبع تغذیه سوئیچینگ (Switch Mode Power Supply)

فهرست اشکال	۵
فهرست جداول	ک
فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- کاربرد پیل‌های سوختی در تولید انرژی برق	۲
۲-۱- طرح مسأله	۴
۳-۱- مروری بر کارهای انجام شده	۵
۱-۳-۱- در زمینه مدلسازی پیل سوختی	۵
۲-۳-۱- در زمینه مدلسازی مبدل DC/DC	۶
۳-۳-۱- در زمینه ساخت سیمولاتور	۷
۴-۱- ساختار پایان نامه	۷
فصل دوم: پیل سوختی و مدلسازی آن	۸
۱-۲- مقدمه	۹
۲-۲- تاریخچه پیل سوختی	۹
۳-۲- شناخت کلی پیل سوختی	۱۰
۴-۲- اتصال سری سلول‌ها به یکدیگر	۱۲
۵-۲- انواع پیل سوختی	۱۳
۱-۵-۲- پیل سوختی اکسید جامد	۱۴
۲-۵-۲- پیل سوختی کربنات مذاب	۱۴
۳-۵-۲- پیل سوختی اسید فسفریک	۱۶
۴-۵-۲- پیل سوختی قلبایی	۱۷
۵-۵-۲- پیل سوختی پلیمری	۱۸
۶-۲- مقایسه پیل‌های سوختی	۱۹
۷-۲- مزایا و معایب پیل سوختی	۲۱
۸-۲- اجزای پیل سوختی	۲۲
۹-۲- مدلسازی پیل سوختی	۲۳
۱-۹-۲- ولتاژ پیل سوختی	۲۴
۱-۱-۹-۲- ولتاژ مدار باز پیل سوختی	۲۵

۲۸.....	۲-۱-۹-۲- افت ولتاژ فعالسازی
۲۸.....	۲-۳-۱-۹-۲- افت ولتاژ اهمی
۲۹.....	۲-۴-۱-۹-۲- افت ولتاژ غلظت یا افت ولتاژ انتقال جرم
۳۰.....	۲-۵-۱-۹-۲- تلفات عبور سوخت
۳۰.....	۲-۲-۹-۲- لایه دوگانه بار
۳۲.....	۲-۳-۹-۲- محاسبه میزان مصرف اکسیژن و هیدروژن و آب تولیدی
۳۳.....	۲-۴-۹-۲- مدلسازی لوله‌های تغذیه کننده سوخت و هوا به پیل سوختی [۲۴]
۳۵.....	۲-۵-۹-۲- مدلسازی واحد پردازنده سوخت
۳۶.....	۲-۶-۹-۲- مدلسازی دما
۳۸.....	۲-۱۰-۱۰-۲- شبیه‌سازی
۴۷.....	۲-۱۱-۱۱-۲- جمع بندی و نتیجه‌گیری فصل
۴۸.....	فصل سوم: واحد مطلوب کننده توان و مدلسازی آن
۴۹.....	۳-۱-۱-۳- مقدمه
۵۰.....	۳-۲-۲- واحد مطلوب کننده توان
۵۱.....	۳-۳-۳- انتخاب نوع مبدل DC/DC
۵۳.....	۳-۴-۳- نحوه عملکرد مبدل تمام پل ورودی جریان
۵۶.....	۳-۵-۳- مقایسه مبدل تمام پل ورودی ولتاژ با تمام پل ورودی جریان
۵۶.....	۳-۶-۳- الگوریتم روش مدلسازی متوسط گیری شده در فضای حالت
۵۹.....	۳-۷-۳- مدل فضای حالت مبدل تمام پل ورودی جریان
۶۳.....	۳-۸-۳- طراحی مبدل تمام پل ورودی جریان برای اتصال به پیل سوختی
۶۵.....	۳-۹-۳- بدست آوردن توابع تبدیل مبدل DC/DC
۶۷.....	۳-۱۰-۳- ارزیابی مدلسازی انجام شده برای مبدل
۷۴.....	۳-۱۱-۳- طراحی کنترل کننده کلاسیک برای مبدل DC/DC
۷۷.....	۳-۱۲-۳- ارزیابی کنترل کننده طراحی شده برای مبدل
۷۹.....	۳-۱۳-۳- اینورتر یا مبدل DC/AC
۸۰.....	۳-۱۳-۳-۱- اصول کنترل اینورتر
۸۱.....	۳-۱۳-۳-۱-۱- روش کنترل PQ

۸۵	..... ۳-۱۳-۱-۲- روش کنترل PV
۸۵	..... ۳-۱۳-۱-۳- روش کنترل Vf
۸۶	..... ۳-۱۴- جمع بندی و نتیجه گیری فصل
۸۷	..... فصل چهارم: طراحی و ساخت رابط سخت افزاری سیمولاتور پیل سوختی
۸۸	..... ۴-۱- مقدمه
۸۹	..... ۴-۲- انتخاب منبع تغذیه سوئیچینگ و نحوه عملکرد آن
۹۲	..... ۴-۳- مدلسازی منبع تغذیه سوئیچینگ
۹۷	..... ۴-۴- طراحی و نحوه ساخت اجزا منبع تغذیه سوئیچینگ
۱۰۵	..... ۴-۵- ارزیابی مدلسازی انجام شده برای منبع تغذیه سوئیچینگ
۱۰۸	..... ۴-۵- روش های کنترل منابع تغذیه سوئیچینگ
۱۰۸	..... ۴-۵-۱- کنترل از راه ولتاژ
۱۰۹	..... ۴-۵-۲- کنترل از راه جریان
۱۱۲	..... ۴-۶- طراحی کنترل کننده برای منبع تغذیه کنترل شده از راه جریان
۱۱۸	..... ۴-۷- پیاده سازی کنترل کننده طراحی شده برای منبع تغذیه سوئیچینگ
۱۲۰	..... ۴-۸- جمع بندی و نتیجه گیری فصل
۱۲۱	..... فصل پنجم: نتایج شبیه سازی و نتایج عملی سیمولاتور پیل سوختی
۱۲۲	..... ۵-۱- مقدمه
۱۲۴	..... ۵-۲- مراحل اتصال پیل سوختی به مبدل DC/DC
۱۲۵	..... ۵-۳- نتایج شبیه سازی سیمولاتور پیل سوختی
۱۲۵	..... ۵-۳-۱- تغییرات کند بار
۱۳۳	..... ۵-۳-۱- تغییرات سریع بار
۱۳۸	..... ۵-۴- نتایج عملی منبع تغذیه سوئیچینگ ساخته شده
۱۴۳	..... ۵-۵- جمع بندی و نتیجه گیری فصل
۱۴۴	..... فصل ششم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات
۱۴۵	..... ۶-۱- نتیجه گیری
۱۴۶	..... ۶-۲- ارائه پیشنهادات
۱۴۷	..... منابع و مراجع



---

پیوست (۱): کاتالوگ اجزای رابط سخت افزاری سیمولاتور ..... ۱۵۳

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): سیمولاتور پیل سوختی ..... ۴
- شکل (۱-۲): آزمایش انجام شده توسط ویلیام گروو که در آن ابتدا با دادن انرژی الکتریکی آب را الکترولیز کرده و سپس با استفاده از واکنش تولید آب (واکنش معکوس)، انرژی الکتریکی تولید می‌کند. .... ۱۰
- شکل (۲-۲): نمای کلی یک پیل سوختی به همراه ورودی و خروجی‌ها ..... ۱۱
- شکل (۳-۲): اتصال سه سل به صورت سری با استفاده از صفحات دو قطبی ..... ۱۳
- شکل (۴-۲): اجزا پیل سوختی ..... ۲۳
- شکل (۵-۲): نحوه قرارگیری خازن اثر لایه دوگانه بار ..... ۳۱
- شکل (۶-۲): مدلسازی پیل سوختی الکترولیت پلیمری در Simulink ..... ۳۹
- شکل (۷-۲): بلوک مدلسازی دما (محتوای داخلی جعبه نرم افزاری مدل دما موجود در شکل (۶-۲)). ۳۹
- شکل (۸-۲): مدلسازی ولتاژ پیل سوختی (محتوای داخلی جعبه نرم افزاری مدل پشته یا Stack موجود در شکل (۶-۲)) ..... ۴۰
- شکل (۹-۲): مدلسازی لوله‌های تغذیه کننده سوخت و هوا به پیل سوختی و واحد پردازنده سوخت (محتوای داخلی جعبه نرم افزاری مدل لوله‌ها و پردازنده سوخت موجود در شکل (۶-۲)) ..... ۴۰
- شکل (۱۰-۲): مدلسازی اثر لایه دوگانه بار (محتوای داخلی جعبه نرم افزاری اثر لایه دوگانه بار موجود در شکل (۸-۲)) ..... ۴۱
- شکل (۱۱-۲): منحنی پلاریزاسیون و نمودار چگالی توان یک سلول پیل سوختی در دما و فشار  $T = 65^{\circ}C$  و  $P_{H_2} = 1 atm$   $P_{O_2} = 0.2095 atm$  ..... ۴۱
- شکل (۱۲-۲): ولتاژ و توان پیل سوختی در تغییرات سریع بار (هر ۰/۵ ثانیه) در آزمایش اول ..... ۴۳
- شکل (۱۳-۲): اثر خازن لایه دوگانه بار بر ولتاژ پیل سوختی بررسی شده در آزمایش اول ..... ۴۳
- شکل (۱۴-۲): ولتاژ پیل سوختی در تغییرات کند بار (هر ۲۰ ثانیه) در آزمایش دوم ..... ۴۴
- شکل (۱۵-۲): توان و دمای پیل سوختی در تغییرات کند بار (هر ۲۰ ثانیه) در آزمایش دوم ..... ۴۴
- شکل (۱۶-۲): توان و دمای پیل سوختی در پی افزایش پله‌ای بار در آزمایش سوم برای مطالعه دینامیک دما ..... ۴۵

- شکل (۲-۱۷): ولتاژ پیل سوختی از بی‌باری تا بار کامل و بالعکس در آزمایش چهارم؛ در دو حالت دما ثابت ( $T = 65^{\circ}C$ ) و دما متغیر با مقدار اولیه ( $T_{initial} = 27^{\circ}C$ )..... ۴۵
- شکل (۲-۱۸): دما و توان پیل سوختی سوختی آزمایش چهارم در حالت دما متغیر با مقدار اولیه ( $T_{initial} = 27^{\circ}C$ )..... ۴۶
- شکل (۲-۱۹): فشار جزئی اکسیژن و هیدروژن و مقدار دبی ورودی هیدروژن در پی افزایش پله‌ای بار (به ترتیب از پایین به بالا) در آزمایش چهارم در حالت دما متغیر..... ۴۶
- شکل (۳-۱): منحنی پلاریزاسیون و نمودار توان پیل سوختی برای ۵۰ سلول در دما و فشار  $T = 65^{\circ}C$  و  $P_{H_2} = 1 atm$   $P_{O_2} = 0.2095 atm$ ..... ۴۹
- شکل (۳-۲): طرح کلی پیل سوختی به همراه واحد مطلوب کننده توان (a) مبدل DC/DC، لینک DC و اینورتر (b AC/DC) اینورتر AC/DC، لینک AC و ترانسفورمر..... ۵۰
- شکل (۳-۳): مبدل تمام پل ورودی ولتاژ به همراه پیل سوختی..... ۵۲
- شکل (۳-۴): مبدل تمام پل ورودی جریان به همراه پیل سوختی..... ۵۳
- شکل (۳-۵): شکل موج‌های مبدل تمام پل ورودی جریان..... ۵۴
- شکل (۳-۶): وضعیت الف (حالت کاری اول و سوم)  $0 < t < (D - \frac{1}{2})T_s$  و  $\frac{1}{2}T_s < t < dT_s$ ..... ۶۰
- شکل (۳-۷): وضعیت ب (حالت کاری دوم و چهارم)  $(d - \frac{1}{2})T_s < t < \frac{1}{2}T_s$  و  $dT_s < t < T_s$ ..... ۶۱
- شکل (۳-۸): مدار معادل خازن الکترولیتی..... ۶۴
- شکل (۳-۹): مبدل تمام پل ورودی جریان شبیه‌سازی شده در نرم افزار Matlab..... ۶۹
- شکل (۳-۱۰): طرح کلی برای مدلسازی کلیه مبدل‌های DC DC..... ۶۹
- شکل (۳-۱۱): متوسط ولتاژ خروجی مبدل در طول مدت تغییر ورودی‌ها..... ۷۰
- شکل (۳-۱۲): متوسط ولتاژ خروجی مبدل در طول مدت تغییر اول..... ۷۱
- شکل (۳-۱۳): متوسط ولتاژ خروجی مبدل در طول مدت تغییر دوم..... ۷۱
- شکل (۳-۱۴): متوسط ولتاژ خروجی مبدل در طول مدت تغییر سوم..... ۷۱
- شکل (۳-۱۵): خطای ایجاد شده در متوسط ولتاژ خروجی بعد از اعمال تغییر در ورودی‌ها..... ۷۲
- شکل (۳-۱۶): متوسط جریان سلف در طول مدت تغییر ورودی‌ها..... ۷۲
- شکل (۳-۱۷): متوسط جریان سلف در طول مدت اعمال تغییر اول..... ۷۲
- شکل (۳-۱۸): متوسط جریان سلف در طول مدت اعمال تغییر دوم..... ۷۳

- شکل (۳-۱۹): متوسط جریان سلف در طول مدت اعمال تغییر سوم..... ۷۳
- شکل (۳-۲۰): خطای ایجاد شده در متوسط جریان سلف بعد از اعمال تغییر در ورودی‌ها..... ۷۳
- شکل (۳-۲۱): دیاگرام بود تابع تبدیل تغییرات ولتاژ خروجی به تغییرات دوره کاری حول نقطه کار نامی توان ۲۲۰۰ وات..... ۷۵
- شکل (۳-۲۲): دیاگرام بود تابع تبدیل  $G_c(s)$ ..... ۷۶
- شکل (۳-۲۳): دیاگرام بود تابع تبدیل  $G_p(s)G_c(s)$ ..... ۷۷
- شکل (۳-۲۴): مدل حلقه مبدل DC/DC به همراه کنترل کننده کلاسیک..... ۷۷
- شکل (۳-۲۵): ولتاژ خروجی مبدل هنگام اعمال اغتشاش اول..... ۷۸
- شکل (۳-۲۶): متوسط جریان سلف هنگام اعمال اغتشاش اول..... ۷۸
- شکل (۳-۲۷): ولتاژ خروجی مبدل هنگام اعمال اغتشاش دوم..... ۷۸
- شکل (۳-۲۸): متوسط جریان سلف هنگام اعمال اغتشاش دوم..... ۷۹
- شکل (۳-۲۹): اینورتر ورودی ولتاژ (VSI)..... ۸۰
- شکل (۳-۳۰): اتصال اینورتر به شبکه و بار [۴۴]..... ۸۱
- شکل (۳-۳۱): مدار کنترلی توان اکتیو و راکتیو با استفاده از قاب dq [۴۴]..... ۸۴
- شکل (۳-۳۲): مدار کنترل کمکی برای مدار کنترل توان اکتیو و راکتیو جهت کنترل توان اکتیو و ولتاژ..... ۸۵
- شکل (۳-۳۳): روش کنترل Vf..... ۸۶
- شکل (۴-۱): سیمولاتور پیل سوختی..... ۸۸
- شکل (۴-۲): طرح کلی از مبدل تمام پل تغذیه شده با جریان باک به عنوان رابط سخت افزاری سیمولاتور پیل سوختی..... ۸۹
- شکل (۴-۳): سیگنال گیت کلیدها و ناحیه‌های کاری مبدل تمام پل تغذیه شده با جریان باک..... ۹۱
- شکل (۴-۴): وضعیت الف (ناحیه کاری اول و چهارم)  $0 < t < (d_{FB} - \frac{1}{2})T_s$  و  $\frac{1}{2}T_s < t < d_{FB}T_s$ ..... ۹۲
- شکل (۴-۵): وضعیت ب (ناحیه کاری دوم و پنجم)  $(d_{FB} - \frac{1}{2})T_s < t < d_{Buck}T_s$  و  $d_{FB}T_s < t < (d_{Buck} + \frac{1}{2})T_s$ ..... ۹۴
- شکل (۴-۶): وضعیت ج (ناحیه کاری سوم و ششم)  $d_{Buck}T_s < t < \frac{1}{2}T_s$  و  $(d_{Buck} + \frac{1}{2})T_s < t < T_s$ ..... ۹۵
- شکل (۴-۷): هسته فریت نوع ETD59..... ۹۹
- شکل (۴-۸): ولتاژ خروجی منبع تغذیه در طول مدت تغییر ورودی‌ها..... ۱۰۷

- شکل (۹-۴): متوسط جریان سلف در طول مدت تغییر ورودی‌ها ..... ۱۰۷
- شکل (۱۰-۴): کنترل منبع تغذیه سوئیچینگ به روش ولتاژ ..... ۱۰۸
- شکل (۱۱-۴): تغییرات  $D$  نسبت به تغییرات  $V_e$  ..... ۱۰۹
- شکل (۱۲-۴): کنترل منبع تغذیه سوئیچینگ به روش جریان ..... ۱۱۰
- شکل (۱۳-۴): استفاده از سیگنال جبرانگر شیب برای رفع عیب روش کنترل از راه جریان [۴۳] ..... ۱۱۱
- شکل (۱۴-۴): بلوک دیاگرام منبع تغذیه در مد جریان ..... ۱۱۲
- شکل (۱۵-۴): دیاگرام بود  $G_p(s) = \frac{k_v \tilde{v}_e}{\tilde{v}_e}$  حول نقطه کار ..... ۱۱۵
- شکل (۱۶-۴): دیاگرام بود کنترل کننده  $G_c(s)$  ..... ۱۱۶
- شکل (۱۷-۴): دیاگرام بود  $G_p(s)G_c(s)$  ..... ۱۱۷
- شکل (۱۸-۴): دیاگرام بود کنترل کننده  $G_c(s)$  ..... ۱۱۸
- شکل (۱۹-۴): دیاگرام بود  $G_p(s)G_c(s)$  ..... ۱۱۸
- شکل (۲۰-۴): پیاده‌سازی مدار کنترل کننده ..... ۱۱۹
- شکل (۲۱-۴): دیاگرام بود منبع تغذیه به علاوه کنترل کننده نهایی پیاده‌سازی شده ..... ۱۲۰
- شکل (۱-۵): نحوه شبیه‌سازی پیل سوختی به همراه مبدل DC/DC مدل شده در فصل سوم (سیمولاتور پیل سوختی) ..... ۱۲۳
- شکل (۲-۵): مدل سازی پیل سوختی در نرم افزار Matlab/Simulink (محتوای جعبه نرم افزاری FCPP در شکل (۱-۵)) ..... ۱۲۴
- شکل (۳-۵): جریان بار ..... ۱۲۶
- شکل (۴-۵): توان خروجی مبدل DC/DC ..... ۱۲۶
- شکل (۵-۵): دوره کاری کلید قدرت مبدل DC/DC ..... ۱۲۶
- شکل (۶-۵): ولتاژ خروجی مبدل DC/DC ..... ۱۲۷
- شکل (۷-۵): ولتاژ خروجی مبدل DC/DC ..... ۱۲۷
- شکل (۸-۵): ولتاژ خروجی مبدل DC/DC ..... ۱۲۷
- شکل (۹-۵): جریان ورودی مبدل DC/DC (حداقل جریان سلف برای ماندن در حالت پیوسته بصورت خطوط مقطع آمده است) ..... ۱۲۸

- شکل (۵-۱۰): جریان ورودی مبدل DC/DC (حداقل جریان سلف برای ماندن در حالت پیوسته بصورت خطوط مقطع آمده است). ..... ۱۲۸
- شکل (۵-۱۱): جریان ورودی مبدل DC/DC (حداقل جریان سلف برای ماندن در حالت پیوسته بصورت خطوط مقطع آمده است). ..... ۱۲۸
- شکل (۵-۱۲): جریان خازن بعد از پیل سوختی ..... ۱۲۹
- شکل (۵-۱۳): جریان خازن بعد از پیل سوختی ..... ۱۲۹
- شکل (۵-۱۴): جریان خازن بعد از پیل سوختی ..... ۱۲۹
- شکل (۵-۱۵): ولتاژ پیل سوختی ..... ۱۳۰
- شکل (۵-۱۶): ولتاژ پیل سوختی ..... ۱۳۰
- شکل (۵-۱۷): ولتاژ پیل سوختی ..... ۱۳۰
- شکل (۵-۱۸): ولتاژ پیل سوختی ..... ۱۳۱
- شکل (۵-۱۹): توان پیل سوختی ..... ۱۳۱
- شکل (۵-۲۰): دمای پیل سوختی ..... ۱۳۱
- شکل (۵-۲۱): ضریب U (نسبت مقدار دبی هیدروژن ورودی به پیل سوختی با میزان هیدروژن واکنش داده در آند). ..... ۱۳۲
- شکل (۵-۲۲): ضریب U (نسبت مقدار دبی هیدروژن ورودی به پیل سوختی با میزان هیدروژن واکنش داده در آند). ..... ۱۳۲
- شکل (۵-۲۳): فشار جزئی هیدروژن در آند ..... ۱۳۲
- شکل (۵-۲۴): فشار جزئی اکسیژن در کاتد ..... ۱۳۳
- شکل (۵-۲۵): مقدار هیدروژن واکنش داده در آند (مصرفی) ..... ۱۳۳
- شکل (۵-۲۶): توان خروجی مبدل DC/DC ..... ۱۳۴
- شکل (۵-۲۷): دوره کاری کلید قدرت مبدل DC/DC ..... ۱۳۴
- شکل (۵-۲۸): ولتاژ خروجی مبدل DC/DC ..... ۱۳۵
- شکل (۵-۲۹): جریان ورودی مبدل DC/DC (حداقل جریان سلف برای ماندن در حالت پیوسته بصورت خطوط مقطع آمده است). ..... ۱۳۵
- شکل (۵-۳۰): جریان ورودی مبدل DC/DC (حداقل جریان سلف برای ماندن در حالت پیوسته بصورت خطوط مقطع آمده است). ..... ۱۳۵

- شکل (۳۱-۵): جریان خازن بعد از پیل سوختی ..... ۱۳۶
- شکل (۳۲-۵): ولتاژ پیل سوختی ..... ۱۳۶
- شکل (۳۳-۵): توان پیل سوختی ..... ۱۳۶
- شکل (۳۴-۵): دمای پیل سوختی ..... ۱۳۷
- شکل (۳۵-۵): ضریب  $U$  (نسبت مقدار دبی هیدروژن ورودی به پیل سوختی با میزان هیدروژن واکنش داده در آند) ..... ۱۳۷
- شکل (۳۶-۵): فشار جزئی هیدروژن در آند ..... ۱۳۷
- شکل (۳۷-۵): فشار جزئی اکسیژن در کاتد ..... ۱۳۸
- شکل (۳۸-۵): مقدار هیدروژن واکنش داده در آند (مصرفی) ..... ۱۳۸
- شکل (۳۹-۵): سیگنال گیت کلیدهای قسمت تمام پل ..... ۱۳۹
- شکل (۴۰-۵): رابط سخت افزاری ساخته شده ..... ۱۳۹
- شکل (۴۱-۵): رابط سخت افزاری ساخته شده (نمای کلیدهای قسمت تمام پل) ..... ۱۴۰
- شکل (۴۲-۵): رابط سخت افزاری ساخته شده (نمای سلف و ترانس و خازنهای خروجی) ..... ۱۴۰
- شکل (۴۳-۵): مدار کنترل رابط سخت افزاری ساخته شده ..... ۱۴۱
- شکل (۴۴-۵): شکل موج خروجی سنسور جریان در توان خروجی ۲۱۵۰ وات ..... ۱۴۲
- شکل (۴۵-۵): شکل موج ولتاژ بعد از سلف ورودی و قبل از قسمت تمام پل ..... ۱۴۳

## فهرست جداول

- جدول (۱-۲): مقایسه انواع پیل‌های سوختی [۱][۲۳]..... ۲۰
- جدول (۲-۲): کاربرد و محدوده توانی انواع پیل سوختی [۲۱]..... ۲۰
- جدول (۳-۲): واکنش‌های الکتروشیمیایی در پیل‌های سوختی [۲۱]..... ۲۱
- جدول (۴-۲): پارامترهای پیل سوختی [۳][۱۰][۱۷][۲۸]..... ۳۸
- جدول (۱-۳): مقایسه مبدل تمام پل ورودی جریان با مبدل تمام پل ورودی ولتاژ..... ۵۶
- جدول (۲-۳): مشخصات اجزا و مقادیر نامی مبدل DC/DC..... ۶۸
- جدول (۱-۴): مشخصات سیم‌های لاکه..... ۱۰۱
- جدول (۲-۴): مقایسه دو دیود سریع..... ۱۰۴
- جدول (۳-۴): مشخصات اجزا منبع تغذیه سوئیچینگ ساخته شده..... ۱۰۶



## فصل اول: مقدمه

## ۱-۱- کاربرد پیل‌های سوختی در تولید انرژی برق

پیل‌های سوختی به عنوان مولد غیرمتمرکز (پراکنده) انرژی امتیازات بالقوه زیادی دارند. این مولدها را می‌توان در ظرفیت‌های مختلفی تولید کرد، لذا برای استفاده در کاربردهای متفاوت، ایده‌آل می‌باشند. کارکرد این سیستم‌ها صدای کمی تولید نموده و آلودگی زیست محیطی بسیار کمی نیز دارند. در حال حاضر در کشورهای پیشرفته پروژه‌های متعددی و برنامه‌های متعدد با بودجه‌های بسیار بالا در زمینه بازار تولید پراکنده انرژی توسط محققین و شرکت‌های تولید انرژی الکتریکی در دست انجام است. لذا با توجه به این حجم سرمایه‌گذاری در زمینه توسعه و ساخت تجاری پیل سوختی حل مسائل و مشکلات کاربرد این مولدها امری ضروری است [۱].

ایالات متحده آمریکا برنامه تحقیقاتی هیدروژن و پیل سوختی را از سال ۱۹۶۰ با به کار بردن فن‌آوری پیل سوختی قلیایی در برنامه فضایی آپولوی ناسا آغاز نمود. موفقیت عملکرد واحد پیل سوختی قلیایی ۲/۲ کیلووات منجر به طراحی بزرگتر (۱۲ کیلووات) در برنامه شاتل فضایی شده و ۲۴ واحد در ۱۱۲ پرواز از سال ۱۹۸۱ به کار گرفته شد. در سال‌های اخیر تعداد برنامه‌های دولت آمریکا و بودجه اختصاص یافته به طور چشمگیری فزونی یافت. عمده تلاش آمریکا بر روی کاربرد هیدروژن به عنوان سوخت در خودروهایی پیل سوختی متمرکز گشته و در سایر کاربردها مانند تولید غیر متمرکز نیرو و واحدهای نیروگاهی توجه کمتری نشان داده است.

دولت ایالات متحده، از سال ۱۹۸۰ از تحقیقات در زمینه اتوبوس‌های پیل سوختی حمایت نموده است. هدایت این تحقیقات از جانب وزارت انرژی می‌باشد و اولین اتوبوس‌های پیل سوختی آمریکا (سه اتوبوس) در سال ۱۹۹۴ ساخته شدند. این اتوبوس‌ها ۳۰ فوت طول داشتند و نیروی محرکه آنها توسط پیل سوختی اسید فسفریک تأمین می‌شد. این اتوبوس‌ها به مدت ۱۰ سال تحت مدیریت دانشگاه Georgetown، فعالیت کردند. فاز دوم برنامه به ساخت اتوبوس‌های هیبریدی پلیمری بر روی شاسی اتوبوس Nova با طول ۴۰ فوت معطوف شد که موتور پیل سوختی آن متعلق به شرکت بالارد بود. این اتوبوس‌ها در سال ۱۹۹۸ و ۲۰۰۰ ارائه شدند. دانشگاه Georgetown از زمان شروع تا تولید نسل سوم اتوبوس‌ها این پروژه‌ها را مدیریت نمود.

شرکت بالارد<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۹ تحت نام Ballard Research به منظور هدایت تحقیق و توسعه در زمینه باتری‌های یون-لیتیم در کانادا تشکیل شد. در سال ۱۹۸۳ بالارد توسعه پیل‌های سوختی پلیمری را آغاز نمود. مدل اولیه پیل سوختی در سال ۱۹۸۹ ساخته شد و در سال ۱۹۹۲ الی ۱۹۹۴ نمونه اولیه این فن‌آوری ارائه شد. بالارد ساخت اولین محصول پیل سوختی تجاری خود با نام Nexa را در سال ۲۰۰۱ آغاز نمود.

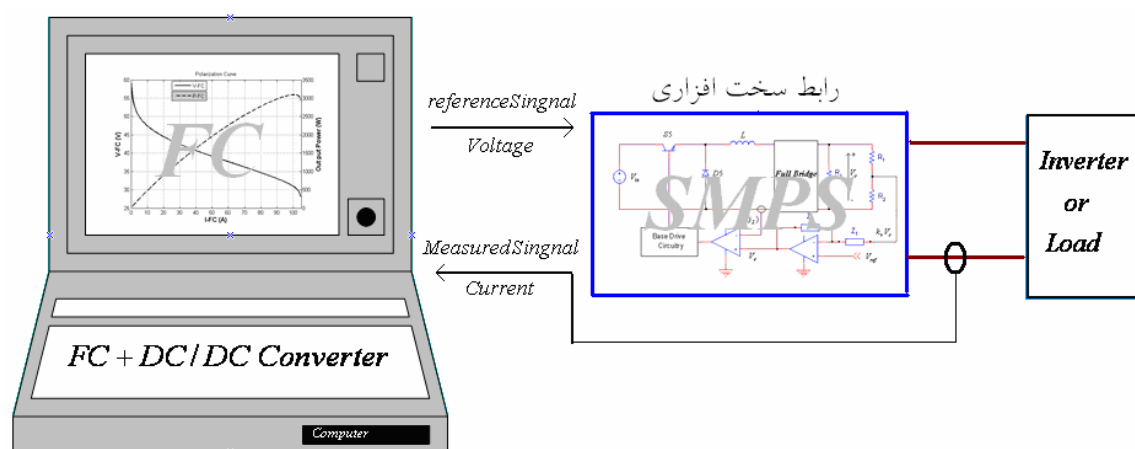
شرکت بالارد اکنون پیشگام جهانی در توسعه، تولید و ساخت پیل‌های سوختی پلیمری، سیستم‌های پیل سوختی، موتورهای پیل سوختی برای بازار حمل و نقل، سیستم‌های رانش برقی برای خودروهای هیبریدی (باتری-پیل سوختی)، میکرو توربین‌ها و سایر فن‌آوری‌های تولید نیروی غیرمتمرکز و ساخت سیستم پیل سوختی برای محدوده وسیعی از کاربردها از وسایل کوچک قابل حمل تا نیروگاه‌های بزرگ می‌باشد. بالارد با شرکت‌های قدرتمند و بزرگ دنیا شامل دایملرکرایسلر، فورد، آلستوم و ابارا مشارکت دارد.

در حال حاضر، در کشور ما فعالیت‌ها در زمینه پیل سوختی عمدتاً از نوع تحقیقات در حوزه‌های خاصی از فن‌آوری پیل سوختی (پیل سوختی قلیایی، پلیمری و اسید فسفریک) می‌باشد. از جمله فعالین این حوزه می‌توان به سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، دانشگاه‌های تربیت مدرس، صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صنعتی شریف، صنعتی امیرکبیر، علم و صنعت ایران و همچنین سازمان انرژی اتمی، مرکز تحقیقات جهاد اصفهان و شرکت ایران خودرو اشاره داشت. با توجه به اینکه فعالیت‌های کوچک و نامنسجم نمی‌تواند در دستیابی به فن‌آوری پیل سوختی موفقیت آمیز باشد، لذا اتخاذ سیاستی واحد جهت همسو نمودن فعالیت‌ها و مدیریت منابع در راستای توسعه فن‌آوری پیل سوختی در کشور ضروری به نظر می‌رسد. همان گونه که اشاره شد تاکنون بیشترین کاربرد پیل سوختی در زمینه حمل و نقل و تا حدودی در زمینه تولید برق بوده است. ولی با توجه به سرمایه‌گذاری‌های کلان و تحقیقات گسترده انتظار می‌رود که در آینده از لحاظ اقتصادی قابل رقابت با سایر منابع گردیده و لذا بکارگیری آنها در نیروگاه‌ها مرسوم گردد[۱].

## ۲-۱- طرح مسأله

اگر مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه پیل سوختی در دانشگاه‌ها از جنبه عملی نیز برخوردار باشد، تحقیقات دارای ارزش بیشتری می‌شود و به واقعیت نزدیک می‌شود. اما تهیه یک واحد پیل سوختی مستلزم صرف هزینه زیادی است. به طور مثال قیمت یک واحد نمونه ۱۲۰۰ وات (Nexa) ساخت شرکت بالارد حدود ۷۰ میلیون ریال هزینه دارد. بنابراین ساخت یک سیمولاتور پیل سوختی که بتوان به کمک آن، مطالعات مختلف بر روی پیل سوختی انجام داد، ضروری به نظر می‌رسد. بدین ترتیب می‌توان بدون هزینه تهیه و نگهداری پیل سوختی از یک سیمولاتور پیل سوختی بهره برد. در ضمن ضررهای ناشی از طول عمر قطعات و نگرانی از احتمال آسیب دیدن یک پیل سوختی واقعی در حین آزمایشات تجربی از بین خواهد رفت.

با توجه به دلایل ذکر شده، در این تحقیق تصمیم به ساخت یک سیمولاتور پیل سوختی که قابلیت انجام مطالعات اتصال به شبکه و یا بار منفرد را فراهم آورد، گرفته شد. طرح کلی از این سیمولاتور در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



### Fuel Cell Simulator

شکل (۱-۱): سیمولاتور پیل سوختی

برای ساخت سیمولاتور در مرحله اول تصمیم گرفته شد که یک منبع تغذیه سوئیچینگ<sup>۱</sup> ساخته شود که بتواند ولتاژ خروجی پیل سوختی را فراهم کند. این امر بدلیل مشخصه ولتاژ-جریان پیل سوختی

<sup>۱</sup> Switch Mode Power Supply (SMPS)