



دانشگاه سبزگان

دانشکده فنی و مهندسی

## مطالعه و شبیه سازی عملکرد سیستم ترکیبی پیل سوختی

### و مبدل DC/DC

پایان نامه کارشناسی

رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک

محمد چمانده

۸۷۴۴۲۱۱۹

استاد راهنما:

دکتر ابوالفضل جلیوند

بهمن ماه ۱۳۹۱

## چکیده

پیل های سوختی به عنوان تامین کننده های قدرت جدید، جایگاه ویژه ای در صنعت برق پیدا کرده اند. قابلیت هایی چون بهره برداری آسان، قابلیت اطمینان بالا، امکان حمل و نقل، آلودگی کم و راندمان بالا توجه روزافزونی را نسبت به این منابع ارزشمند انرژی باعث شده است. مبدل های الکترونیک قدرت نقش عمده ای در تبدیل توان DC تولید شده توسط سلول های سوختی که عمدتاً دارای تغییرات وسیعی نیز می باشند، ایفا می کند. در این پایان نامه، مدل حالتی از یک پیل سوختی و یک مبدل DC/DC از نوع افزایشی ارائه شده است. مجموعه مدل شده به عنوان سیستم با duty cycle مبدل کنترل شده است. نقطه کار سیستم را می توانیم در هر نقطه از منحنی مشخصه تنظیم کنیم. این روش، روشی مناسب برای اتصال پیل سوختی به دستگاه های تولید نیرو و ذخیره سازی است. برای کنترل ولتاژ خروجی از ترمینال های مبدل، از کنترل کننده PI استفاده شده است که با کنترل duty cycle مبدل، ولتاژ خروجی را در مقدار ولتاژ مطلوب نگه می دارد.

## فهرست مطالب

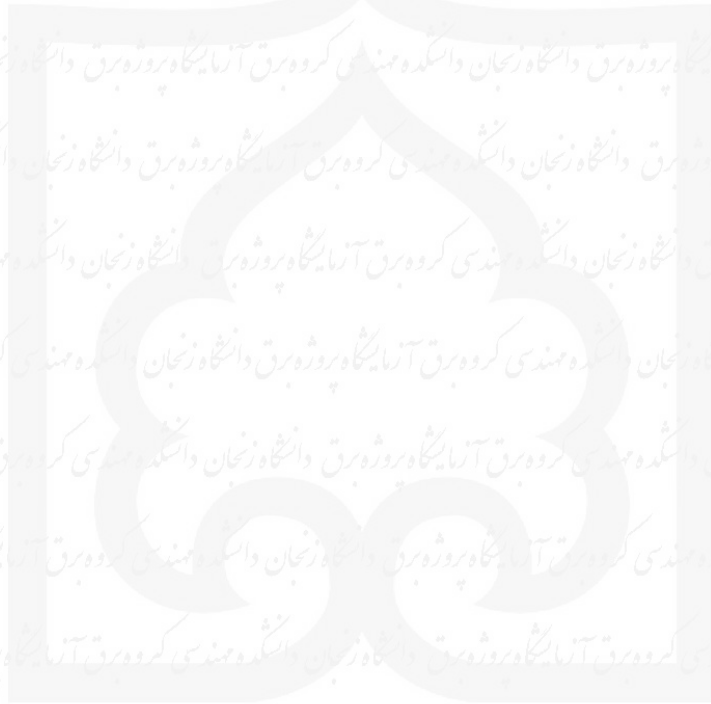
فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
فصل ۲: اصول کار پیل‌های سوختی و انواع آن	۶
۱-۲- مقدمه	۷
۲-۲- طرز کار پیل‌های سوختی	۷
۳-۲- مزایای پیل سوختی	۹
۴-۲- انواع پیل‌های سوختی	۱۱
۲-۴-۲- پیل سوختی PEM	۱۲
۵-۲- پیل سوختی به عنوان منبع تغذیه و مقایسه آن با باتری	۱۴
۶-۲- کاربردهای مختلف پیل سوختی	۱۵
۷-۲- معایب پیل‌های سوختی	۱۶
۸-۲- آثار عملکرد حرارتی پیل‌های سوختی	۱۷
فصل ۳: مدل تئوری پیل سوختی	۱۹
۱-۳- مقدمه	۲۰
۲-۳- مدل استاتیکی	۲۰
۳-۳- مدل دینامیکی	۲۴
۴-۳- مدل حالت	۲۵
۵-۳- نمایش فضای حالت سیستم‌ها	۲۶
۶-۳- خطی سازی سیستم‌های غیر خطی	۲۸
فصل ۴: مبدل DC/DC	۳۶
۱-۴- مقدمه	۳۷
۲-۴- معرفی مبدل DC/DC	۳۷
۳-۴- مدل حالت	۴۰
۴-۴- مدل پیل سوختی + مبدل DC/DC	۴۴
فصل ۵: شبیه‌سازی حلقه‌باز و تحلیل پاسخ فرکانسی	۴۷
۱-۵- مقدمه	۴۸
۲-۵- شبیه‌سازی ۱: $(y = i_L)$	۴۹
۳-۵- شبیه‌سازی ۲: $(y = V_C)$	۵۲
۴-۵- شبیه‌سازی ۳: $(u = i_o)$	۵۳
۵-۵- تحلیل پاسخ فرکانسی	۵۵
فصل ۶: طراحی کنترل‌کننده PI	۵۷
۱-۶- مقدمه	۵۸
۲-۶- اصول طراحی کنترل‌کننده‌ها	۵۸
۳-۶- معیارهای طراحی کنترل‌کننده‌ها	۶۰
۴-۶- سیستم کنترل حلقه بسته	۶۱
۵-۶- مودهای کنترل	۶۲
۲-۵-۶- کنترل‌کننده‌های پیوسته	۶۳
۶-۶- طراحی کنترل‌کننده برای کنترل ولتاژ خروجی پیل سوختی	۶۷

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) دیاگرام پیل سوختی (PEM) ..... ۳
- شکل (۱-۲) شمای کلی پیل سوختی ..... ۸
- شکل (۲-۲) پشته پیل سوختی ..... ۹
- شکل (۳-۲) یک نمونه پیل سوختی ۵۰ واتی ..... ۱۵
- شکل (۱-۳) سهم تلفات آند و کاتد ..... ۲۴
- شکل (۲-۳) مدل الکتریکی دینامیکی پیل سوختی PEM ..... ۲۵
- شکل (۳-۳) مدل دینامیکی پیل سوختی ..... ۳۳
- شکل (۴-۳) منحنی قطبی سازی پیل سوختی ..... ۳۳
- شکل (۵-۳) منحنی قطبی سازی برای دو پشته پیل سوختی ..... ۳۴
- شکل (۶-۳) منحنی توان بر حسب جریان یک پشته پیل سوختی ..... ۳۵
- شکل (۱-۴) دیاگرام اتصال پیل سوختی، مبدل DC/DC و بار ..... ۳۸
- شکل (۲-۴) تقاطع منحنی قطبی سازی با خط راست بار به هنگام تغییر **duty cycle** ..... ۳۸
- شکل (۳-۴) توان تأمین شده مطابق **duty cycle** مبدل ..... ۴۰
- شکل (۴-۴) مبدل افزایشنده با تلفات ..... ۴۰
- شکل (۵-۴) مبدل افزایشنده در حالت روشن با تلفات ..... ۴۱
- شکل (۶-۴) مبدل افزایشنده در حالت خاموش ..... ۴۱
- شکل (۷-۴) دیاگرام کامل پیل سوختی + مبدل DC/DC ..... ۴۴
- شکل (۱-۵) بلوک دیاگرام مدل ( $y = \dot{I}_L$ ) ..... ۵۰
- شکل (۲-۵) محیط **simulink** نرم افزار **Matlab** ..... ۵۰
- شکل (۳-۵) جریان سلف به ازای انحرافی در **d** ..... ۵۱
- شکل (۴-۵) بلوک دیاگرام مدل ( $y = V_C$ ) ..... ۵۲
- شکل (۵-۵) ولتاژ خازن به ازای انحرافی در **d** ..... ۵۲
- شکل (۶-۵) جریان خروجی درخواستی به عنوان ورودی ..... ۵۳
- شکل (۷-۵) جریان ورودی پیل سوختی به ازای جریان خروجی درخواستی ..... ۵۴
- شکل (۸-۵) ولتاژ خازن به ازای جریان درخواستی ..... ۵۴
- شکل (۹-۵) دیاگرام بودی پاسخ فرکانسی ..... ۵۶
- شکل (۱-۶) روند کلی حل یک مساله ..... ۵۸
- شکل (۲-۶) دیاگرام بلوکی کنترل کننده مدار بسته ..... ۶۲
- شکل (۳-۶) دیاگرام بلوکی یک کنترل کننده ناپیوسته ..... ۶۳
- شکل (۴-۶) دیاگرام کنترل کننده ..... ۶۴
- شکل (۵-۶) محیط شبیه سازی ..... ۶۸
- شکل (۶-۶) جریان خروجی به عنوان ورودی سیستم ..... ۶۹
- شکل (۷-۶) ولتاژ خروجی ( $V_C$ ) ..... ۷۰
- شکل (۸-۶) ورودی **d'** (خروجی کنترل کننده) ..... ۷۱
- شکل (۹-۶) ورودی خطای کنترل کننده ..... ۷۲
- شکل (۱۰-۶) ولتاژ خروجی به ازای ورودی مرجع ۲۰۰ ولت ..... ۷۳
- شکل (۱۱-۶) ورودی **d'** به ازای ورودی مرجع ۲۰۰ ولت ..... ۷۳
- شکل (۱۲-۶) نمودار بودی کنترل کننده PI ..... ۷۴

## فهرست جداول

جدول (۱-۲) مشخصات پیل سوختی .....	۱۲
جدول (۲-۲) مواد قابل استفاده به عنوان سوخت در پیل‌های سوختی .....	۱۲
جدول (۳-۲) تولید کنندگان پیل سوختی PEM .....	۱۴
جدول (۴-۲) حرارت عملیاتی پیل‌های سوختی و مواد سازنده آنها .....	۱۸
جدول (۱-۵) پارامترهای پیل سوختی Ballard Nexa .....	۴۸
جدول (۲-۵) مقادیر ثابت‌های $k_i$ .....	۴۹
جدول (۳-۵) مقادیر مورد استفاده برای طراحی مبدل افزایشنده .....	۴۹
جدول (۴-۵) مقادیر اولیه متغیرها .....	۵۱
جدول (۵-۵) مقادیر نهایی متغیرها .....	۵۱
جدول (۶-۵) مقادیر نهایی متغیرها .....	۵۳



# فصل ۱:

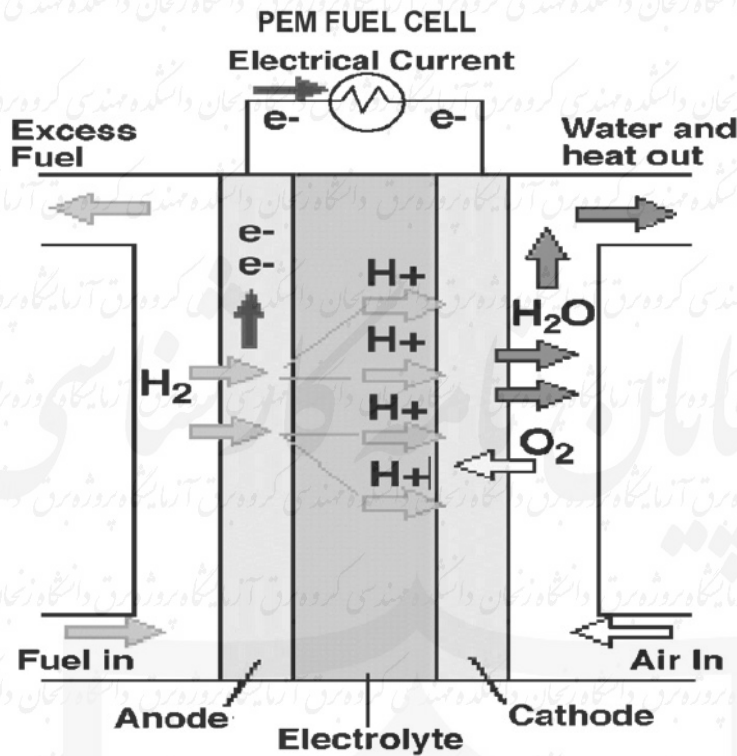
## مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

هدف اصلی تکنولوژی‌های تبدیل انرژی جدید، تولید انرژی تمیز و پاک است. در سالهای اخیر، پیل سوختی به عنوان یک منبع انرژی جدید با مزایای بسیار زیاد، معرفی شده است و تحقیقات زیادی برای بهبود ساختار و کاهش هزینه آن صورت می‌گیرد. پیل‌های سوختی هیدروژن را به عنوان سوخت مصرف می‌کنند و محصول آنها آب است. بنابراین این منبع انرژی آلودگی برای محیط ایجاد نمی‌کند و با توجه به بازده بالای آن گزینه مناسبی برای استفاده در خودروها است.

یک پیل سوختی توان الکتروشیمیایی تولید می‌کند، هنگامی که یک گاز هیدروژن غنی از میان آنند و یک گاز اکسیژن غنی (یا هوا) از میان کاتد می‌گذرد، الکترولیتی که میان آنند و کاتد تعبیه شده است، اجازه می‌دهد بار الکتریکی مبادله شود. تجزیه مولکولهای هیدروژن جریانی از بارهای الکتریکی را میان الکترولیت فراهم می‌کند و یک جریان الکتریکی را میان مدار خارجی فراهم می‌کند. مانند شکل زیر:





شکل (۱-۱) دیاگرام پیل سوختی (PEM)

تحت شرایط کاری نرمال، یک سلول سوختی به تنهایی تقریباً می‌تواند ۱/۲ ولت ولتاژ تولید کند. برای استفاده در سیستم‌های تولید انرژی که توان نسبتاً بالایی را نیاز دارند، چند سلول با هم سری شده و توان بیشتری را تولید می‌کنند.

پیل‌های سوختی از نوع PEM، منبع خوبی از انرژی هستند. اما نمی‌توانند به تغییرات در بار به طور مطلوبی پاسخ دهند. که اساساً ناشی از پاسخ ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی کند آنها است. برای ارزیابی رفتار آنها یک مدل از سلول مورد نیاز است.

مشکل عمده پیل‌های سوختی کندی واکنش شیمیایی در آنها می‌باشد. پیل سوختی برای تولید توان نامی، زمانی حدود ده دقیقه لازم دارد (این زمان بسته به نوع پیل سوختی و مقدار توان آن متغیر است). بنابراین لازم است پیل سوختی همراه با یک منبع انرژی کمکی، مثل باتری یا ابرخازن به کار رود.

در قالب مقالات برای مدل کردن پیل سوختی از یک منبع DC (گاهی به همراه یک مقاومت و یک خازن) استفاده می‌شود. از آنجاییکه این مدل خواص و رفتار واقعی پیل سوختی را لحاظ نمی‌کند، برای شبیه‌سازی در بسیاری از کاربردها مناسب نیست. در کاربردهای خودرو برقی میزان توان مورد نیاز



تغییرات و نوسانات زیادی دارد. بنابراین در این حالت در نظر گرفتن رفتار دینامیکی پیل سوختی از اهمیت زیادی برخوردار است.

در دهه‌های اخیر، با توجه به آلودگی روزافزون هوا و کاهش منابع سوخت فسیلی، محققان در صدد یافتن جایگزین‌های مناسبی برای موتورهای احتراق داخلی بوده‌اند. خودروهای برقی که تنها از باتری استفاده می‌کنند، یکی از گزینه‌ها می‌باشند. به دلیل مساله تخلیه باتری و نیاز آن به زمان نسبتاً طولانی برای شارژ، این خودروها بهترین گزینه نمی‌باشند. گزینه دیگر خودروی ترکیبی است که از باتری و موتور احتراق داخلی استفاده می‌کند. این خودروها تا حدودی مشکل آلوده کردن هوا را دارند.

در اواسط دهه ۱۹۸۰ دولتهای ایالات متحده امریکا، کانادا و ژاپن سرمایه‌گذاری برای طراحی پیل سوختی و تحقیقات در این زمینه را افزایش داده‌اند. از دهه ۱۹۹۰ شرکت Ballard Power System که در صنعت پیل سوختی دنیا پیشرو می‌باشد، پیل‌های سوختی خود را در اتوبوس‌های پیل سوختی نمونه که از هیدروژن فشرده به عنوان سوخت استفاده می‌کنند به کار برد. پیل‌های سوختی به دلیل هزینه بالای آنها هنوز به صورت گسترده تجاری نشده‌اند، ولی با تحقیقات و پیشرفتهای انجام شده برای کاهش هزینه آنها انتظار می‌رود در آینده نزدیک در بسیاری از کاربردها مورد استفاده قرار گیرند.

مرجع [۱]، یک مدل ریاضی دقیق با در نظر گرفتن مشخصات دینامیکی پیل سوختی را بیان می‌کند. قسمت استاتیکی این مدل در بسیاری از مراجع دیگر نیز آمده است. در این مدل ولتاژ ایده‌آل پیل سوختی و تلفات آن با محاسبات ریاضی و با داشتن دما، فشار هیدروژن و اکسیژن و نیز جریان پیل سوختی محاسبه می‌شوند. رفتار دینامیکی پیل سوختی نیز توسط یک معادله درجه یک لحاظ می‌شود. مدل استفاده شده در این پایان نامه در مرجع [۱] آمده است. ولتاژ پیل سوختی توسط یک مبدل افزایش پیدا می‌کند تا ولتاژ مورد نیاز باس DC را فراهم کند.

مبدل‌های DC/DC در کاربردهایی که یک ولتاژ خروجی متوسط مورد نیاز است، استفاده می‌شوند که می‌توانند کمتر یا بیشتر از ولتاژ ورودی باشند. اگر منحنی توان پیل سوختی را ببینید، مشاهده می‌کنید که نقطه کاری وجود دارد که توان ماکزیمم در آنجا تحویل داده می‌شود. نقاط بارز دیگر، نقطه راندمان ماکزیمم سیستم پیل سوختی + مبدل DC/DC است. در این نقطه دوم، راندمان پیل سوختی و راندمان مبدل در بالاترین حالت است.

پیل سوختی می‌تواند در این نقاط کار به خوبی کار کند. یک سیستم کنترلی مناسبی برای سیستم پیل سوختی و مبدل مورد نیاز است. اگر مدل خوبی از سیستم پیل سوختی + مبدل DC/DC ساخته شود، طراحی سیستم کنترل آن بسیار آسان خواهد بود. مدل ارائه شده برای طراحی کنترل کننده‌ها بسیار مناسب است.

این پایان نامه در ۶ فصل تدوین شده است. در فصل دوم به ساختار پیل سوختی و نحوه عملکرد آن پرداخته می‌شود. بعلاوه در این فصل به مزایا و معایب پیل‌های سوختی و نیز انواع آنها اشاره شده است.

در فصل سوم مدل ریاضی برای پیل سوختی به طور کامل تشریح شده است و مدل حالتی از پیل سوختی به دست می‌آید.

در فصل چهارم ساختار و عملکرد مبدل DC/DC بیان می‌شود و مدل حالتی از آن ارائه می‌شود. بعلاوه معادلات فضای حالت کل سیستم پیل سوختی + مبدل DC/DC بیان می‌شود.

در فصل پنجم به بررسی صحت مدل ارائه شده در فصل قبلی پرداخته می‌شود و با شبیه‌سازی حلقه باز در محیط Simulink نرم افزار Matlab درستی مدل نتیجه گرفته می‌شود.

در فصل ششم به بررسی کنترل کننده‌ها پرداخته شده و در انتها کنترل کننده PI برای کنترل ولتاژ خروجی به ازای جریان خروجی ثابت طراحی گردیده است. این کنترل کننده با کنترل ورودی Duty cycle، ولتاژ خازن را روی مقدار ثابتی نگه می‌دارد. نتایج شبیه‌سازی در این فصل آمده است.

## فصل ۲:

# اصول کار پیل‌های سوختی و انواع آن

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل به ساختار پیل سوختی و نحوه عملکرد آن پرداخته می‌شود. بعلاوه در این فصل به مزایا و معایب پیل‌های سوختی و نیز انواع آنها اشاره شده است.

## ۲-۲- طرز کار پیل‌های سوختی

پیل سوختی شامل یک الکترولیت فشرده می‌باشد که بین دو الکترود نازک به نام‌های آند و کاتد قرار گرفته است. این پیل طی فرایند الکتروشیمیایی از اکسیژن و هیدروژن، الکتریسیته تولید می‌کند.

رفتار پیل سوختی شبیه یک باتری است با این تفاوت که مواد واکنش دهنده (و مواد تولید شده) در

پیل سوختی ذخیره نمی‌شوند بلکه به طور مستمر پیل را تغذیه می‌کنند. در پیل سوختی حالتی از انرژی

به حالت دیگر تبدیل می‌شود، به طوری که در این تبدیل مواد داخل پیل مصرف نمی‌شوند. همچنین

چگالی انرژی باتری کمتر از پیل سوختی است و فرایند شارژ نمودن باتری بسیار پیچیده تر از پر کردن

تانک سوخت پیل سوختی است. در باتری‌ها بعد از چندین بار شارژ شدن توان تبدیلات الکتروشیمیایی

کاهش می‌یابد. حال آنکه در پیل‌های سوختی چنین محدودیتی وجود ندارد.

پیل‌های سوختی به عنوان یکی از منابع انرژی تجدید پذیر می‌باشند که در سالهای اخیر علاوه بر کاربرد

در سیستم‌های تولید پراکنده مورد توجه ویژه‌ای در صنایع مختلف اعم از صنایع حمل و نقل و نظامی قرار

گرفته اند. پیل‌های سوختی قابلیت بالایی در تامین توان مصرف کننده‌های مستقل دارا می‌باشند و

استفاده از آنها به راحتی با توانمندی عناصر الکترونیک قدرت در شرایط مختلف بارگیری امکان پذیر

می‌باشد. اما پیل‌های سوختی منابع ایده آل ولتاژ نیستند، در نتیجه ولتاژ آنها نسبت به تغییرات جریان

آنها به طور کاملاً ایده آلی ثابت نمی‌باشد.

سوخت (هیدروژن) وارد آند (الکتروود منفی) شده و در آنجا یونهای مثبت و منفی آن از هم جدا می‌شوند.

اکسید کننده (هوا) به کاتد (الکتروود مثبت) وارد می‌شود و ضمن ترکیب با یونهای مثبت هیدروژن و

الکترونها تولید آب می‌کند. یونهای مثبت برای رسیدن به کاتد از الکترولیت عبور می‌کنند، اما الکترونها

## نتیجه گیری

در این پایان نامه، مدل خطی شده‌ای از پیل سوختی ارائه شده بود. مدل حالت آن از معادلات توصیف شده مدار الکتریکی معادل که رفتار دینامیکی پیل سوختی را نشان می‌دهد، گرفته شده بود. مدل خطی شده به صورت پارامتری بیان شده است تا برای هر نقطه کاری که از منحنی مشخصه پیل سوختی بدست می‌آید، مورد استفاده باشد. وجود مبدل DC/DC نیز توجیه شد.

سیستم پیل سوختی + مبدل DC/DC دو ورودی دارد. یکی جریان خروجی و دیگری duty cycle. با کنترل کننده PI ورودی و با کنترل duty cycle مبدل، ولتاژ خروجی هنگامی که جریان خروجی تغییر می‌کند، در مقدار مطلوبی که با ورودی مرجع تعیین می‌شود، ثابت می‌ماند.

## منابع و مأخذ

- [1] J.M. Andujar,F. Sefura,M.J. Vasallo,"A suitable model plant for control of the set fuel cell – DC/DC converter", Renewable Energy.NO.33,pp.813-826.
- [2] A.kirubakaran,shailendrajain and R.Knema"The PEM Fuel Cell system with DC/DCBoost Converter:design, modeling and simulation" .No.3.May2009
- [3] دکتر علی خاکی صدیق، اصول کنترل مدرن، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۲
- [4] کاتسوهیکو اگانا، ترجمه محمود دینانی، مهندسی کنترل، انتشارات نص، ۱۳۸۸