بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی

IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشکده‌ی فنی و مهندسی

گروه برق

کنترل ولتاژ و توان پیل سوختی با استفاده از کنترل کننده‌ی مرتبه‌ی کسری

پایان‌نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد

در رشته‌ی مهندسی برق گرایش کنترل

احمد حیدری

استاد راهنما:

دکتر عارف شاه منصوریان

استاد مشاور:

دکتر امیر فرهاد احیائی

تابستان ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر و مادرم

که شمع‌های فروزان و هدایتگر زندگی‌ام بوده و هستند

و

برادرانم

که یاری‌گر واقعی من در طی این دوران بودند.

تشکر و قدردانی

خدای مهربان را سپاس می‌گویم که همواره راه را برایم هموار کرده است و پشتوانه‌های ارزشمندی چون پدر و مادرم به من ارزانی داشته، که در سایه وجود نازنینشان هرگونه سختی رنگ می‌بازد.

از استاد راهنمای ارجمند جناب آقای **دکتر عارف شاه منصوریان** به‌خاطر حمایت‌های بی‌دریغشان سپاسگزارم.

از استاد گرامی جناب آقای **دکتر حسن زرآبادی‌پور** که داوری این پایان‌نامه را به‌عهده گرفتند نیز کمال تشکر را دارم.

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)

معاونت آموزشی- مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

بدین وسیله گواهی می‌شود جلسه‌ی دفاعیه از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد **احمد حیدری** دانشجوی رشته‌ی **مهندسی برق** گرایش **کنترل** تحت عنوان **کنترل ولتاژ و توان پیل سوختی با استفاده از کنترل کننده‌ی مرتبه‌ی کسری** در تاریخ **۱۳۹۲/۷/۱۵** در دانشگاه برگزار گردید و این پایان‌نامه با نمره به عدد **۱۷** و به حروف **هفده** با درجه خوب مورد تأیید هیأت داوران قرار گرفت.

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه‌ی دانشگاهی	دانشگاه	امضا
۱	استاد راهنما	دکتر عارف شاه منصوریان	استادیار	دانشگاه بین‌المللی امام خمینی-قزوین	
۲	استاد مشاور	دکتر امیر فرهاد احیائی	استادیار	دانشگاه بین‌المللی امام خمینی-قزوین	
۳	داور	دکتر حسن زرآبادی‌پور	استادیار	دانشگاه بین‌المللی امام خمینی-قزوین	
۴	نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی	دکتر رحیم حداد	دانشیار	دانشگاه بین‌المللی امام خمینی-قزوین	

تعهدنامه‌ی اصالت اثر

اینجانب احمد حیدری دانش آموخته‌ی مقطع کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق گرایش کنترل که در تاریخ ۱۳۹۲/۷/۱۵ از پایان‌نامه‌ی خود تحت عنوان کنترل ولتاژ و توان پیل سوختی با استفاده از کنترل کننده‌ی مرتبه‌ی کسری با کسب درجه‌ی خوب دفاع کرده‌ام، شرعاً و قانوناً متعهد می‌شوم:

۱. مطالب مندرج در این پایان‌نامه، حاصل تحقیق و مطالعه‌ی اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران اعم از پایان‌نامه، کتاب، مقاله و غیره استفاده کرده‌ام، با رعایت کامل امانت، مطابق مقررات، اقدام به ارجاع در متن و ذکر آن در فهرست منابع و مآخذ نموده‌ام.

۲. تمامی یا بخشی ازاین پایان‌نامه قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی به سایر دانشگاه‌ها و موسسات آموزش عالی ارائه نشده است.

۳. مقالات مستخرج از این پایان‌نامه کاملاً حاصل کار اینجانب بوده و از هرگونه جعل داده و یا تغییر اطلاعات پرهیز کرده‌ام.

۴. از ارسال همزمان و یا تکراری مقالات مستخرج ازاین پایان‌نامه (با بیش از ۳ درصد همپوشانی) به مجلات و یا همایش‌های گوناگون خودداری نموده و می‌نمایم.

۵. کلیه حقوق مادی و معنوی حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره) بوده و متعهد می‌شوم هرگونه بهره‌مندی ویا نشر دستاوردهای حاصل از این تحقیق اعم از چاپ کتاب، مقاله، ثبت اختراع و غیره (چه در زمان دانشجویی و یا بعد از فراغت از تحصیل) با کسب اجازه از استاد (استادان) راهنما باشد.

۶. درصورت اثبات تخلف و نقض موارد پنجگانه فوق (درهر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره) از درجه اعتبار ساقط و اینجانب هیچگونه ادعایی نخواهم داشت.

نام ونام خانوادگی دانشجو: احمد حیدری

امضاء

سوگندنامه دانش آموختگان کارشناسی ارشد دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

به نام خدا

سپاس ایزد منان را که مرا مشمول الطاف خویش نمود که با طی مراحل تحصیل موفق به اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد شوم. به شکرانه‌ی این نعمت بزرگ الهی که با امکانات این مرز و بوم، فراهم و نزد اینجانب به امانت گذاشته شده است، در پیشگاه ملت ایران به کتاب آسمانی خود، قرآن کریم، سوگند یاد می‌کنم که:

- در سراسر زندگی حرفه ای، در راه اعتلای کشور ایران و جامعه بشری به نحو احسن قدم برداشته و دراین راه از هیچ تلاشی دریغ ننمایم.
- در تمام فعالیت‌های تخصصی، رضای خدا را همراه با صداقت علمی و اجتماعی در نظر داشته و از موقعیت‌های به دست آمده در جهت رفع مشکلات جامعه استفاده کنم و در همه ی امور، منافع کشور را بر منافع فردی مقدم بدارم.
- همواره علم و دانش خود را به روز نگاه داشته و در ایفای مسئولیت و تعهدات حرفه‌ای در حد توان سعی و تلاش خود را به کار گیرم.
- و اینک از خداوند علیم توفیق بندگی و پای‌بندی به مفاد این سوگندنامه را خواستارم و از او می-خواهم که مرا در ایفای رسالت علمی و انسانی خویش موفق بدارد.

نام ونام خانوادگی دانشجو: احمد حیدری

امضاء

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق اعم از چاپ، تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه، اقتباس و ... از نتایج این پایان‌نامه برای دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره) قزوین محفوظ است. بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان نامه برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان نامه تا تاریخ..... ممنوع است.

استاد راهنما می‌تواند یکی از گزینه‌های بالا را انتخاب کند و مسئولین کتابخانه موظف به رعایت موارد تعیین شده می‌باشند.

نام استاد راهنما: دکتر عارف شاه منصوریان

تاریخ:

امضا:

چکیده

در این پایان‌نامه، با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و کنترل‌کننده‌ی PID مرتبه‌ی کسری، به کنترل سطح ولتاژ پیل‌های سوختی پرداخته شده است، در ادامه نیز روش کنترل سطح لغزشی و PID مرتبه‌ی کسری به منظور دستیابی به حداکثر توان به شرط تغییرات کم ولتاژ روی همین سیستم پیاده‌سازی شده است. از ترکیب کنترل‌کننده‌ی فازی، PID مرتبه‌ی کسری و ژنتیک نیز برای دستیابی به حداکثر توان استفاده شده و نتایج این دو مرحله با هم مقایسه شده‌اند. در این پروژه، جریان بار متغیر در نظر گرفته شده و با وجود این تغییرات کنترل انجام شده است. در بخش کنترل ولتاژ، روال کار به این ترتیب می‌باشد که با توجه به معیار خطای در نظر گرفته شده، الگوریتم ژنتیک سعی در بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده کرده تا خطا کمینه شود و در بخش حداکثر توان، با توجه به روابط و قوانین سطح لغزشی، سیگنال کنترلی لازم به دست می‌آید. با توجه به نتایج شبیه‌سازی موثر بودن این روش اثبات گردیده است. هم‌چنین خطا اختلاف بین ولتاژ خروجی و ولتاژ مرجع در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی، کنترل‌کننده‌ی PID مرتبه‌ی کسری، کنترل‌کننده‌ی مد لغزشی، کنترل‌کننده‌ی فازی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱:مقدمه **۱**

۱-۱- پیل‌های سوختی..... ۲

فصل ۲: مفاهیم اولیه **٤**

۲-۱- مقدمه..... ۵

۲-۲- مشتقات کسری و روش‌های تقریب آن‌ها..... ۵

۲-۲-۱- تعریف Grunwald-Letnikov..... ۵

۲-۲-۲- تعریف Riemann-Liouvill..... ۶

۲-۲-۳- تعریف Caputo..... ۶

۲-۳- منطق فازی و سیستم‌های استنتاج فازی..... ۷

۲-۴- الگوریتم ژنتیک..... ۱۰

فصل ۳: مدل‌سازی پیل سوختی **۱۱**

۳-۱- مقدمه..... ۱۲

۳-۲- مدل سازی Fuel Cell..... ۱۲

۳-۳- نمودار های V-I و P-I..... ۱۴

۳-۴- فضای حالت مبدل افزاینده‌ی ولتاژ (BOOST)..... ۱۵

فصل ٤: کنترل کننده‌ی PID مرتبه‌ی کسری و الگوریتم ژنتیک **۱۷**

۴-۱- مقدمه..... ۱۸

۴-۲- کنترل کننده PID مرتبه کسری و الگوریتم ژنتیک..... ۱۸

فصل ۵: کنترل‌کننده سطح لغزشی، فازی و PID مرتبه‌ی کسری **۲۲**

۵-۱- مقدمه..... ۲۳

۵-۲- کنترل‌کننده سطح لغزشی و PID مرتبه‌ی کسری..... ۲۳

۵-۲-۱- نتایج شبیه‌سازی..... ۲۴
۵-۳- کنترل کننده‌ی فازی و PID مرتبه‌ی کسری..... ۳۱
۵-۳-۱- نتایج شبیه‌سازی..... ۳۲

فصل٦: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات **٤٠**
۶-۱- نتیجه‌گیری..... ۴۱
۶-۲- پیشنهادات..... ۴۲

مراجع **٤٣**

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱): توابع عضویت مربوط به متغیر دما..... ۹
شکل (۳-۱): نمودارجریان-ولتاژ بر اثر تغییرات دما (V-I)..... ۱۴
شکل (۳-۲): نمودار جریان-توان بر اثر تغییرات دما (P-I)..... ۱۵
شکل (۳-۳): مدار پیل سوختی..... ۱۶
شکل (۴-۱): حلقه کنترل سطح ولتاژ پیل سوختی..... ۱۹
شکل (۴-۲): ولتاژ خروجی..... ۲۰
شکل (۴-۳): سیگنال خطا برای کنترل‌کننده‌ی PID مرتبه‌ی کسری..... ۲۰
شکل (۴-۴): سیگنال خطا برای کنترل‌کننده‌ی PID معمولی..... ۲۱
شکل (۵-۱): ولتاژ FC برحسب زمان..... ۲۵
شکل (۵-۲): جریان FC بر حسب زمان..... ۲۵
شکل (۵-۳): تغییرات توان بر حسب زمان..... ۲۶
شکل (۵-۴): تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب زمان..... ۲۶
شکل (۵-۵): تغییرات duty cycle و سطح لغزش بر حسب تغییرات زمان..... ۲۷
شکل (۵-۶): تغییرات توان بر حسب جریان FC..... ۲۷
شکل (۵-۷): تغییرات ولتاژ FC بر حسب زمان..... ۲۸
شکل (۵-۸): تغییرات جریان FC بر حسب زمان..... ۲۹
شکل (۵-۹): تغییرات توان بر حسب زمان..... ۲۹
شکل (۵-۱۰): تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب زمان..... ۳۰
شکل (۵-۱۱): تغییرات duty cycle و سطح لغزش بر حسب تغییرات زمان..... ۳۰
شکل (۵-۱۲): مسیر حرکت توان به سمت نقطه توان ماکزیمم..... ۳۱
شکل (۵-۱۳): توابع عضویت ورودی کنترل‌کننده‌ی فازی..... ۳۲
شکل (۵-۱۴): ولتاژ FC برحسب زمان..... ۳۳
شکل (۵-۱۵): جریان FC بر حسب زمان..... ۳۳

شکل (۵-۱۶): تغییرات توان برحسب زمان..... ۳۴
شکل (۵-۱۷): تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب زمان..... ۳۴
شکل (۵-۱۸): duty cycle برحسب زمان..... ۳۵
شکل (۵-۱۹): تغییرات توان بر حسب جریان FC..... ۳۵
شکل (۵-۲۰): تغییرات ولتاژ FC بر حسب زمان..... ۳۶
شکل (۵-۲۱): تغییرات جریان FC بر حسب زمان..... ۳۷
شکل (۵-۲۲): تغییرات توان بر حسب زمان..... ۳۷
شکل (۵-۲۳): تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب زمان..... ۳۸
شکل (۵-۲۴): تغییرات duty cycle بر حسب تغییرات زمان..... ۳۸
شکل (۵-۲۵): مسیر حرکت توان به سمت نقطه توان ماکزیمم..... ۳۹

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۴-۱): مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌ی معمولی و کسری..... ۲۱

جدول (۵-۱): قوانین فازی..... ۳۲

جدول (۵-۲): مقایسه نتایج کنترل‌کننده‌های فازی و مد لغزشی..... ۳۶

فصل اول

مقدمه

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیل‌های سوختی

امروزه با توجه به قیمت بالای سوخت‌های فسیلی و همچنین تولید آلودگی زیاد آن‌ها، نیاز به انرژی‌های جایگزین بیشتر احساس می‌شود. پیل سوختی[1] یکی از این منابع انرژی جایگزین است که با توجه به بازده بالا، توان تولیدی زیاد و آلودگی کم اهمیت فراوانی دارد [۱].

پیل سوختی یک مبدل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریسیته است. این تبدیل مستقیم بوده و بنابراین از بازدهی بالایی برخوردار است. در واقع می‌توان گفت که در این تبدیل از عمل عکس الکترولیز آب استفاده می‌گردد، یعنی از واکنش بین هیدروژن و اکسیژن، آب، حرارت و الکتریسیته تولید می‌گردد.

پیل‌های سوختی انواع مختلفی دارند اما پیل‌های سوختی غشای پروتونی[2] به دلیل دمای کار پایین و سرعت بالا بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند [۲].

با توجه به افزایش استفاده از پیل‌های سوختی نیاز به طراحی کنترل‌کننده‌های مناسب برای این پیل‌ها بسیار احساس می‌شود. از کارهای انجام شده در این زمینه، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

در [۳]، یک سیستم PEMFC شناسایی و کنترل‌کننده‌ی چند متغیره Robust که ولتاژ خروجی را با تغییر شار هوا و هیدروژن کنترل می‌کند، طراحی شده است. در [۴]، یک کنترل‌کننده‌ی فازی برای کنترل ولتاژ خروجی با تغییر فشار هوا و هیدروژن طراحی و شبیه‌سازی شده است. در [۵]، از یک کنترل‌کننده‌ی PID و یک شبکه عصبی مصنوعی جهت کنترل ولتاژ خروجی و بهبود عملکرد سیستم PEMFC تحت اثر تغییرات ناگهانی جریان استفاده شده است.

سیستم‌های کنترل مرتبه‌ی صحیح از قبیل PID مرتبه‌ی صحیح و مد لغزشی و .... به دلیل محدودیت در مرتبه‌ی عملگرهای مشتق و انتگرال دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به کنترل‌کننده‌های کسری مشابه خود می‌باشند.

[1] Fuel cell
[2] Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)

در بین روش‌های بهبود یافته‌ی کنترلی، به کارگیری محاسبات مرتبه‌ی کسری در الگوریتم کنترل و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز می‌توانند در افزایش کارایی سیستم کنترل نقش مهمی را ایفا نمایند، هدف ما نیز این است که با استفاده از این الگوریتم‌ها عملکرد سیستم کنترل را بهبود ببخشیم.

هدف این پایان‌نامه طراحی کنترل‌کننده‌ی PID برای کنترل ولتاژ پیل‌های سوختی است. کنترل‌کننده‌ی اعمالی، ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و کنترل‌کننده‌ی PID مرتبه‌ی کسری می‌باشد. لازم به ذکر است که با تحقیقات انجام گرفته، اطمینان حاصل شده که ترکیبی از این نوع کنترل‌کننده‌ها تا به حال به این منظور استفاده نشده است.

در فصل دوم، به معرفی روابطی پرداخته شده که در فصول آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند. معرفی مدل PEMFC در فصل سوم و طراحی کنترل‌کننده و نتایج شبیه‌سازی مربوط به کنترل سطح ولتاژ با PID کسری نیز در بخش چهارم آورده شده‌اند. در بخش پنجم به معرفی روش ترکیبی کنترل سطح لغزشی و PID مرتبه‌ی کسری و همچنین ترکیب PID مرتبه‌ی کسری و کنترل‌کننده‌ی فازی برای دستیابی به حداکثر توان با تغییرات کم ولتاژ پرداخته شده است. و نهایتاً فصل ششم یک جمع‌بندی از مطالب پایان‌نامه و پیشنهاداتی برای ادامه کار را ارائه می‌دهد.

فصل دوم

مفاهیم اولیه

فصل ۲- مفاهیم اولیه

۲-۱- مقدمه

در این فصل به طور مختصر به بیان برخی تعاریف و قضایای اولیه‌ای که در فصل‌های بعد با آن‌ها سروکار داریم، می‌پردازیم. تعاریف ارائه شده را می‌توان در کتاب‌های پایه‌ای نوشته شده در مبحث حسابان کسری با جزئیات بیشتری یافت.

۲-۲- مشتقات کسری و روش‌های تقریب آن‌ها

عملگر ${}_{\alpha}\mathrm{D}_{\mathrm{t}}^{\mathrm{q}}$ یک ترکیبی از عملگر انتگرال و مشتق است که در محاسبات مرتبه‌ی کسری به طور معمول استفاده می‌شود که انتگرال و مشتق مرتبه‌ی کسری را در یک عبارت واحد نمایش می‌دهد [۶] و تعریف آن:

$$ {}_{\alpha}D_t^q = \begin{cases} \frac{d^q}{dt^q} & q > 0 \\ 1 & q = 0 \\ \int_{\alpha}^{t} (d\tau)^{-q} & q < 0 \end{cases} \qquad (۱-۲) $$

همچنین چندین تعریف برای معادلات مرتبه‌ی کسری وجود دارد [۶-۸]. سه تعریف متداول از این معادلات ریمان-لیوویل[1]، گرانوالد-لتنیکو[2] و کاپوتو[3] می‌باشند.

۲-۲-۱- تعریف Grunwald-Letnikov

عملگر معادله دیفرانسیل مرتبه‌ی کسری Grunwald-Letnikov از مرتبه‌ی q [۶]:

[1] Riemann-Liouville (RL)
[2] Grunwald-Letnikov
[3] Caputo

$$ {}_{\alpha}D_t^q f(t) = \frac{d^q f(t)}{d(t-a)^q} = lim_{N\to\infty}\left[\frac{t-a}{N}\right]^{-q}\sum_{j=0}^{N-1}(-1)^j f\left(t - j\left[\frac{t-a}{N}\right]\right) \quad (۲-۲) $$

۲-۲-۲- تعریف Riemann-Liouvill

معمول‌ترین تعریف انتگرال مرتبه‌ی کسری، انتگرال کسری (Riemann-Liouville) RL نامیده می‌شود:

$$ D^{-q}x(t) = \frac{1}{\Gamma(q)}\int_{t_0}^{t}(t-\tau)^{q-1}x(\tau)d\tau \quad (۲-۳) $$

که Γ تابع گاما بوده و $q\epsilon R^+$ مرتبه‌ی انتگرال است. سپس از معادله‌ی بالا برای تعریف مشتق مرتبه‌ی کسری استفاده می‌کنیم. مشتق مرتبه‌ی کسری تابع $x(t)$ از مرتبه‌ی q برابر است با:

$$ D^q x(t) = \frac{d^m}{dt^m}\left[D^{-(m-q)}x(t)\right] = \frac{1}{\Gamma(m-q)}\frac{d^m}{dt^m}\int_{t_0}^{t}(t-\tau)^{m-q-1}x(\tau)d\tau \quad (۲-۴) $$

که m یک عدد صحیح است که در $m-1 < q < m$ صدق می‌کند. تبدیل لاپلاس مشتق- انتگرال مرتبه‌ی کسری معادله‌ی (۲-۳) و (۲-۴) تحت شرایط اولیه صفر برای مرتبه q برابر است با:

$$ L\{D^{\pm q}x(t)\} = S^{\pm q}X(s) \quad (۲-۵) $$

۲-۲-۳- تعریف Caputo

اگر $m \in N$، در نتیجه معادله دیفرانسیل کسری Caputo از تابع $f(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۶].

$$ {}_{\alpha}D_t^q = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(m-q)}\int_a^t (t-\tau)^{m-q-1}\frac{d^m f(\tau)}{d\tau^m}d\tau & m-1 < q < m \\ \frac{d^m u(x,t)}{dt^m} & q = m \in N \end{cases} \quad (۲-۶) $$