بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی دینامیکی و کنترل سیستم های نیروگاهی هیبرید

پیل سوختی اکسید جامد – توربین گاز

از

آرش جهانگیری

استاد راهنما

دکتر کاظم آتشکاری

شهریور ۱۳۹۰

دانشکده فنی

گروه مکانیک

گرایش تبدیل انرژی

مدلسازی دینامیکی و کنترل سیستم های نیروگاهی هیبرید

پیل سوختی اکسید جامد – توربین گاز

از

آرش جهانگیری

استاد راهنما

دکتر کاظم آتشکاری

استاد مشاور

دکتر علی جمالی

شهریور ۱۳۹۰

تقدیم به:

پدر بزرگوارم که همواره پشتیبانم بوده و به من آموخت که چگونه زندگی کنم. زبان در بیان زحمات او عاجز است.

و تقدیم به:

مهر سپهر وجودم، چراغ پرفروغ عمرم، به مادر مهربانم که هرتپش از قلبش برایم آهنگ زندگی می نوازد.

ما همچنان در اول وصف تو مانده ایم...

از استاد راهنمای بزرگوارم ، جناب آقای دکتر کاظم آتشکاری که درتمامی مراحل انجام این پایان نامه دلسوزانه و با سعه صدر یاری ام نمودند و راهنمایی هایشان راهگشایم بوده و همچنین در شکل گیری شخصیت علمی اینجانب نقش بسزایی داشته اند، کمال تشکر را دارم.

از استاد مشاور ارجمندم، جناب آقای دکتر علی جمالی به خاطر زحمات و راهنمایی های بی دریغشان، بینهایت سپاسگزارم.

چکیده

مدلسازی دینامیکی و کنترل سیستم های نیروگاهی هیبرید پیل سوختی اکسید جامد – توربین گاز

آرش جهانگیری

امروزه تحقیقات گسترده ای در زمینه سیستم های نیروگاهی ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد – توربین گاز در حال انجام است. این سیستم ها از دمای بالای پیل سوختی و یک توربین گاز برای دستیابی به عملکرد و کارآیی بیشتر استفاده می کنند. به خاطر دمای بالای گازهای خروجی از پیل سوختی، گرما می تواند بازیابی شود و برای راندن توربین گاز استفاده گردد. توربین قدرت اضافی تولید می کند و برای این کار از انرژی خروجی پیل سوختی استفاده می کند. به رغم انجام تحقیقات روی ترکیب این سیستم ها، بر روی دینامیک ترکیب این سیستم ها تحقیقات اندکی صورت گرفته است. در این پایان نامه ابتدا مدلسازی دینامیکی برای اجزای سیستم ترکیبی پیل سوختی - توربین گاز (پیل سوختی اکسید جامد، کمپرسور گریز از مرکز، محفظه احتراق و توربین) انجام می شود. سپس این مدل ها با هم ترکیب شده و یک مدل دینامیکی از کل نیروگاه بدست می آید. رفتار دینامیکی هر یک از اجزای سیستم هیبرید برحسب زمان ارائه می شود. سپس رفتار دینامیکی پیل سوختی اکسید جامد در اثر تغییر پارامترهای ورودی بررسی می شود. در نهایت یک کنترلر PID برای کنترل توان خروجی پیل سوختی اکسید جامد با استفاده از الگوریتم ژنتیک طراحی می شود.

کلید واژه ها: پیل سوختی اکسید جامد/ توربین گاز، مدلسازی دینامیکی، کنترل

فهرست مطالب

فهرست مطالب.....ث

فهرست جدول ها.....ذ

فهرست شکل ها.....ر

فهرست نمادها.....ص

چکیده فارسی.....ظ

چکیده انگلیسی.....ع

فصل اول : مقدمه

۱-۱- پیشگفتار.....۱

۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده.....۳

۱-۳- معرفی کار حاضر.....۴

فصل دوم : فناوری پیل های سوختی و توربین های گازی

۲-۱- تاریخچه پیل سوختی.....۶

۲-۲- معرفی پیل سوختی.....۸

۲-۳- اواع پیل سوختی.....۱۲

۲-۳-۱- پیل سوختی الکترولیت پلیمر یا غشاء مبادله کننده پروتون (PEM).....۱۲

۲-۳-۲- پیل سوختی قلیایی (AFC).....۱۴

۲-۳-۳- پیل سوختی اسیدفسفریک (PAFC)..... ۱۶

۲-۳-۴- پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)..... ۱۸

۲-۳-۵- پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)..... ۲۰

۲-۴- نحوه عملکرد پیل های سوختی اکسید جامد..... ۲۳

۲-۵- اجزای تشکیل دهنده پیل‌های سوختی اکسید جامد هادی یون اکسیژن ۲۴

۲-۵-۱- کاتد..... ۲۵

۲-۵-۱-۱- فلزات ۲۶

۲-۵-۱-۲- اکسیدها با شبکه جمع کننده جریان..... ۲۶

۲-۵-۱-۳- کاتد از جنس اکسیدهای هادی الکتریسیته..... ۲۷

۲-۵-۱-۴- اکسیدهایی با ترکیب هدایت الکتریکی و هدایت یونی..... ۲۷

۲-۵-۲- آند..... ۲۸

۲-۵-۳- الکترولیت..... ۲۹

۲-۵-۴- صفحات دوقطبی (اینترکانکت)..... ۳۰

۲-۶- شکل های مختلف پیل سوختی اکسید جامد..... ۳۱

۲-۶-۱- شکل تخت..... ۳۱

۲-۶-۲- شکل لوله ای..... ۳۲

۲-۶-۳- شکل لوله ای تخت با چگالی توان بالا..... ۳۴

۲-۷- مروری بر توربین های گاز..... ۳۵

۲-۸- سیستم ترکیبی توربین گاز و پیل سوختی.....۳۵

فصل سوم:مدلسازی اجزای سیستم ترکیبی

۳-۱- مدلسازی پیل سوختی اکسید جامد.....۳۸
۳-۱-۱- طرز عملکرد پیل سوختی اکسید جامد.....۳۸
۳-۱-۲- مدل دینامیکی پیل سوختی اکسید جامد.....۳۹
۳-۱-۳- شبیه سازی پیل سوختی با سیمولینک.....۴۳
۳-۲- مدلسازی کمپرسور.....۴۷
۳-۲-۱- کمپرسور گریز از مرکز.....۴۷
۳-۲-۲- مدل دینامیکی کمپرسور.....۴۸
۳-۲-۳- شبیه سازی مدل کمپرسور با سیمولینک.....۵۱
۳-۳- مدلسازی محفظه احتراق.....۵۶
۳-۴- مدلسازی توربین.....۵۹
۳-۴-۱- شبیه سازی مدل دینامیکی توربین با سیمولینک.....۶۱

فصل چهارم : الگوریتم ژنتیک

۴-۱- مقدمه.....۶۳
۴-۲- الگوریتم ژنتیک.....۶۴
۴-۳- الگوریتم های انتخاب.....۶۷
۴-۳-۱- انتخاب صورت قطعی.....۶۸
۴-۳-۲- انتخاب براساس تورنمنت.....۶۸

۴-۳-۳- انتخاب براساس مکانیزم چرخ گردان..... ۶۹
۴-۴- عملگرهای ژنتیکی..... ۷۰
۴-۴-۱- عملگر پیوند..... ۷۰
۴-۴-۲- عملگر جهش..... ۷۱
۴-۵- پیمایش برازندگی..... ۷۲

فصل پنجم: نتایج شبیه سازی دینامیکی نیروگاه پیل سوختی اکسید جامد – توربین گاز

۵-۱- ترکیب مدل دینامیکی اجزای سیستم پیل سوختی – توربین گاز..... ۷۴
۵-۲- نتایج مدل دینامیکی کمپرسور..... ۷۷
۵-۳- نتایج مدل دینامیکی نیروگاه برای پیل سوختی اکسید جامد ۷۹
۵-۴- نتایج مدل دینامیکی محفظه احتراق..... ۸۲
۵-۵-نتایج مدل دینامیکی توربین..... ۸۲
۵-۶- توان تولیدی کلی نیروگاه..... ۸۴

فصل ششم: بررسی رفتار دینامیکی پیل سوختی اکسید جامد و کنترل توان خروجی آن

۶-۱- پاسخ سیستم پیل سوختی به تغییر دبی ورودی هیدروژن..... ۸۶
۶-۲- پاسخ سیستم پیل سوختی به تغییر جریان..... ۸۹
۶-۳- کنترلر PID..... ۹۱
۶-۳-۱- عبارت تناسبی..... ۹۱
۶-۳-۲- عبارت انتگرالی..... ۹۲
۶-۳-۳- عبارت مشتقی..... ۹۳

۶-۳-۴- جمع بندی.....۹۴

۶-۴- کنترل توان تولیدی پیل سوختی اکسید جامد.....۹۵

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات برای ادامه کار

۷-۱- نتیجه گیری.....۹۸

۷-۲- پیشنهادات برای ادامه کار.....۹۹

منابع و مراجع.....۱۰۰

فهرست جدول ها

جدول ۳-۱- پارامترهای شبیه سازی پیل سوختی.....۴۳

جدول ۳-۲- پارامترهای شبیه سازی کمپرسور.....۵۲

جدول ۴-۱- پنج کروموزوم نمونه و برازندگی مربوط به آنها.....۶۹

جدول ۶-۱- پارامترهای شبیه سازی پاسخ سیستم پیل سوختی به تغییر دبی جرمی ورودی هیدروژن.....۸۹

جدول ۶-۲- مقدار ضرایب بهینه کنترلر PID برای کنترل توان پیل سوختی.....۹۵

فهرست شکل ها

شکل ۲-۱- نمای کلی یک پیل‌سوختی.....۸

شکل ۲-۲- عملکرد پیل سوختی PEM.....۱۴

شکل ۲-۳- عملکرد پیل سوختی قلیایی.....۱۶

شکل ۲-۴- پیل سوختی اسید فسفریک.....۱۸

شکل ۲-۵- عملکرد یک پیل سوختی کربنات مذاب.....۲۰

شکل ۲-۶- پیل سوختی اکسید جامد.....۲۳

شکل ۲-۷- پیل سوختی اکسید جامد از نوع تخت.....۳۱

شکل ۲-۸- پیل سوختی اکسید جامد لوله ای.....۳۲

شکل ۲-۹- یک دسته لوله که از سه ردیف ۸ تایی از پیل سوختی لوله ای تشکیل شده است.....۳۳

شکل ۲-۱۰- استک شامل ۱۱۵۲ سلول سوختی لوله‌ای.....۳۴

شکل ۲-۱۱- سیستم هیبریدی SOFC/GT با توان ۳۰۰ کیلووات شرکت زیمنس– وستینگ هوس ۳۶

شکل ۳-۱- پیل سوختی اکسید جامد.....۳۹

شکل ۳-۲- پارامترهای شبیه سازی پیل سوختی.....۴۴

شکل ۳-۳- مدل سیمولینک پیل سوختی.....۴۵

شکل ۳-۴- ولتاژ پیل سوختی بر حسب زمان.....۴۶

شکل ۳-۵- توان پیل سوختی برحسب زمان.....۴۶

شکل ۳-۶- اجزای کمپرسور گریز از مرکز..... ۴۷
شکل ۳-۷- سیستم کمپرسور..... ۴۸
شکل ۳-۸- مثلث سرعت در خروجی پره..... ۵۰
شکل ۳-۹- مدل سیمولینک زیرسیستم پلنوم (رابطه ۳-۱۸)..... ۵۲
شکل ۳-۱۰- مدل سیمولینک زیرسیستم کمپرسور و کانال (رابطه ۳ ۱۹)..... ۵۳
شکل ۳-۱۱- مدل سیمولینک زیرسیستم گشتاور گرداننده (رابطه ۳ ۲۰)..... ۵۳
شکل ۳-۱۲- مدل سیمولینک زیرسیستم جریان گلوگاه (رابطه ۳ ۳۱)..... ۵۴
شکل ۳-۱۳- مدل سیمولینک کلی کمپرسور..... ۵۵
شکل ۳-۱۴- سیکل توربین گاز..... ۵۶
شکل ۳-۱۵- مدل سیمولینک محفظه احتراق..... ۵۹
شکل ۳-۱۶- مدل سیمولینک توربین..... ۶۱
شکل ۳-۱۷- مدل سیمولینک زیرسیستم توربین..... ۶۲
شکل ۴-۱- نحوه عملکرد الگوریتم های تکاملی..... ۶۶
شکل ۴-۲- یک الگوریتم تکاملی ساده..... ۶۷
شکل ۴-۳- چرخ گردان متناظر با جدول ۴ ۱..... ۷۰
شکل ۴-۴- عملگر پیوند یک نقطه ای..... ۷۱
شکل ۴-۵- عملیات جهش بر روی یک کروموزوم..... ۷۲

شکل ۵-۱- نیروگاه پیل سوختی – توربین گاز.....۷۵

شکل ۵-۲- مدل سیمولینک نیروگاه پیل سوختی – توربین گاز.....۷۶

شکل ۵-۳- نمودار دبی جرمی کمپرسور بر حسب زمان.....۷۷

شکل ۵-۴- نمودار نسبت فشار کمپرسور بر حسب زمان.....۷۸

شکل ۵-۵- نمودار سرعت زاویه ای کمپرسور بر حسب زمان.....۷۸

شکل ۵-۶- نمودار میزان ولتاژ پیل سوختی در مدل ترکیبی بر حسب زمان.....۸۰

شکل ۵-۷- نمودار میزان ولتاژ تولیدی پیل سوختی بر حسب زمان در مرجع [۱۸].....۸۰

شکل ۵-۸- نمودار میزان توان تولیدی پیل سوختی در مدل ترکیبی بر حسب زمان.....۸۱

شکل ۵-۹- نمودار میزان توان تولیدی پیل سوختی بر حسب زمان در مرجع [۱۸].....۸۱

شکل ۵-۱۰- نمودار دمای خروجی از محفظه احتراق برحسب زمان.....۸۲

شکل ۵-۱۱- نمودار توان تولیدی توربین برحسب زمان.....۸۳

شکل ۵-۱۲- نمودار گشتاور تولیدی توربین بر حسب زمان.....۸۳

شکل ۵-۱۳- نمودار سرعت زاویه ای روتور توربین برحسب زمان.....۸۴

شکل ۵-۱۴- نمودار توان تولیدی نیروگاه پیل سوختی اکسید جامد – توربین گاز برحسب زمان پس از ۱۰ ثانیه.....۸۵

شکل ۵-۱۵- نمودار توان تولیدی نیروگاه پیل سوختی اکسید جامد – توربین گاز برحسب زمان پس از ۱۰۰۰ ثانیه.....۸۵

شکل ۶-۱- نمودار توان تولیدی پیل سوختی با تغییر پله ای دبی جرمی هیدروژن، حالت اول.....۸۸

شکل ۶-۲- نمودار توان تولیدی پیل سوختی با تغییر پله ای دبی جرمی هیدروژن، حالت دوم.....۸۸

شکل ۶-۳- نمودار تغییر توان پیل سوختی با تغییر دبی جرمی هیدروژن برحسب زمان.....۸۹

شکل ۶-۴- نمودار پاسخ توان پیل سوختی به تغییر جریان به صورت شیب بر حسب زمان.....۹۰

شکل ۶-۵- نمودار تغییر توان پیل سوختی با تغییر جریان بر حسب زمان.....۹۰

شکل ۶-۶- چگونگی تغییر در پاسخ به ازای مقادیر مختلف K_{p}.....۹۲

شکل ۶-۷- چگونگی تغییر در پاسخ به ازای مقادیر مختلف K_{i}.....۹۳

شکل ۶-۸- چگونگی تغییر در پاسخ به ازای مقادیر مختلف K_{d}.....۹۴

شکل ۶-۹- دیاگرام بلوکی یک کنترلر PID.....۹۵

شکل ۶-۱۰- توان کنترل شده پیل سوختی اکسید جامد برحسب زمان (نقطه تنظیم : ۲۰۰ کیلووات).....۹۶

شکل ۶-۱۱- توان کنترل شده پیل سوختی اکسید جامد برحسب زمان (نقطه تنظیم : ۲۵۰ کیلووات) ۹۷

شکل ۶-۱۲- توان کنترل شده پیل سوختی اکسید جامد برحسب زمان (نقطه تنظیم : ۳۰۰ کیلووات).....۹۷

فهرست نمادها

علامت های لاتین

d_{duct}	قطر کانال کمپرسور
A	مساحت کانال کمپرسور
L	طول کانال کمپرسور
J	ممان اینرسی پره کمپرسور
A_2	سطح باز شدن اریفیس
A_{t}	سطح باز بودن گلوگاه کمپرسور
K_{t}	درصد سطح باز بودن گلوگاه
C	ضریب جریان در کمپرسور
r_1	شعاع مکنده
r_2	شعاع خروجی پره
μ	ضریب جریان در گلوگاه
C_{θ_1}	سرعت مماسی گاز در مکنده
C_{θ_2}	سرعت مماسی گاز در خروجی پره
P_{01}	فشار محیط
P_{P}	فشار پلنوم
$\dot{m}_{\mathrm{t}}$	دبی جرمی از میان گلوگاه
v	سرعت
p	فشار
z	ارتفاع
V_P	حجم پلنوم
a_s	سرعت صوت
Y_{fuel}	نسبت جرمی سوخت
Y_{oxid}	نسبت جرمی اکسید کننده

Y_{prod}	نسبت جرمی تولیدات احتراق
m_{fuel}	جرم سوخت
m_{oxid}	جرم اکسید کننده
m_{prod}	جرم تولیدات
V	حجم محفظه احتراق
$\dot{m}_{in}$	دبی جرمی ورودی
$\dot{m}_{out}$	دبی جرمی خروجی
e	انرژی داخلی مخصوص
h	انتالپی ویژه
C_{p}	ظرفیت گرمایی ویژه
h_f	انتالپی تشکیل
T	دما
P_{turb}	توان تولیدی توسط توربین
P_{out}	توان خالص خروجی از سیکل توربین گاز
$\dot{m}_{\mathrm{fc}}$	دبی جرمی جریان در پیل سوختی
K	ضریب دریچه
P_u	فشار بالادست (داخل کانال های الکترود)
M	جرم مولی سیال
$q_{\mathrm{H_2}}$	دبی مولی هیدروژن
q_{H_2O}	دبی مولی آب
$p_{\mathrm{H_2}}$	فشار نسبی هیدروژن
p_{H_2O}	فشار نسبی آب
K_{an}	ثابت دریچه برای آند
$n_{\mathrm{H_2}}$	تعداد مول های هیدروژن داخل کانال

U_{f}	ضریب استفاده
N_O	تعداد پیل ها در یک سری
F	ثابت فارادی
I	جریان در پیل سوختی
K_r	ثابت مدلسازی
V	ولتاژ خروجی از پیل سوختی
E_O	ولتاژ اولیه پیل سوختی
r	تلفات اهمی
ΔV_{act}	تلفات فعالسازی پیل سوختی
A	شیب خط تافل
i	چگالی جریان
ΔV_{trans}	تلفات ناشی از انتقال جرم در پیل سوختی
m	ثابت آزمایشگاهی برای تلفات انتقال جرم
n	ثابت آزمایشگاهی برای تلفات انتقال جرم

علامت های یونانی

ρ	چگالی
Ψ_{c}	نسبت فشار کمپرسور
η_{T}	بازده ایزنتروپیک توربین
τ_t	گشتاور کلی تولیدی توسط توربین
τ_c	گشتاور کمپرسور
τ_{net}	گشتاور در دسترس برای گرداندن ژنراتور
τ_{H_2}	زمانی که قطب سیستم با جریان هیدروژن تماس دارد

Abstract

Dynamic modeling and control of solid oxide fuel cell – gas turbine hybrid power plant systems

Arash Jahangiri

There is extensive research taking place involving fuel cell – gas turbine combined power plant systems. These systems use a high temperature fuel cell and a gas turbine to achieve higher overall performance and efficiency than a single mode power plant. Due to the high temperature of the exhaust gasses of the fuel cell, heat can be recuperated and used to drive a gas turbine. The turbine creates additional power and is a means of utilizing the exhaust energy of the fuel cell. Despite the research being done on integrating these systems, little work has been done to characterize the dynamics of the integrated systems. This thesis develops dynamic models of the individual components that comprise a fuel cell – gas turbine hybrid system (solid oxide fuel cell,centrifugal compressor, combustor and turbine). These models are incorporated to produce a complete dynamic hybrid model of the power plant. Dynamic manner of each component of hybrid system is presented with respect to time. Then the effect of changing input variables of the solid oxide fuel cell on dynamic manner of it, is investigated. Finally a PID controller is designed using genetic algorithm to control the output power of the solid oxide fuel cell.

Key words:SOFC/GT, Dynamic modeling, Control