دانشگاه صنعتی شیراز

سیستم‌های تولید توان پیل سوختی: مدل سازی دینامیکی، بررسی تولید توان و کنترل توان پیل‌های سوختی در سیستم‌های هیبریدی

بوسیله‌ی محمد حسین‌تبار

استاد راهنما:

دکتر مجید نیری پور

استاد مشاور:

دکتر طاهر نیکنام

به نام خدا

سیستم‌های تولید توان پیل سوختی: مدل سازی دینامیکی، بررسی تولید توان و کنترل توان پیل‌های سوختی در سیستم‌های هیبریدی

به وسیله ی:

محمد حسین‌تبار

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته

مهندسی برق- قدرت

از دانشگاه صنعتی شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان‌نامه با درجه:

دکتر	استادیار	(رئیس کمیته)
دکتر	استادیار	
دکتر	دانشیار	
دکتر	استادیار	
دکتر	استادیار	

تقدیم به

پدر بزرگوارم

مادر عزیزم

و خواهران دوست داشتنی و برادر عزیزم

که هیچ کدام از موفقیت‌های زندگی‌ام بدون حمایت، تشویق و عشق بی‌پایان‌شان ممکن نبود

سپاسگزاری

اکنون که این رساله به پایان رسیده است بر خود فرض می‌دانم که از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر نیری‌پور و دکتر نیکنام تشکر نمایم. که در همه حال با راهنمایی‌هایشان حامی من بودند.

چکیده:

عنوان پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

به وسیله‌ی:

محمد حسین‌تبار

تکنولوژی تولیدات پراکنده[1] همانند پیل‌سوختی[2]، انرژی‌خورشیدی[3]، توربین بادی[4]، توربین گازی، توربین احتراقی و موتورهای دیزلی در آینده نزدیک نقش بسیار مهمی را در زندگی ما ایفا خواهند نمود. در بین سیستم‌های تجدیدپذیر، نیروگاه‌های بادی و پیل های سوختی به شدت مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، این منابع انرژی های نو زمانی که به صورت منابع انرژی مجزا استفاده می شوند، دارای نقاط ضعف هایی می باشند. یکی از مهمترین موضوعاتی که طراحان و استفاده کنندگان از انرژی های باد با آن روبرو هستند این است که این سیستم ها به شدت به وضعیت آب و هوایی بستگی وابسته اند که باعث غیرقابل پیش بینی بودن توان آن ها می گردد. برای غلبه بر این مشکل منابع تولید توان بادی را می توان با دیگر منابع تولید توان جایگزین، ترکیب نمود. پیل های سوختی منابع تولید توان استاتیکی می باشند که از هیدروژن و اکسیژن برای تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی استفاده می کنند. از آنجایی که مهمترین نقطه ضعف پیل های سوختی دینامیک آهسته آن ها می باشد. بنابراین برای بهبود حالت گذرای سیستم هیبریدی، کاهش هزینه و حجم، حضور اجزای ذخیره کننده انرژی همچون باتری ها و خازن های بسیار بزرگ[5] برای سیستم های هیبریدی ضروری خواهد بود. در این پایان نامه در ابتدا یک روش کنترلی جدید بر اساس عملکرد پیل های سوختی در نقطه کار بهینه مطرح می شود. سپس در ادامه یک روش جدید برای مدیریت توان سیستم های هیبریدی پیل سوختی/ بادی/ بانک باتری به همراه الکترولایزر و تانک ذخیره هیدروژن ارائه می گردد و در انتها یک روش کنترلی جدید برای کنترل فرکانس سیستم های هیبریدی بر اساس هماهنگی بین پیل های سوختی و خازن های بسیار بزرگ بیان می گردد.

کلید واژه: مدیریت توان، پیل سوختی، سیستم های هیبریدی تولید توان، توربین بادی، خازن های بزرگ

[1] Distributed generation
[2] Fuel cell
[3] Photovoltaic
[4] Wind turbine
[5] Ultra Capacitor

فهرست مطالب

عنوان

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- ضرورت احتیاج به تحقیق ۴

۱-۳- هدف از این پژوهش ۴

۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۶

فصل دوم: مروری بر تولیدات پراکنده

۲-۱- مقدمه‌ای بر تولیدات پراکنده ۸

۲-۲- میکروتوربین‌ها ۹

۲-۳- پیل‌های سوختی ۱۰

۲-۴- توربین بادی ۱۱

۲-۴-۱- معادلات پایه مربوط به انرژی باد ۱۲

۲-۴-۲- ژنراتور القایی ۱۵

۲-۴-۲-۱- ساختمان و چگونگی عملکرد ژنراتور القایی ۱۶

۲-۴-۲-۲- مدار معادل ژنراتور القایی ۱۶

۲-۴-۲-۳- مشخصه گشتاور- لغزش ۱۸

۲-۵- سلول‌های خورشیدی ۲۰

۲-۶- ابزار های ذخیره کننده انرژی ۲۱

فصل سوم: پیل سوختی

۳-۱- مقدمه ۲۴

۳-۲- اساس عملکرد پیل‌های سوختی ۲۴

۳-۲-۱- پیل‌های سوختی با هسته غشایی..... ۲۵

۳-۲-۲- پیل‌های سوختی با اکسید جامد..... ۲۶

۳-۳- اصول اساسی و طراحی و مدل سازی دینامیکی پیل های سوختی هسته غشایی..... ۲۷

فصل چهارم: مبدل‌های الکترونیک قدرت و نحوه کنترل آن ها

۴-۱- مقدمه..... ۳۳

۴-۲- مهمترین ساختارهای مبدل DC-DC..... ۳۴

۴-۲-۱- مبدل های DC/DC افزاینده..... ۳۴

۴-۲-۲- مبدل های DC/DC کاهنده- افزاینده..... ۳۵

۴-۳- پیکربندی اینورتر منبع ولتاژ سه فاز..... ۳۶

۴-۳-۱- بررسی روش های مدولاسیون پهنای پالس اینورتر..... ۳۷

۴-۳-۱-۱- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی..... ۳۷

۴-۳-۱-۲- کنترل مدولاسیون پهنای پالس هیسترزیس..... ۳۸

فصل پنجم: استراتژی جدید برای مدل سازی و کنترل پیل‌های سوختی اکسید جامد بوسیله خازن‌های بزرگ به منظور افزایش کارایی دینامیکی

۵-۱- مقدمه..... ۴۱

۵-۲- کنترل هیدروژن وارد شده به پیل سوختی..... ۴۱

۵-۳- استراتژی کنترلی مدیریت توان..... ۴۴

۵-۴- مدل سازی خازن‌های بزرگ..... ۴۶

۵-۵- وضعیت واحد قدرت..... ۴۸

۵-۶- نتایج و شبیه‌سازی..... ۵۰

۵-۶-۱- مورد مطالعاتی اول: بدون مبدل دو جهته..... ۵۰

۵-۶-۲- مورد مطالعاتی دوم: با مبدل دو جهته..... ۵۲

۵-۷- نتیجه گیری.....۵۵

فصل ششم: مدیریت توان، مدل سازی دینامیکی و کنترل سیستم تولید توان هیبریدی بادی/ پیل سوختی و بانک باتری برای سیستم‌های مجزا ازشبکه

۶-۱- مقدمه.....۵۷

۶-۲- نوآوری سیستم پیشنهادی.....۵۷

۶-۳- توصیف سیستم مورد بررسی.....۵۸

۶-۳-۱-اجزای سیستم تبدیل انرژی الکتریکی و عملکرد آن.....۶۰

۶-۳-۲- مدل دینامیکی بانک باتری.....۶۵

۶-۳-۳- مدل دینامیکی الکترولایزر و تانک هیدروژن.....۶۶

۶-۴- مدیریت انرژی و استرتژی کنترلی.....۶۷

۶-۵- نتایج شبیه‌سازی.....۶۹

۶-۵-۱- بخش اول.....۶۹

۶-۵-۲- بخش دوم.....۷۶

۶-۶- نتیجه گیری.....۷۹

فصل هفتم:کنترل انحراف فرکانسی بوسیله هماهنگی بین کنترل پیل سوختی و خازن‌های بسیار بزرگ در سیستم‌های هیبریدی تولید توان انرژی‌های تجدیدپذیر

۷-۱- مقدمه.....۸۱

۷-۲- ساختار و توصیف سیستم مورد مطالعه.....۸۲

۷-۲-۱- مدل تولید توان باد.....۸۳

۷-۲-۲- مدل تولید توان توسط فتوولتاییک.....۸۳

۷-۲-۳- سیستم تولید توان پیل‌سوختی.....۸۴

۷-۲-۴- مدل خازن‌های بزرگ.....۸۴

۷-۲-۵- تغییرات فرکانس و انحراف توان.....۸۴

۷-۳-مدل سازی و روش کنترلی.....۸۵

۷-۴- نتایج و شبیه‌سازی.....۸۷

۷-۵- نتیجه‌گیری.....۹۰

فصل هشتم: نتیجه گیری و ارائه راهکار برای پژوهش های آینده

۸-۱- نتیجه گیری کلی.....۹۲

۸-۲- راهکارهای پیشنهادی برای ادامه کار در آینده.....۹۲

فهرست جدول‌ها

عنوان و شماره:

جدول ۳-۱: مروری بر مدل‌های پیل سوختی اکسید جامد در ده سال گذشته..... ۳۰

جدول ۶-۱: پارامترهای استفاده شده در توربین بادی..... ۶۳

جدول ۶-۲: پارامترهای مورد استفاده در ژنراتور القایی..... ۶۴

جدول ۶-۳: پارامترهای مورد استفاده در الکترولایزر و سیستم ذخیره هیدروژن..... ۶۶

جدول ۸-۱:پارامترهای سیستم هیبریدی مورد مطالعه..... ۸۶

فهرست شکل‌ها

عنوان:

شکل ۲-۱: یک نیروگاه مرکزی بزرگ و سیستم‌های تولیدات پراکنده..... ۸

شکل ۲-۲: شمای کلی یک توربین بادی کوچک..... ۱۲

شکل ۲-۳: نحوه وابستگی ضریب عملکرد بهλ وθ..... ۱۴

شکل ۲-۴: منحنی توان – سرعت..... ۱۵

شکل ۲-۵: مدار معادل ژنراتور القایی..... ۱۷

شکل ۲-۶: جهت اعمال قضیه تونن مدار معادل ژنراتور القایی..... ۱۸

شکل ۲-۷: مدار معادل ژنراتور القایی..... ۱۸

شکل ۲-۸: مشخصه گشتاور سرعت ماشـین القایی..... ۱۹

شکل ۲-۹: شمای کلی سیستم خورشیدی..... ۲۰

شکل۳-۱: شمای کلی ساختار پیل‌های سوختی هسته غشایی..... ۲۶

شکل۳-۲: شمای کلی ساختار پیل‌های سوختی اکسید جامد..... ۲۷

شکل ۳-۳: مدل دینامیکی پیل سوختی..... ۲۹

شکل۴-۱: شمای ساده پیل سوختی در اتصال به بار..... ۳۳

شکل ۴-۲: مدار مبدل افزاینده..... ۳۴

شکل۴-۳: مدار مبدل افزاینده در حالت روشن شدن کلید..... ۳۵

شکل۴-۴: مدار مبدل افزاینده در حالت خاموش شدن کلید..... ۳۵

شکل۴-۵: مدار مبدل کاهنده - افزاینده..... ۳۶

شکل ۴-۶: پیکربندی کلی یک اینورتر منبع ولتاژ سه فاز..... ۳۶

شکل ۴-۷: مدولاسیون پهنای پالس سینوسی..... ۳۷

شکل ۴-۸: شماتیک مدولاسیون پهنای پالس سینوسی.....۳۸

شکل ۴-۹: کنترل مدولاسیون پهنای پالس هیسترزیس.....۳۹

شکل ۴-۱۰: کنترل جریان هیسترزیس.....۴۲

شکل ۵-۱: استراتژی کنترلی پیل‌های سوختی و کنترل کننده های مورد استفاده.....۴۳

شکل ۵-۲: تغییرات توان مرجع سیستم مورد نظر.....۴۳

شکل ۵-۳: توان خروجی پیل‌های سوختی اکسید جامد.....۴۳

شکل ۵-۴: رفتار دینامیکی ضریب مصرف.....۴۴

شکل ۵-۵: بلوک دیاگرام پیل سوختی/ خازن های بزرگ در طول مدت شروع به کار سرد، پله بار مثبت و منفی.....۴۵

شکل۵-۶: مدار معادل خازن‌های بزرگ.....۴۶

شکل۵-۷: نحوه اتصال پیل سوختی اکسید جامد و خازن های بزرگ به همراه اجزای الکترونیک قدرت آن ها در دو ساختار متفاوت در سیستم تولید پراکنده (**الف**) بدون مبدل دو جهته و (**ب**) با مبدل دو جهته.....۴۸

شکل۵-۸: بلوک سیستم کنترل: کنترل کننده اینورتر ب) مبدل تقویت کننده ج) مبدل با کنترل کننده هیسترزیس د) مبدل دوجهته ۴۹

شکل ۵-۹: توان خروجی اکتیو و توان اکتیو بار مرجع.....۵۰

شکل ۵-۱۰: توان خروجی راکتیو و توان راکتیو بار مرجع.....۵۱

شکل ۵-۱۱: تغییرات ولتاژ بار (V_d, V_q).....۵۱

شکل ۵-۱۲: توان اکتیو تحویل داده شده توسط پیل‌های سوختی اکسید جامد و توان خروجی خازن‌های بزرگ.....۵۱

شکل ۵-۱۳: تغییرات ولتاژ پایانه خازن‌های بزرگ.....۵۲

شکل ۵-۱۴: توان خروجی اکتیو و توان اکتیو بار مرجع..... ۵۳

شکل ۵-۱۵: توان خروجی راکتیو و توان راکتیو بار مرجع..... ۵۳

شکل ۵-۱۶: تغییرات ولتاژ بار (V_d , V_q)..... ۵۴

شکل ۵-۱۷: توان اکتیو تحویل داده شده توسط پیل‌های سوختی اکسید جامد و توان خروجی خازن‌های بزرگ..... ۵۴

شکل ۵-۱۸: تغییرات ولتاژ پایانه خازن‌های بزرگ..... ۵۵

شکل ۶-۱: ساختار کلی سیستم..... ۵۹

شکل ۶-۲: کنترل کننده اصلی سیستم تولید توان هیبریدی..... ۶۰

شکل ۶-۳: گشتاور نرمالیزه شده آیرودینامیکی به جهت تغییرات ناگهانی باد، سایه برج و هیبریدی از این دو در شکل نشان داده شده است..... ۶۴

شکل ۶-۴: مشخصه توربین بادی..... ۶۸

شکل ۶-۵: الگوریتم کلی که در کنترل کننده های اصلی بکار گرفته شده است..... ۶۸

شکل ۶-۶: مجموع بار مورد تقاضا..... ۷۰

شکل ۶-۷: سرعت باد..... ۷۰

شکل۶-۸: توان خروجی توربین بادی تحویل داده شده به باس مشترک..... ۷۱

شکل ۶-۹: مقدار هیدروژن تولید شده..... ۷۱

شکل ۶-۱۰: ولتاژ الکترولایزر..... ۷۲

شکل ۶-۱۱: مقدار توان مصرف شده توسط الکترولایزر..... ۷۲

شکل ۶-۱۲: توان تولید شده توسط پیل‌های سوختی..... ۷۳

شکل ۶-۱۳: مقدار هیدروژن مصرف شده برحسب مول بر ثانیه..... ۷۳

شکل ۶-۱۴: فشار تانک ذخیره هیدروژن..... ۷۴

شکل ۶-۱۵: توان شارژ و دشارژ باتری در سیستم هیبریدی..... ۷۴

شکل ۶-۱۶: میزان SoC باتری..... ۷۵

شکل ۶-۱۷: توان تحویل داده شده به بار توسط سیستم هیبریدی..... ۷۵

شکل ۶-۱۸: مجموع بار مورد تقاضا..... ۷۶

شکل ۶-۱۹: سرعت باد برای شبیه‌سازی سیستم هیبریدی (حالت دوم)..... ۷۶

شکل ۶-۲۰: توان باد و (توان پیل سوختی + توان باتری) و توان بار در سیستم هیبریدی مطرح شده (حالت دوم)..... ۷۷

شکل ۶-۲۱: توان شارژ و دشارژ باتری..... ۷۷

شکل ۶-۲۲: توان تولید شده بوسیله پیل سوختی (حالت دوم)..... ۷۸

شکل ۶-۲۳: توان بار و توان تحویل داده شده به بار بوسیله سیستم تولید توان هیبریدی (حالت دوم) ۷۸

شکل ۶-۲۴: ولتاژ باس DC سیستم هیبریدی مطرح شده (حالت دوم)..... ۷۹

شکل ۷-۱: شمای کلی ساختار سیستم..... ۸۳

شکل ۷-۲: بلوک دیاگرام سیستم مطرح شده..... ۸۶

شکل ۷-۳: داده‌های واقعی باد برای استفاده در شبیه‌سازی..... ۸۷

شکل ۷-۴: داده‌های واقعی تابش خورشید برای استفاده در شبیه‌سازی سیستم مطرح شده..... ۸۸

شکل ۷-۵: توان تولید شده توسط توربین بادی که برای کل روز که ۲۴۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است..... ۸۸

شکل ۷-۶: توان تولید شده توسط سیستم فتوولتاییک برای کل روز که برای ۲۴۰۰ ثانیه شبیه‌سازی گردیده است..... ۸۹

شکل ۷-۷: توان بار مورد تقاضا..... ۸۹

شکل ۷-۸: توان خروجی باتری..... ۸۹

شکل ۷-۹: توان تولید شده توسط پیل سوختی..... ۹۰

شکل ۷-۱۰: تغییرات فرکانسی..... ۹۰

فهرست نشانه‌های اختصاری

A	سطح جاروب شده توسط توربین بادی$[m^2]$
c_p	ضریب عملکرد توربین
P_m	توان مکانیکی خروجی توربین[W]
β	زاویه گام پره توربین[°]
λ	غلظت هوا $[\mathrm{kg}(m^3)^{-1}]$
ρ	نسبت سرعت نوک پره های رتور به سرعت باد
v	سرعت باد (میانگین) $[\mathrm{m}\ s^{-1}]$
$v_{eq_{ws}}$	اثر تغییرات سمتی باد (Wind Shear)
$v_{eq_{ts}}$	اثر سایه برج (Tower Shadow)
V_H	ارتفاع مرکز فعالیت (Hub Height) سرعت باد
R	فاصله شعایی از ارتفاع مرجع باد تا نوک پره ها
F	ثابت فارادی $[\mathrm{C\ kmol^{-1}}]$
i_e	جریان الکترولایزر [A]
n_c	تعداد سلول های الکترولایزر قرار گرفته به صورت سری
η_F	بازده فارادی
n_{H_2}	هیدروژن تولید شده $[\mathrm{kmol\ s^{-1}}]$
M_{H_2}	جرم مولار هیدروژن $[\mathrm{kg\ kmol^{-1}}]$
N_{H_2}	مقدار هیدروژن تحویل داده شده به تانک ذخیره هیدروژن بر حسب کیلو مول بر ثانیه$[\mathrm{kmole}\ s^{-1}]$
P_b	فشار تانک ذخیره هیدروژن [Pa]
P_{bi}	فشار اولیه تانک ذخیره هیدروژن [Pa]

ثابت جهانی گازها$[J\ (kmol°K)^{-1}]$	R
دمای عملکرد [°K]	T_b
حجم تانک ذخیره هیدروژن $[m^3]$	V_b
ضریب تراکم پذیری به صورت تابعی از فشار	z
پتانسیل استاندارد گازها	E_0
جریان پیل سوختی	I_{fc}
ثابت دریچه آند	K_{an}
ثابت مولار دریچه برای هیدروژن	K_{H_2}
ثابت مولار دریچه برای آب	K_{H_2O}
ثابت مولار دریچه برای اکسیژن	K_{O_2}
ثابت $(N_0/4F=)$	K_r
جرم مولکولی هیدروژن	M_{H_2}
مقدار هیدروژن بر حسب مول در کانال آند	n_{H_2}
تعداد سلول های موجود در پیل سوختی به صورت سری	N_0
فشار جزیی	p_i
مقدار سوخت ورودی	$q_{H_2}^{in}$
مقدار سوخت خروجی	$q_{H_2}^{o}$
مقدار سوخت واکنش یافته	$q_{H_2}^{r}$
تلفات اهمی	r
نسبت هیدروژن به اکسیژن	$R_{H\text{-}O}$
دمای مطلق	T
ضریب مصرف پیل سوختی	U
حجم آند	V_{an}

ولتاژ پیل سوختی	V_{fc}
پاسخ زمانی برای جاری شدن هیدروژن	τ_{H_2}
پاسخ زمانی برای جاری شدن آب	τ_{H_2O}
پاسخ زمانی برای جاری شدن اکسیژن	τ_{O_2}

فصل اول

مقدمه