Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

شماره پایان نامه : ۹۵۴۱۳۰۹

پایان نامه دکتری برق

گرایش قدرت

عنوان:

کنترل نیروگاه بادی DFIG در شرایط افت ولتاژ نامتقارن در شبکه

استاد راهنما :

دکتر رضا کیانی نژاد

نگارنده :

عبدالمجید حسنی

بهمن ماه سال ۱۳۹۵

www.SID.ir

Archive of SID

باسمه تعالی

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

(نتیجه ارزشیابی پایان نامه دکتری)

پایان نامه آقای عبدالمجیدحسنی دانشجوی رشته برق گرایش قدرت

دانشکده مهندسی به شماره دانشجویی ۸۹۴۱۳۰۲

با عنوان :

کنترل نیروگاه بادی DFIG در شرایط افت ولتاژ نامتقارن در شبکه

جهت اخذ مدرک دکتری در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۲۰ توسط هیأت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه خوب تصویب گردید.

۱.	اعضا ی هیأت داوران :	رتبه علمی	امضاء
	استاد راهنما : دکتر رضا کیانی‌نژاد	دانشیار	.....
	استاد داور : دکتر سیدقدرت‌الله سیف‌السادات	استاد	.....
	استاد داور : دکتر سیدسعیدالله مرتضوی	دانشیار	.....
	استاد داور : دکتر محسن صنیعی	دانشیار	.....
	استاد داور : دکتر مهدی بانژاد	دانشیار	
	نماینده تحصیلات تکمیلی : دکتر سیدمحسن صدرالسادات	دانشیار	.....
۲.	مدیرگروه : دکتر محسن صنیعی	دانشیار	.....
۳.	معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : دکتر اسماعیل حجاری	استادیار	.....
۴.	مدیرتحصیلات تکمیلی دانشگاه : دکتر علی حقیقی	دانشیار	.....

www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID

فهرست مطالب

فصل اول:	**مقدمه**	۱
۱-۱	ضرورت تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد و رشد آن در جهان	۱
۱-۲	ساختمان ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، مدل دینامیکی آن و روش‌های کنترل ژنراتور القایی از دو سو تغذیه	۳
۱-۳	بیان مساله	۷
۱-۴	نوآوری، اهداف و ساختار رساله	۱۲
فصل دوم:	**مرور پژوهش‌های پیشین**	۱۴
۲-۱	روش اکتیو: روش‌های کنترل نرم افزاری	۱۵
	الف) مروری بر کنترل برداری	۱۹
	ب) مروری بر کنترل مستقیم گشتاور و توان	۲۴
	ج) مروری بر کنترل بدون سنسور	۲۵
۲-۲	روش پسیو: روش‌های کنترل سخت افزاری(مقاومت ترمزی)	۳۱
فصل سوم:	**مدل ژنراتور القایی از دو سو تغذیه و کنترل برداری آن در شرایط متعادل**	۳۴
۳-۱	مدل قسمت مکانیکی	۳۵
۳-۲	مدل قسمت الکتریکی	۳۹
۳-۳	معادله حالت ژنراتور القایی از دو سو تغذیه متصل به شبکه با ولتاژ متعادل	۴۱
۳-۴	سیستم کنترل در شرایط متعادل	۴۳

www.SID.ir

Archive of SID

فصل چهارم کنترل برداری ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در حالت بدون سنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل ۴۶

۴-۱ تخمین سرعت و موقعیت روتور ژنراتور القایی از دو سو تغذیه با روش رویتگر مدل مرجع-تطبیقی بر پایه جریان روتور ۴۶

۴-۱-۱ روش بدون سنسور حلقه باز ۴۷

۴-۱-۲ روش بدون سنسور "مدل مرجع-تطبیقی" ۴۸

۴-۱-۳ روش PLL و دیگر روش‌های بدون سنسور ۵۲

۴-۱-۴ تشریح "روبتگر مدل مرجع-تطبیقی بر پایه جریان روتور" ۵۴

۴-۲ معادلات حالت ژنراتور القایی از دو سو تغذیه متصل به شبکه با ولتاژ نامتعادل ۵۶

۴-۳ کنترل بدون سنسور سرعت ژنراتور القایی از دو سو تغذیه ۶۰

۴-۳-۱ کنترل بدون سنسور سرعت ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در شرایط متعادل ۶۰

۴-۳-۲ کنترل بدون سنسور سرعت ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در شرایط نامتعادل ۶۱

فصل پنجم: شبیه‌سازی روش پیشنهادی و تحلیل نتایج ۶۵

۵-۱ شبیه‌سازی در شرایط حالت نرمال (ولتاژ متعادل بدون افت ولتاژ) ۶۷

۵-۲ شبیه‌سازی در شرایط افت ولتاژ متعادل ۷۲

۵-۳ شبیه‌سازی در شرایط افت ولتاژ نامتعادل ۸۰

۵-۳-۱ کنترل برداری باسنسور ۸۰

www.SID.ir

Archive of SID

۵-۳-۲	کنترل برداری بدون سنسور با "رویتگر مرجع-تطبیقی بر پایه جریان روتور"	۸۵
۵-۴	شبیه‌سازی در شرایط افت ولتاژ نامتعادل همراه با تغییر سرعت باد	۹۲
فصل ششم:	**نتیجه‌گیری و پیشنهادات**	۹۷
	مراجع	۱۰۰
	ضمیمه الف	۱۰۸
	ضمیمه ب	۱۱۸
	چکیده انگلیسی	۱۲۰

www.SID.ir

Archive of SID

فهرست شکل‌ها و نمودارها

شکل ۱-۱	رشد ظرفیت نیروگاه بادی درجهان	۲
شکل ۱-۲	ژنراتور القایی از دو سو تغذیه متصل به شبکه	۳
شکل ۱-۳	مدار معادل ژنراتور القایی از دو سو تغذیه	۶
شکل۱-۴	اجزای اصلی توربین بادی	۷
شکل ۱-۵	کل مجموعه کنترلی یک سیستم انرژی بادی با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه	۸
شکل ۱-۶	نواحی چهارگانه‌ی عملکرد توربین بادی	۱۰
شکل ۲-۱	سخت افزار مدار حفاظتی مربوط به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه	۳۱
شکل ۳-۱	شمای نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه	۳۵
نمودار ۳-۲	منحنی ضریب C_p برحسب نسبت سرعت λ	۳۷
شکل ۳-۳	انتخاب کمیتهای سرعت، توان و گشتاور به عنوان مرجع جهت "ردیابی بیشترین توان"	۳۷
شکل ۳-۴	مدل توربین بادی	۳۸
شکل ۳-۵	مدار معادل ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در چارچوب مرجع دلخواه	۴۰
شکل ۳-۶	نمودار برداری شار استاتور	۴۲
شکل ۳-۷	نمودار سیستم کنترل در شرایط متعادل	۴۵
شکل ۴-۱	نمودار رویتگر "مدل مرجع-تطبیقی"	۴۹
شکل ۴-۲	نمودار "رویتگر مدل مرجع-تطبیقی بر پایه جریان روتور"	۵۴
شکل ۴-۳	روابط بین چارچوب مرجع $(\alpha\beta)$، $(dq)^+$ و $(dq)^-$	۵۷

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۴-۴	نمودار سیستم کنترل پیشنهادی در شرایط نامتعادل	۶۲
شکل ۵-۱	سیستم استاندارد IEEE، ۱۴ شینه	۶۶
شکل ۵-۲	نمودار ولتاژ سه فاز استاتور در حالت نرمال ناشی از تغییر توان مرجع	۶۸
شکل ۵-۳	نمودار سرعت روتور در حالت نرمال ناشی از تغییر توان مرجع	۶۸
شکل ۵-۴	نمودار توان اکتیو تولیدی در حالت نرمال ناشی از تغییر توان مرجع	۶۹
شکل ۵-۵	نمودار توان راکتیو تولیدی در حالت نرمال ناشی از تغییر توان مرجع	۷۰
شکل ۵-۶	نمودار جریان استاتور در فاز a در حالت نرمال ناشی از تغییر توان مرجع	۷۱
شکل ۵-۷	نمودار جریان روتور در فاز a در حالت نرمال ناشی از تغییر توان مرجع	۷۱
شکل ۵-۸	نمودار ولتاژ استاتور ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در افت ولتاژ متعادل ۷٪	۷۲
شکل ۵-۹	نمودار سرعت روتور ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در افت ولتاژ متعادل ۷٪	۷۳
شکل ۵-۱۰	نمودار توان اکتیو تولیدی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در افت ولتاژمتعادل۷٪	۷۴
شکل ۵-۱۱	نمودار توان راکتیو تولیدی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در افت ولتاژمتعادل۷٪	۷۴
شکل ۵-۱۲	نمودار جریان فاز a استاتور در ژنراتور القایی در افت ولتاژ سه فاز۷٪	۷۵
شکل ۵-۱۳	نمودار جریان روتور در فاز a ژنراتور القایی در افت ولتاژ سه فاز ۷٪	۷۵
شکل ۵-۱۴	نمودار ولتاژ استاتور ژنراتور القایی در افت ولتاژ متعادل ۵۰٪	۷۶
شکل ۵-۱۵	نمودار سرعت روتور ژنراتور القایی در افت ولتاژ متعادل ۵۰٪	۷۶
شکل ۵-۱۶	نمودار توان اکتیو تولیدی ژنراتور القایی در افت ولتاژ سه فاز ۵۰٪	۷۷
شکل ۵-۱۷	نمودار توان راکتیو تولیدی ژنراتور القایی در افت ولتاژ سه فاز ۵۰٪	۷۷

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۵-۱۸	نمودار جریان فاز a استاتور در ژنراتور القایی در افت ولتاژ سه فاز۵۰٪	۷۸
شکل ۵-۱۹	نمودار جریان فاز a روتور در ژنراتور القایی در افت ولتاژ سه فاز۵۰٪	۷۹
شکل ۵-۲۰	ولتاژ استاتور در کنترل برداری باسنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۱
شکل ۵-۲۱	جریان سه فاز استاتور در کنترل برداری باسنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۲
شکل ۵-۲۲	جریان سه فاز روتور در کنترل برداری باسنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۲
شکل ۵-۲۳	جریان محور d روتور در کنترل برداری باسنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۳
شکل ۵-۲۴	جریان محور q روتور در کنترل برداری باسنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۴
شکل ۵-۲۵	توان اکتیو خروجی در کنترل برداری باسنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۴
شکل ۵-۲۶	توان راکتیو استاتور در کنترل برداری باسنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۵
شکل ۵-۲۷	ولتاژ استاتور در کنترل برداری بدون سنسور در شرایط ولتاژ نامتعادل	۸۶
شکل ۵-۲۸	جریان استاتور در کنترل برداری بدون سنسور در شرایط ولتاژ نامتعادل	۸۶
شکل ۵-۲۹	جریان روتور در کنترل برداری بدون سنسور در شرایط ولتاژ نامتعادل	۸۷
شکل ۵-۳۰	جریان محور d روتور در کنترل برداری بدون سنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۸

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۵-۳۱	جریان محور q روتور کنترل برداری بدون سنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۸
شکل ۵-۳۲	توان اکتیو خروجی در کنترل برداری بدون سنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۹
شکل ۵-۳۳	توان راکتیو استاتور در کنترل برداری بدون سنسور در شرایط افت ولتاژ نامتعادل	۸۹
شکل ۵-۳۴	نمودار سرعت تخمینی روتور در مقایسه با سرعت واقعی روتور	۹۰
شکل ۵-۳۵	ولتاژ سه فاز استاتور در شرایط افزایش سرعت از ۶۵٪ تا ۱۳۵٪ در مدت ۳ ثانیه	۹۲
شکل ۵-۳۶	سرعت روتور در شرایط افزایش سرعت از ۶۵٪ تا ۱۳۵٪ در مدت ۳ ثانیه	۹۳
شکل ۵-۳۷	توان اکتیو خروجی در شرایط افزایش سرعت از ۶۵٪ تا ۱۳۵٪ در مدت ۳ ثانیه	۹۴
شکل ۵-۳۸	توان راکتیو خروجی در شرایط افزایش سرعت از ۶۵٪ تا ۱۳۵٪ در مدت ۳ ثانیه	۹۴
شکل ۵-۳۹	جریان فاز a استاتور در شرایط افزایش سرعت از ۶۵٪ تا ۱۳۵٪ در مدت ۳ ثانیه	۹۴
شکل ۵-۴۰	جریان فاز a روتور در شرایط افزایش سرعت از ۶۵٪ تا ۱۳۵٪ در مدت ۳ ثانیه	۹۵
شکل ۴-۴۱	نمودار سرعت تخمینی در حالت افزایش سرعت با بزرگ‌نمایی بیشتر	۹۶

www.SID.ir

Archive of SID

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱	پارامترها و اندازه‌های مورد نیاز روش‌های کنترل	۱۷
جدول۲-۲	مقایسه کامل سه روش کنترلی	۱۸
جدول۴-۱	جریان توالی منفی مرجع استاتور	۶۲
جدول ۵-۱	پارمترهای ژنراتور القایی از دو سو تغذیه	۶۶
جدول ۵-۲	مقادیر k_p و k_I	۷۹

www.SID.ir

Archive of SID

فهرست علامت‌های اختصاری

علامت	شرح
i_{ms}	جریان مغناطیس کننده
i_s	جریان استاتور
i_r	جریان روتور
L_s	اندوکتانس استاتور
L_r	اندوکتانس روتور
L_m	اندوکتانس مغناطیس کننده
L_l	اندوکتانس نشتی
λ_s	شار استاتور
λ_r	شار روتور
T_e	گشتاور الکترمغناطیسی
J	اینرسی روتور
R_s	مقاومت استاتور
R_r	مقاومت روتور
ω_e	فرکانس زاویه‌ای سنکرون
ω_r	فرکانس زاویه‌ای روتور
ω_{slip}	فرکانس زاویه‌ای لغزش
$\hat{\omega}_r$	فرکانس زاویه‌ای تخمینی روتور

www.SID.ir

Archive of SID

S	عملگر لاپلاس
P	تعداد جفت قطب ژنراتور
VC	کنترل برداری
DPC	کنترل مستقیم توان
DTC	کنترل مستفیم گشتاور
DFIG	ژنراتور القایی از دو سو تغذیه
RSC	مبدل سمت روتور
GSC	مبدل سمت شبکه
FOC	کنترل
MPPT	ردیابی بیشترین توان
MRAS	"مدل مرجع-تطبیقی"
RCMO	"رویتگر مرجع-تطبیقی بر پایه جریان روتور"
PLL	Phase locked loop
PCC	نقطه اتصال به شبکه
PI	تناسبی-انتگرالی
PIR	تناسبی-انتگرالی-تشدیدی
FRT	قابلیت غلبه بر اتصال کوتاه
LVRT	قابلیت غلبه بر افت ولتاژ

www.SID.ir

Archive of SID

TBMO	"مدل مرجع-تطبیقی بر پایه گشتاور"
CROWBAR	مقاومت ترمزی

www.SID.ir

Archive of SID

چکیده

نام خانوادگی: حسنی	نام: عبدالمجید	شماره دانشجویی: ۸۹۴۱۳۰۲
عنوان پایان نامه: کنترل نیروگاه بادی DFIG در شرایط افت ولتاژ نامتقارن در شبکه		
استاد/اساتید راهنما: دکتر رضا کیانی نژاد		
درجه تحصیلی: دکتری	رشته: برق	گرایش: قدرت
دانشگاه: شهید چمران اهواز	دانشکده: مهندسی	گروه: برق
تاریخ فارغ التحصیلی: ۲۰ بهمن ماه ۱۳۹۵		تعداد صفحه: ۱۳۵
کلید واژه ها: ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، کنترل برداری بدون سنسور،		

این رساله، یک روش بدون سنسور را برای کنترل برداری ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، تحت شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه به کارگرفته است. روش پیشنهادی بر اساس رویتگر مدل مرجع-تطبیقی بنا شده است که سرعت و موقعیت روتور را از مقادیر اندازه‌گیری ولتاژ و جریان ژنراتور القایی از دو سو تغذیه تخمین می‌زند. از آن‌جا که متغیر اصلی در رویتگر مدل مرجع-تطبیقی، جریان روتور است لذا آن را رویتگر مرجع-تطبیقی بر اساس جریان روتور گویند.

در این رساله، مدل ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در چارچوب مرجع سنکرون مثبت و منفی ارائه شده است. تغییرات توان اکتیو و راکتیو ماشین نیز در حضور مولفه منفی ولتاژ و جریان می‌باشد. هدف از کنترل ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در طی مدت نامتعادلی شبکه علاوه بر دنباله‌روی دقیق و سریع توان اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه بادی از مقادیر مرجع، حذف کامل نوسان جریان روتور می‌باشد؛ به عبارتی دیگر مولفه منفی جریان روتور وجود نداشته باشد. برای کنترل کامل مولفه‌های مثبت و منفی جریان روتور، از یک روش کنترل جریان روتور در چارچوب مرجع مثبت و منفی (dq) استفاده شده است.

شبیه‌سازی‌ها از طریق نرم افزار Simulink /Matlab بر روی یک ژنراتور القایی از دو سو تغذیه با توان نامی ۲ مگاوات انجام شده است. ابتدا ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در شرایط نرمال (ولتاژ نامی شبکه متصل به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه و بدون هیچ افت ولتاژی) شبیه‌سازی شده است. در این مرحله توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه به صورت مستقل کنترل شده‌اند و با دقت خوبی، مقادیر مرجع را دنباله کرده‌اند. کنترل توان‌ها از طریق کنترل جریان روتور در مبدل سمت روتور صورت گرفته است.

در مرحله‌ی بعد شبیه‌سازی در شرایط افت ولتاژ متعادل در شبکه متصل به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه انجام شده است و نتایج حاکی از کنترل مستقل، مناسب و دقیق توان‌های تولیدی می‌باشد. شبیه‌سازی ژنراتور

www.SID.ir

Archive of SID

القایی از دو سو تغذیه در شرایط افت ولتاژ نامتعادل نیز انجام شده است. در این حالت کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی با روش کنترل برداری به کمک رویتگر "مدل مرجع-تطبیقی بر پایه جریان روتور" صورت پذیرفته است. در این شرایط مولفه منفی جریان روتور نیز حذف شده است. در نهایت، ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در شرایط افت ولتاژ نامتعادل همزمان با تغییر شدید سرعت باد شبیه‌سازی شده است. در این شرایط نیز کنترل‌کننده دوبل به همراه "رویتگر مدل مرجع-تطبیقی بر پایه جریان روتور" به خوبی قادر به کنترل مستقل توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی شده است.

نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی این رساله در مقایسه با روش معمول با سنسور نشان می‌دهد روش پیشنهادی، مناسب و مقبول است. به علاوه از آن‌جا که روش پیشنهادی، فاقد سنسور است لذا از مزایای بدون سنسوری نیز برخوردار است. نتایج شبیه‌سازی، موثر بودن و انعطاف‌پذیری روش را تایید می‌کند و عملکرد دینامیکی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه را اصلاح می‌نماید. همان‌طور که در متن رساله اشاره خواهد شد روش‌های بدون سنسور کنترل برداری ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، در شرایط افت ولتاژ نامتعادل کمتر ارائه شده‌اند؛ لذا این رساله قدمی موفق در این جهت برداشته است.

www.SID.ir