دانشکده مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته برق قدرت

عنوان:

طراحی کنترل کننده بهینه مقاوم ژنراتور القایی دو سو تغذیه در نیروگاه بادی سرعت متغیر تحت شرایط ولتاژ نامتعادل هارمونیکی

استاد راهنما:

دکتر سید عباس طاهر

به وسیله:

مهدی کوهرنگ

شهریور 1391

تقدیم به

مهر مادرم

صفای پدرم

صبر همسرم

و قدمهای مبارک فرزندم

تقدیر و تشکر

پس از حمد و ثنای پروردگار بر خود لازم می دانم از زحمات بی دریغ و دلسوزانه جناب اقای دکترسید عباس طاهر که در تمام طول این مطالعه با صمیمیت تمام مرا یاری نمودند تقدیر و تشکر نمایم . هرچند جبران قطره ای از دریای زحمات ایشان نخواهد بود

همچنین از جناب اقای دکتر حلوایی و جناب اقای دکتر محمدی که به عنوان داور پایان نامه مرا مطالعه نموده و در جلسه دفاعیه شرکت نمودند تشکر می نمایم

در پایان از جناب اقای دکتر حسین ایمانیان که به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی قبول زحمت نمودند سپاسگذاری می نمایم

چکیده

با توجه به کاهش ذخائر سوختهای فسیلی استفاده از انرژی‌های نو به ویژه انرژی باد روز به افزایش می‌باشد. یکی از پرکاربردترین ژنراتورهای مورد استفاده در نیروگاههای بادی، ژنراتور القایی دوسو تغذیه، *DFIG*، می‌باشد. این ژنراتور، یک ماشین القایی رتور سیم‌پیچی شده است که استاتور آن به صورت مستقیم و سیم‌پیچهای رتور آن توسط یک مبدل پشت‌به‌پشت به شبکه متصل می‌باشد. روشهای زیادی برای کنترل بهینهٔ این ژنراتور جهت کارکرد مؤثر آن، در شبکه‌های متعادل وجود دارد. کنترل کلاسیک *PI*، کنترل مستقیم گشتاور و کنترل مستقیم توان از جملهٔ این روشها می‌باشد. اگر این ژنراتور در شبکه های نامتعادل قرار گیرد عدم تعادل ولتاژ باعث ایجاد اختلال در کارکرد ژنراتور می‌شود که شامل ایجاد پالسهایی در توانهای اکتیو، راکتیو و گشتاور الکترومغناطیسی، ایجاد عدم تعادل جریان استاتور و هارمونیکی شدن جریان رتور می‌گردد. موارد ذکرشده باعث کاهش طول عمر ژنراتور، افزایش تلفات و تولید توان به صورت نامطلوب می‌گردد. جهت کاهش اثرات نامطلوب عدم تعادل ولتاژ در ژنراتور می‌توان از روشهای کنترل مناسب همچون روش کنترل‌کننده*PI*، کنترل‌کنندهٔ *PI-R* ، کنترل مستقیم گشتاور و کنترل مستقیم توان استفاده نمود. یکی از روشهای مذکور روش بهینه شده کنترل کلاسیک یا استفاده از کنترل‌کنندهٔ *PI-R* می‌باشد. در این روش با اهدافی همچون، حذف گشتاور الکترومغناطیسی، متعادل نمودن جریان استاتور، حذف هارمونیک از جریان رتور و یا حذف پالس از توانهای اکتیو و راکتیو سیستم کنترل طراحی و اجرا می‌گردد. از مبدل‌های *DFIG* همانند یک فیلتر اکتیو شنت، جهت کاهش جریان هارمونیکی بارهای غیرخطی و افزایش کیفیت توان نیز می‌توان استفاده نمود. بدین ترتیب که از مبدل سمت شبکه جهت تولید بخش هارمونیکی جریان غیرخطی بار استفاده شده و بدین ترتیب *THD* جریان شبکه کاهش یافته و کیفیت توان بهبود می‌یابد. در صورت استفاده از کنترل‌کننده‌های *PI* یا *PI-R* پاسخ‌های سیستم کنترل وابستگی مستقیم به مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده‌ها دارد. برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای کنترل‌کننده‌ها از معیار کمینه نمودن مربع خطا استفاده شده است. جهت بهبود مقاومت کنترل‌کننده این معیار در سه نقطهٔ کاری لحاظ گردیده است. به منظور بهینه نمودن معیار مذکور از الگوریتم تکاملی *PSO* بهره گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازیها برای سیستم نامتعادل و هارمونیکی تحت حالتهای مختلف انجام گرفته که نشان دهندهٔ مقاومت بسیار خوب کنترل‌کننده می‌باشد.

کلمات کلیدی: ژنراتور القایی دوسو تغذیه (*DFIG*)، کنترل‌کنندهٔ بهینهٔ مقاوم، کنترل‌کنندهٔ *PI-R*، نیروگاه بادی

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه 1

1-1- مقدمه‌ای بر انرژی باد 1

1-2- الگوی باد 2

1-3- بازار جهانی برق بادی به تفکیک مناطق مختلف دنیا 2

1-3-1 - انرژی باد در ایران 6

1-4- ژنراتور القایی دو سو تغذیه ($DFIG$)و کنترل آن 8

فصل دوم: مدل‌سازی توربین‌بادی و ژنراتور القایی دوسو تغذیه 11

2-1- مقدمه 11

2-2- ساختمان توربین‌های بادی 11

2-2-1-توربین بادی با محور عمودی 11

2-2-2- توربین بادی با محور افقی 12

2-3- کنترل توان در توربین‌های بادی 15

2-4- انواع توربین‌های بادی 17

2-4-1- توربین‌های بادی سرعت ثابت 17

2-4-2- توربین‌های بادی با سرعت متغیر 18

2-5- آیرودینامیک توربین بادی 19

2-6- ژنراتورها 26

2-7- ساختارهای توربین بادی: 27

2-7-1- توربین سرعت ثابت نوع A 27

2-7-2-توربین بادی سرعت متغیر با سرعت رتور محدود شده (نوع B) 29

2-7-3- توربین سرعت متغیر با مبدل فرکانسی توان جزئی (نوع C) 30

2-7-4- توربین سرعت متغیر با مبدل فرکانسی توان کل (نوع D) 30

2-8- ژنراتور القایی دوسو تغذیه 31
2-9- مدل‌سازی ژنراتور القایی دوسو تغذیه 32
2-9-1- تبدیل dq 36
2-10- مدل ریاضی ژنراتور القایی دوسو تغذیه [51، 50] 38
2-11- آنالیز پخش بار 42
2-12- روابط توان در قابهای مرجع dq 47
فصل سوم: کنترل *DFIG* در شبکه‌های متعادل 49
3-1-مقدمه 49
3-2- کنترل ماشینهای القایی 49
3-2- 1- کنترل اسکالر 49
3-2- 2- کنترل برداری 50
3-2-2-1- کنترل با جهت‌دهی شار 51
3-2- 2- 2- جهت‌یابی شار 52
3-2-2-3- کنترل مستقیم گشتاور 53
3-2-2-4- کنترل مستقیم توان 53
3-3- کنترل ژنراتور القایی دوسو تغذیه در شبکه‌های متعادل 54
3-3- 1- کنترل مبدل بخش شبکه 54
3-3-2- مدل لینک *DC* 59
3-3-3- کنترل مبدل بخش رتور 59
3-3-3-1- کنترل برداری مبدل بخش رتور 61
فصل 4: کنترل بهینه و مقاوم *DFIG* در شبکه‌های نامتعادل و هارمونیکی 65
4-1- مقدمه 65
4-2- سیستم سه‌فاز در حالت نامتعادل 68
4-2- 1- جداسازی توالی‌های مثبت و منفی در حالت نامتعادل 71

4-3- سیستم کنترل *DFIG* در شبکه‌های نامتعادل 73

4-3-1- کنترل *DFIG* به روش *PI* کنترلر با جهت‌دهی شار استاتور تحت ولتاژ نامتعادل 74

4-3- 1- 1 – محاسبهٔ جریانهای مرجع 78

4-3-2- کنترل *DFIG* به روش *PI-R* کنترلر با جهت‌دهی ولتاژ استاتور در حالت نامتعادل 82

4-3-2-1- روابط توان 82

4-3-2-2- محاسبهٔ جریانهای مرجع 84

4-3-2-3- طراحی سیستم کنترل 86

4-3-3- کنترل *GSC* به روش *PI-R* کنترلر با جهت‌دهی ولتاژ استاتور در شبکه نامتعادل 86

4-4- کیفیت توان 89

4-4- 1- پدیده‌های کیفیت توان 89

4-4- 2- هارمونیکها 90

4-4-3- کنترل *DFIG* در شبکه‌های نامتعادل جهت کاهش هارمونیکهای جریان 91

4-4-3-1- جداسازی قسمت هارمونیکی جریان 91

4-4-4- کنترل مبدل سمت رتور جهت جبران جریان هارمونیکی در شبکه نامتعادل 95

4-4-5- کنترل *GSC* جهت جبران جریان هارمونیکی 96

4-5- بهینه سازی پارامترهای کنترل‌کننده‌ها 97

4-5-1- الگوریتم بهینه سازی پارامترها 98

4-5-2- بهینه سازی پارامترهای کنترل‌کننده‌های *DFIG* توسط الگوریتم *PSO* 98

فصل 5: **بررسی نتایج شبیه‌سازی** 101

5-1- مقدمه 101

5-2- عملکرد ژنراتور القایی بدون سیستم کنترل در حالت متصل به شبکه 102

5-3- تعیین بهینه پارامترهای کنترل‌کننده ها 108

5-4- عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI* بهینه در شبکهٔ متعادل 110

5-4-1- بررسی عملکرد کنترل‌کننده 111

5-5- عملکرد کنترل‌کننده PI بهینه در شبکه نامتعادل 118
5-6- عملکرد کنترل‌کننده $PI\text{-}R$ در شبکه متعادل 121
5-6-1- بررسی عملکرد کنترل‌کننده بدون تغییر در پارامترها 121
5-6-2-تغییرات همزمان پله در مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو 127
5-6-3- تغییرات ناهمزمان پله در مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو 133
5-6-4- تغییرات سینوسی در مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو 139
5-7- عملکرد کنترل‌کننده $PI\text{-}R$ در شبکه نامتعادل 146
5-7-1- نامتعادل شدن شبکه 147
5-7-2-تغییرات همزمان پله در مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو 152
5-7-3- تغییرات ناهمزمان پله در مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو 157
5-7-4- تغییرات سینوسی در مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو 160
5-8- بررسی نتایج در حالت شبکه نامتعال و هارمونیکی 168
5-9- جبران جریان هارمونیکی بار غیرخطی توسط $DFIG$ 174
5-9-1- جبران جریان هارمونیکی بار غیرخطی توسط $DFIG$ با مدلاسیون $SPWM$ 174
5-9-2-جبران جریان هارمونیکی بار غیرخطی توسط $DFIG$ با مدلاسیون هیسترزیس 177
5-10- جمع بندی نتایج حاصله 186
فصل ششم: نتیجه‌گیری 188
مراجع 196
پیوست الف: مروری اجمالی بر الگوریتم PSO 196

فهرست شکل‌ها

شکل (1-1)- ظرفیت جهانی برق بادی نصب شده به صورت الف) تجمعی ب) سالیانه (2010 – 1996) 4

شکل (1-2)- ظرفیت برق بادی نصب شده در 10 کشور برتر جهان [4] 5

شکل (1-3)- ظرفیت سالانه نصب شده برق بادی جهان به تفکیک مناطق مختلف [4]..... 5

شکل (1-4)- پیش بینی تولید برق از انرژی باد به صورت سالانه و تجمعی در جهان به همراه نرخ رشد [4]6

شکل(2-1)- توربین بادی با محور عمودی..... 12

شکل(2-2)- توربین بادی با محور افقی 13

شکل (2-3)- قسمتهای مختلف یک توربین بادی 13

شکل(2-4)- طرح کنترل گام توربین بادی سرعت متغیر[8]..... 16

شکل (2-5)– پرهٔ توربین بادی و سرعت باد 17

شکل (2-6)- ژنراتور القایی قفس سنجابی با توربین بادی سرعت ثابت متصل به شبکه 18

شکل (2-7)– جریان هوای عبوری از یک دیسک محرک. 20

شکل (2-8)– چگونگی تغییرات سرعت و فشار هوا در نقاط مختلف تونل جریان. 21

شکل (2-9)– منحنی C_p بر حسب λ. 24

شکل (2-10)– مشخصه توان استخراج شده برحسب سرعت شفت رتور به ازای سرعت‌های مختلف باد.25

شکل (2-11)- توربین بادی سرعت ثابت نوع A.....29

شکل (2-12)- توربین سرعت متغیر نوع B.....29

شکل (2-13)- توربین با سرعت متغیر نوع C.....30

شکل (2-14)- توربین بادی سرعت متغیر نوع D 30

شکل (2-15)– توپولوژی بهره‌گیرنده از ژنراتور القایی دوسو تغذیه به همراه مبدل پشت به پشت.....31

شکل (2-16)– مدار الکتریکی یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه. 32

شکل (2-17)– مدار معادل الکتریکی یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه..... 41

شکل (2- 18)– مدار معادل یک فاز ماشین القایی دوسو تغذیه. 44

شکل (2-19)– پخش بار در توربین بادی دو سو تغذیه بدون تلفات..... 46

شکل (3-1)- شباهت ماشین جریان مستقیم و ماشین القایی..... 50

شکل (3-2)- طرح کلی از یک توربین بادی مجهز به *DFIG* به همراه کنترل‌کننده‌های آن [60] 54

شکل (3-3)- طرح وارهٔ کلی کنترل‌کننده بخش شبکه [58] 55

شکل (3-4)- دیاگرام مداری جزئی‌تر مبدل بخش شبکه [60] 56

شکل (3-5)- دیاگرام انتقال قاب مرجع ساکن به قاب مرجع در امتداد ولتاژ استاتور 57

شکل (3-6)- دیاگرام انتقال قاب مرجع ساکن به قاب مرجع در امتداد ولتاژ استاتور [55] 58

شکل (3-7)- بلوک دیاگرام کلی کنترل‌کننده بخش رتور..... 60

شکل (3-8)- طرح وارهٔ کلی کنترل‌برداری بخش رتور 61

شکل (3-9)– دیاگرام فازوری در جهت دهی شار استاتور 62

شکل (4-1)– مقادیر توالی مثبت و منفی ولتاژ بر حسب درصد عدم تعادل در ولتاژ [36]..... 65

شکل (4-2)– مقدار توالی منفی جریان استاتور بر حسب عدم تعادل در ولتاژ استاتور [29]. 66

شکل (4-3)– مقدار جریان فازهای مختلف استاتور بر حسب درصد عدم تعادل در ولتاژ [29]..... 66

شکل (4-4)– میزان تلفات در سیم‌پیچهای مختلف بر حسب درصد عدم تعادل [29]. 67

شکل (4-5)– نوسان گشتاور در ژنراتور القایی به دلیل نامتعادلی ولتاژ استاتور [29]. 67

شکل (4-6)– الف) ولتاژ در حالت نامتعادل – ب) تبدیل یافتهٔ آن به قابهای مرجع *dq* [60]. 69

شکل (4-7)- رابطه بین قابهای مرجع گوناگون [31]..... 70

شکل (4-8)– جداسازی توالی مثبت و منفی در قابهای مرجع *dq* توسط فیلتر پایین گذر..... 71

شکل (4-9)– جداسازی توالی مثبت و منفی در قابهای مرجع *dq* - الف)توسط *Notch Filter* – ب) *Band Stop Filter* 72

شکل (4-10)- دیاگرام روش حذف سیگنال با تاخیر (*DSC*) 73

شکل (4-11) –کنترل جریان با *PI-R* کنترلر 75

شکل (4-12)- دیاگرام کنترل مبدل سمت رتور در شبکه نامتعادل به روش جهت‌دهی شار استاتور 81

شکل (4-13)- دیاگرام بردارها در روش کنترل با جهت‌دهی ولتاژ استاتور. 83

شکل (4-14)- کنترل مبدل سمت رتور به روش *PI-R* کنترلر با جهت‌دهی ولتاژ استاتور 87

شکل (4-15)- کنترل مبدل سمت شبکه *DFIG* در شبکه‌های نامتعادل 88

شکل (4-16)- *DFIG* همراه با بار غیرخطی متصل به شبکه 91

شکل (4-17)- جداسازی مولفه‌های هارمونیکی جریان به روش تئوری توان لحظه‌ای 92

شکل (4-18)- جداسازی مولفه‌های هارمونیکی جریان به روش فیلتر پایین‌گذر 92

شکل (4-19)- جداسازی مولفه‌های هارمونیکی جریان به روش *High Selectivity Filter* 93

شکل (4-20)- *HSF* با فرکانس زاویه‌ای ωc 94

شکل (4-21)- دیاگرام بد *HSF* 95

شکل (4-22)- کنترل مبدل سمت رتور به روش کنترل‌کننده*PI-R* 96

شکل (4-23)- دیاگرام کنترل *DFIG* جهت جبران جریان هارمونیکی بار 97

شکل (5-1)– عملکرد ژنراتور القایی در شبکه متعادل 103

شکل (5-2)– ولتاژ نامتعادل ترمینال متصل به ژنراتور 105

شکل (5-3)– عملکرد ژنراتور القایی در شبکه نامتعادل 106

شکل (5-4)- نمودار *Fitness* بر حسب تکرارهای الگوریتم *PSO* در محاسبه پارامترهای کنترل‌کننده‌های *GSC* 109

شکل (5-5)- نمودار *Fitness* بر حسب تکرارهای الگوریتم *PSO* در محاسبه پارامترهای کنترل‌کننده‌های *RSC* 109

شکل (5-6)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI* بهینه در شبکه متعادل و حالت نامی(بررسی موردی 3): 112

شکل (5-7)– عملکرد کنترل‌کننده *PI* در شبکه متعادل و حالت نامی (بررسی موردی 3): 113

شکل (5-8)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI بهینه در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شمارهٔ 1 114
شکل (5-9)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ کلاسیک در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره 1 115
شکل (5-10)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره 2 116
شکل (5-11)– عملکرد عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت 117
شکل (5-12)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI بهینه در شبکه نامتعادل 119
شکل (5-13)– عملکرد ژنراتور القایی در شبکه نامتعادل.....120
شکل (5-14)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI-R در شبکه متعادل و حالت نامی 122
شکل (5-15)– عملکرد کنترل‌کننده PI-R در شبکه متعادل و حالت نامی 123
شکل (5-16)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI-R طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره 1 124
شکل (5-17)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI-R طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره1 125
شکل (5-18)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI-R طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره 2 : 126
شکل (5-19)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI-R طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره 2 :..... 127
شکل (5-20)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI-R در شبکه متعادل و حالت نامی با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 129
شکل (5-21)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI-R در شبکه متعادل و حالت نامی با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 130
شکل (5-22)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ PI-R طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره 1 با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو.....131

شکل (5-23)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره 2 با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 132

شکل (5-24)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ در شبکه متعادل و حالت نامی با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 134

شکل (5-25)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ در شبکه متعادل و حالت نامی با تغییر ناهمزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 135

شکل (5-26)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 137

شکل (5-27)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 138

شکل (5-28)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل تغییر سینوسی در مقادیر مرجع توان درحالت نامی 140

شکل (5-29)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل تغییر سینوسی در مقادیر مرجع توان در حالت نامی 141

شکل (5-30)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره 1 با تغییر سینوسی در مقادیر مرجع توان 143

شکل (5-31)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره 2 با تغییر سینوسی در مقادیر مرجع توان 144

شکل (5-32)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل تغییر در سرعت باد..... 145

شکل (5-33)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل تغییر در سرعت باد 146

شکل (5-34)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه نامتعادل در حالت نامی با نامتعادل شدن شبکه در $t=0.5\ s$ 148

شکل (5-35)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه نامتعادل در حالت نامی با نامتعادل شدن شبکه در $t=0.5\ s$ 149

شکل (5-36)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه نامتعادل، در حضور عدم قطعیت شماره 1 با نامتعادل شدن شبکه در $t=0.5\ s$ 150

شکل (5-37)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل با نامتعادل شدن ولتاژ شبکه در $t=0.5\ s$ و در حضور عدم قطعیت شماره 2 151

شکل (5-38)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ در شبکه متعادل و حالت نامی با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 153

شکل (5-39)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ در شبکه نامتعادل و حالت نامی با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 154

شکل (5-40)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل و درحضور عدم قطعیت شماره 1 با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 155

شکل (5-41)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل و در حضور عدم قطعیت شماره 2 با تغییر همزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو 156

شکل (5-42)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ در شبکه نامتعادل با تغییر ناهمزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو و حالت نامی 158

شکل (5-43)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ در شبکه نامتعادل با تغییر ناهمزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو و حالت نامی 159

شکل (5-44)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل با تغییر ناهمزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو و در حضور عدم قطعیت شماره 1 161

شکل (5-45)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ طراحی شده در شبکه متعادل با تغییر ناهمزمان پله در توانهای اکتیو و راکتیو و در حضور عدم قطعیت شماره 2 162

شکل (5-46)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ در شبکه نامتعادل با تغییر سینوسی در توانهای اکتیو و راکتیو و حالت نامی 163

شکل (5-47)– عملکرد کنترل‌کنندۀ $PI\text{-}R$ در شبکه نامتعادل با تغییر سینوسی در توانهای اکتیو و راکتیو و حالت نامی 164

شکل (5-48)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* در شبکه نامتعادل با تغییر سینوسی در توانهای اکتیو و راکتیو و در حضور عدم قطعیت شماره 1 166

شکل (5-49)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* در شبکه نامتعادل با تغییر سینوسی در توانهای اکتیو و راکتیو و در حضور عدم قطعیت شماره 2 167

شکل (5-50)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* بهینهٔ طراحی شده در شبکه متعادل با تغییر در سرعت باد ...169

شکل (5-51)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* طراحی شده در شبکه نامتعادل باتغییر در سرعت باد 170

شکل (5-52)– بلوک دیاگرام سیستم مورد مطالعه در حالت شبکه هارمونیکی 171

شکل (5-53)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* طراحی شده در شبکه نامتعادل و هارمونیکی 172

شکل (5-54)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* طراحی شده در شبکه نامتعادل 173

شکل (5-55)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* بهینه شده در شبکه نامتعادل با وجود بار غیرخطی با جداسازی به روش فیلتر پایین‌گذر 175

شکل (5-56)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* بهینه شده در شبکه نامتعادل با وجود بار غیرخطی با جداسازی به روش *HSF* 176

شکل (5-57)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* بهینه شده در شبکه نامتعادل با وجود بار غیرخطی با جداسازی به روش *HSF* 177

شکل (5-58)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* بهینه شده در شبکه نامتعادل با وجود بار غیرخطی در حالت نامی با مدلاسیون هیسترزیس 178

شکل (5-59)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* بهینه شده در شبکه نامتعادل با وجود بار غیرخطی در حالت نامی با مدلاسیون هیسترزیس 179

شکل (5-60)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* بهینه شده در شبکه نامتعادل با وجود بار غیرخطی در حالت نامی با مدلاسیون هیسترزیس 180

شکل (5-62)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ *PI-R* بهینه شده در شبکه نامتعادل با وجود بار غیرخطی با مدلاسیون هیسترزیس در حضور عدم قطعیت شماره 1 183

شکل (5-63)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ بهینه شده در شبکه نامتعادل با وجود بار غیرخطی با مدلاسیون هیسترزیس در حضور عدم قطعیت شماره 2 184
شکل (5-64)– عملکرد کنترل‌کنندهٔ $PI\text{-}R$ بهینه شده در شبکه نامتعادل با وجود بار غیرخطی با مدلاسیون هیسترزیس در حضور عدم قطعیت شماره 2 185

فهرست جداول

جدول (1-1)- ظرفیت جهانی برق بادی به تفکیک مناطق مختلف [4] 3

جدول (1-2)- میزان تولید انرژی برق از نیروی باد در ایران تا سال 2010 [5]..... 6

جدول (1-3)- ظرفیت مزارع بادی نصب شده در سایت بینالود [5] 6

جدول (1-4)- ظرفیت مزارع بادی نصب شده در نیروگاههای بادی منجیل [5] 6

جدول (1-5)- ظرفیت مزارع بادی نصب شده در سایت لوتک [5] 7

جدول (1-6)- ظرفیت مزارع بادی نصب شده در سایت عون بن علی تبریز [5] 7

جدول (2-1)- مقدار ثابت‌های c_1 تا c_6 در رابطه (2-13).....25

جدول (2-2)- ساختارهای مختلف توربین بادی معرفی شده در مرجع [7].....27

جدول (2-3)- مثالی از نحوه پخش بار برای سرعت‌های مختلف ژنراتور القایی دوسو تغذیه. 46

جدول (5-1)- پارامترهای ژنراتور القایی دوسو تغذیه به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها.....102

جدول (5-2)- مشخصه‌های ژنراتور القایی بدون کنترل در شبکه نامتعادل 107

جدول (5-3)- بهره‌های کنترلی محاسبه شده توسط الگوریتم *PSO* 110

جدول (5-4)- عدم قطعیت‌های بررسی شده در این مطالعه..... 110

جدول (5-5)- مشخصه‌های *DFIG* با کنترل‌کنندهٔ *PI* بهینه در شبکه نامتعادل. 120

جدول (5-6)- مشخصه‌های سیستم در شبکه نامتعادل با کنترل‌کنندهٔ *PI* بهینه..... 186

جدول (5-7)- مشخصه‌های سیستم در شبکه نامتعادل با کنترل‌کننده *PI-R* بهینه..... 187

جدول (5-8)- مقایسه نتایج حاصل از کنترل به روشهای مختلف در جهت کاهش *THD* جریان شبکه. 187

علائم اختصاری	
DFIG	*Doubly Fed Induction Generator*
GSC	*Rotor Side Convertor*
RSC	*Grid Side Convertor*
SFO	*Stator Flux Oriented*
SVO	*Stator Voltage Oriented*
VAWT	*Vertical Axis Wind Turbine*
HAWT	*Horizontal Axis Wind Turbine*
DTC	*Direct Torqe Control*
DPC	*Direct Power Control*
DSC	*Delayed Signal Cancellation*
PLL	*Phase Lock Loop*
IHD	*Individual Harmonic Distortion*
THD	*Total Harmonic Distortion*
HSF	*High Selectivity Filter*

فصل اول

مقدمه

1-1- مقدمه‌ای بر انرژی باد

باد توسط سرعت و مسیرش که متاثر از عوامل متعدد، مانند موقعیت جغرافیایی، شرایط اقلیمی، ارتفاع از سطح زمین و مشخصات سطحی منطقه می‌باشد، تعریف می‌گردد. توربین‌های بادی در رابطهٔ متقابل با باد بخشی از انرژی جنبشی باد را گرفته و آن را تبدیل به یک انرژی قابل استفاده می‌کنند. یکی از بهترین روشهای استفاده از باد تولید انرژی الکتریکی است. به این صورت که با قرار دادن یک توربین بادی در مسیر باد و انتقال انرژی مکانیکی توربین به یک ژنراتور، انرژی الکتریکی تولید می‌گردد [1]. در قطب‌ها، انرژی گرمایی کمتری نسبت به مناطق استوایی وجود دارد همچنین در خشکی‌ها تغییرات دما با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد و بنابراین خشکی‌های زمین نسبت به دریاها زودتر گرم و زودتر سرد می‌شوند. این تفاوت دمای جهانی، موجب به وجود آمدن یک سیستم جهانی تبادل حرارتی خواهد شد. بیشتر انرژی که در حرکت باد وجود دارد را می‌توان در سطوح بالای جو پیدا کرد، جایی که سرعت مداوم باد به بیش از 160 کیلومتر در ساعت می‌رسد اما باد انرژی خود را در اثر اصطکاک با سطح زمین و جو از دست می‌دهد [2]. تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد مزایای فراوانی دارد که برخی از آنها عبارتند از:

- عدم نیاز توربین‌های بادی به سوخت
- توانائی تامین بخشی از انرژی برق
- کمتر بودن هزینه‌های جاری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بلندمدت
- تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار انرژی