چکیده

بهبود مشخصه‌های کیفیت توان برای شبکه‌های متصل به ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه با توربین بادی با کاهش شدت فلیکر ولتاژ، هموارسازی پروفیل مقدار موثر ولتاژ و جلوگیری از ورود هارمونیکهای ناشی از کلیدزنی در مبدلهای ژنراتور امکان‌پذیر است. پدیده فلیکر مهمترین مشکل کیفیت توان در این سیستمها می‌باشد. عامل مهم ایجاد فلیکر، تغییرات مداوم سرعت باد، شدت آشفتگی، تندباد و اثرات پره شامل سایه برج و Wind shear است که باعث ایجاد نوسانات بر توان تولیدی و ولتاژ شبکه می‌گردد. در این مطالعه با طراحی حلقه‌های کنترلی و کنترل‌کننده‌های PI مبدل سمت رتور ژنراتور، فرآیند تولید توان اکتیو و راکتیو کنترل می‌گردد و در نتیجه آن فلیکر ولتاژ شبکه کاهش قابل توجهی می‌یابد. وظیفه اصلی مبدل سمت شبکه تثبیت ولتاژ خازن لینک DC با تغییر جهت فلوی توان رتور در نتیجه تغییرات مداوم سرعت باد می‌باشد. سیستم کنترل زاویه پره نیز با استفاده از کنترل‌کننده تناسبی در قسمت کنترل سرعت و کنترل‌کننده PI در قسمت کنترل توان اکتیو ژنراتور طراحی شده است. این سیستم توان آیرودینامیکی توربین و ژنراتور را در سرعتهای بالای باد و یا وقوع خطا محدود می‌نماید. در این مطالعه به‌منظور کاهش اثرات پره و هموارسازی پروفیل ولتاژ، فیلتر میان‌گذر طراحی شده است و در حلقه کنترل توان اکتیو در مبدل سمت رتور برای دامنه تغییرات سرعت باد از 9 تا 16 متر بر ثانیه بکار می‌رود. با افزایش سرعت باد به 17 متر بر ثانیه و بیشتر، استفاده همزمان از فیلتر در حلقه کنترل زاویه پره به‌منظور کاهش اندازه و نوسانات زاویه پره به‌همراه فیلتر مبدل سمت رتور پیشنهاد می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازیها برای سیستم تست به-همراه محاسبه شاخص کوتاه مدت شدت فلیکر، بهبود کیفیت توان شبکه را تایید می‌نماید.

کلمات کلیدی:

بهبود کیفیت توان- ژنراتور القایی دوسوتغذیه- فلیکر- شاخص کوتاه مدت شدت فلیکر- کنترل زاویه پره- مبدل سمت رتور- هموارسازی توان و ولتاژ

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

1-1-مقدمه.....1

1-1-1-وضعیت استفاده از انرژی باد جهان.....1

1-1-2-کاربرد ژنراتور القایی دوسوتغذیه.....2

1-1-3- اهمیت کیفیت توان در نیروگاههای بادی 2

1-2- مروری بر مطالعات انجام شده قبلی.....3

1-3- اهداف پایان‌نامه.....5

1- 4- ساختار پایان‌نامه.....6

فصل دوم: اصول کار و مدل‌سازی ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه با توربین بادی

2-1- مقدمه.....7

2-2- مدل آیرودینامیک توربین.....10

2-3- مدل مکانیکی.....10

2-3-1- مدل تک‌جرمه..... 11

2-3-2- مدل دوجرمه.....11

2-4- اصول کنترل برداری.....12

2-5- مدل الکتریکی ماشین القایی دوسوتغذیه.....15
2-6- اصول عملکرد حلقه‌های کنترلی.....18
2-6-1- منحنی توان-سرعت.....18
2-6-2- مبدل سمت رتور.....19
2-6-3- مبدل سمت شبکه.....20
2-6-4-کنترل زاویه پره.....21

فصل سوم: مشخصه‌های کیفیت توان

3-1- مقدمه.....23
3-2- دسته‌بندی پدیده‌های کیفیت توان.....24
3-2-1- فلیکر.....28
3-2-2- تغییرات ولتاژ.....28
3-2-3- هارمونیک.....28
3-3- بهبود کیفیت توان..... 30
3-3-1- طراحی حلقه‌های کنترلی.....30
3-3-2- تجهیزات بهساز.....31
3-4- پدیده‌های آیرودینامیکی..... 32
3-4-1- پدیده‌های ذاتی سرعت باد.....32
3-4-2- اثرات پره.....33

3-4-2-1- سایه برج 33
3-4-2-2- Wind shear 33
3-4-2-3-خطای Yaw 33
3-4-3- مدل‌سازی اثرات پره 34
3-5- مطالعه پدیده فلیکر 36
3-5-1- علت ایجاد فلیکر 36
3-5-2- شاخصهای فلیکر 37
3-5-2-1- شاخص کوتاه مدت شدت فلیکر (P_{st}) 37
3-5-2-2- شاخص بلند مدت شدت فلیکر (P_{lt}) 37
3-5-3- دسته‌بندی روشهای کاهش فلیکر 39
3-5-3-1- ضریب توان ثابت 39
3-5-3-2- روش کنترل ولتاژ 42
3-5-3-3- توان راکتیو ثابت 43
3-5-3-4- سایر روشهای پیشنهادی جهت کاهش فلیکر 43
3-5-4- مدل‌سازی فلیکرمتر 46
3-6- ارزیابی مقدار موثر ولتاژ 49
3-7-کدهای شبکه 49
3-8- اندازه‌گیری کیفیت توان 50

فصل چهارم: بهبود مشخصه‌های کیفیت توان شبکه مورد مطالعه

4-1- مقدمه.....52

4-2- معرفی سیستم تست.....52

4-3- روش پیشنهادی جهت بهبود کیفیت توان شبکه..... 53

4-3-1- طراحی حلقه‌های کنترلی و کنترل‌کننده مبدلها و حلقه کنترل زاویه پره.....53

4-3-1-1- اصول طراحی کنترل‌کننده‌ها و حلقه‌های کنترلی مبدل سمت رتور.....53

4-3-1-2- طراحی کنترل‌کننده‌ها و حلقه‌های کنترلی مبدل سمت شبکه.....60

4-3-1-3- حلقه کنترل زاویه پره.....60

4-3-2- طراحی فیلتر میان‌گذر (BPF).....61

4-3-3-تاثیر فیلتر میان‌گذر بر فرآیند کنترل توان راکتیو.....66

4-3-4- چگونگی استفاده از دو فیلتر میان‌گذر برای سرعتهای بالای باد.....67

4-3-5- بررسی عملکرد فیلتر بر مکان هندسی حلقه کنترل توان اکتیو.....68

4-3-6-پاسخ پله حلقه کنترل توان اکتیو با وجود فیلتر.....71

فصل پنجم: بررسی نتایج شبیه‌سازی

5-1- مقدمه.....73

5-2- مدل‌سازی شدت آشفتگی بر سرعت باد.....74

5-3- ارزیابی عملکرد ژنراتور در سرعتهای مختلف باد.....75

5-3-1- نتایج برای سرعت باد 12 متر بر ثانیه.....75

5-3-2- نتایج برای سرعت باد 15 متر بر ثانیه.....77
5-3-3- نتایج برای سرعت باد 18 متر بر ثانیه.....79
5-3-4- نتایج برای سرعت باد 8 متر بر ثانیه.....81
5-3-5- محاسبه شاخص کوتاه مدت فلیکر و اغتشاش هارمونیکی کل.....83
5-4- تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر کیفیت توان.....84
5-4-1- تغییر شدت آشفتگی.....84
5-4-2- تغییر ظرفیت اتصال کوتاه شبکه.....85
5-4-3- تغییر نسبت $\frac{X}{R}$ شبکه.....87
5-5- شبیه‌سازی و بررسی عملکرد فیلتر میان‌گذر.....88
5-5-1- عملکرد فیلتر در سرعت باد 8 متر بر ثانیه.....89
5-5-2- عملکرد فیلتر در سرعت باد 9 متر بر ثانیه.....90
5-5-3- عملکرد فیلتر در سرعت باد 12 متر بر ثانیه.....92
5-5-4- عملکرد فیلتر در سرعت باد 16 متر بر ثانیه.....94
5-5-5- عملکرد فیلتر در سرعت باد 17 متر بر ثانیه.....95
5-5-6- عملکرد فیلتر در سرعتهای مختلف باد با درنظرگرفتن شدت آشفتگی.....97
5-5-7- عملکرد فیلتر برای پروفیل سرعت باد متغیر..... 101
5-5-8- عملکرد فیلتر در شرایط تندباد.....104
5-6- شبیه‌سازی خطاهای دینامیکی کوتاه مدت.....105

5-6-1- خطای سه‌فاز به زمین 105

5-6-2- خطای دوفاز به زمین.....106

5-6-3- خطای تکفاز به زمین.....107

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

6-1- نتیجه‌گیری.....109

6-2- پیشنهادات.....111

فهرست مراجع.....112

ضمیمه الف : مدل نهایی فلیکرمتر.....118

ضمیمه ب: مشخصات سیستم تست.....120

ضمیمه ج: M-File ترسیم مکان هندسی بر اساس تغییرات a_p و بهره فیلتر.....124

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول 2-1: دامنه عملکرد ژنراتور القایی دوسوتغذیه..... 9

جدول 3-1: دسته‌بندی و مشخصات پدیده‌های کیفیت توان..... 25

جدول 3-2: دسته‌بندی اغتشاشات کیفیت توان..... 27

جدول 3-3: محدوده مجاز شاخصهای هارمونیکی بر اساس استاندارد IEEE519 30

جدول 3-4: مقادیر α بر اساس نوع اقلیم..... 35

جدول 3-5: محدوده مجاز شاخصهای فلیکر..... 38

جدول 3-6 : محدوده مجاز شاخصهای فلیکر در سوئد..... 38

جدول 3-7: محدوده مجاز شاخصهای فلیکر در دانمارک..... 38

جدول 3-8: محدوده مجاز شاخصهای فلیکر در فرانسه..... 38

جدول 5-1: شاخص کوتاه مدت شدت فلیکر در سرعتهای مختلف برای سیستم تست..... 83

جدول 5-2: شاخص اغتشاش هارمونیکی کل به‌ازای فرکانس‌های مختلف کلیدزنی در سرعتهای بادگوناگون. 83

جدول 5-3: شاخص کوتاه مدت شدت فلیکر با توجه به تغییر شدت آشفتگی سرعت باد..... 84

جدول 5-4: شاخص کوتاه مدت شدت فلیکر با توجه به تغییر ظرفیت اتصال کوتاه شبکه..... 86

جدول 5-5: شاخص کوتاه مدت شدت فلیکر با توجه به تغییر نسبت $\frac{X}{R}$ شبکه..... 87

فهرست شکلها

عنوان **صفحه**

شکل 2-1: بلوک دیاگرام ژنراتور القایی دوسوتغذیه 8

شکل 2-2: قسمتهای مکانیکی متصل به DFIG..... 8

شکل 2-3: جهت فلوی توان رتور..... 9

شکل 2-4: مدل مکانیکی دوجرمه..... 12

شکل 2-5: دیاگرام برداری دستگاه سه فاز و dq..... 13

شکل 2-6: فلوی توان در قسمت‌های مختلف DFIG..... 17

شکل 2-7: منحنی توان-سرعت برای توربین بادی مدل ECO100 با توان 3 مگاوات..... 18

شکل 2-8: بلوک دیاگرام حلقه خارجی کنترل توان اکتیو و راکتیو و حلقه‌های داخلی کنترل جریان..... 19

شکل 2-9: بلوک دیاگرام حلقه خارجی کنترل سرعت مبدل سمت رتور..... 20

شکل 2-10: بلوک دیاگرام حلقه‌های کنترل مبدل سمت شبکه..... 21

شکل 2-11: بلوک دیاگرام کنترل حلقه باز سیستم کنترل زاویه پره..... 22

شکل 3-1: بلوک دیاگرام کنترل ضریب توان ثابت..... 40

شکل 3-2: بلوک دیاگرام روش بهبود یافته کنترل ضریب توان ثابت..... 41

شکل 3-3: بلوک محاسبه ΔP 41

شکل 3-4: بلوک دیاگرام کنترل ولتاژ..... 42

شکل 3-5: بلوک دیاگرام کنترل توان راکتیو..... 43

شکل 3-6: بلوک دیاگرام کنترل توان راکتیو بر اساس نرم‌افزار Matlab..... 45

شکل 3-7: بلوک دیاگرام روش کنترل هماهنگ توان اکتیو و راکتیو..... 45

شکل 3-8: بلوک دیاگرام روش استفاده از پایدارساز سیستم قدرت..... 46

شکل 3-9: بلوک‌های فلیکرمتر..... 47

شکل 3-10: بلوک دیاگرام کالیبره‌کننده..... 47

شکل 4-1: دیاگرام سیستم تست..... 53

شکل 4-2: مدل محور d دستگاه مدل‌سازی‌شده رتور..... 54

شکل 4-3: حلقه خارجی کنترل توان اکتیو..... 57

شکل 4-4: مقدار ولتاژ شبکه و توان اکتیو ژنراتور با تغییر مقدار α و تثبیت مقدار α_p..... 58

شکل 4-5: مقدار ولتاژ شبکه و توان اکتیو ژنراتور با تثبیت مقدار α و تغییر مقدار α_p..... 59

شکل 4-6: بلوک دیاگرام حلقه خارجی محور q بر اساس روش پیشنهادی..... 59

شکل 4-7: بلوک دیاگرام استخراج سرعت مرجع برای سیستم کنترل زاویه پره..... 61

شکل 4-8: دیاگرام بود تابع انتقال فیلتر طراحی‌شده..... 63

شکل 4-9: مدار الکتریکی یک نمونه فیلتر میان‌گذر..... 63

شکل 4-10: منحنی نمادین فیلتر میان‌گذر..... 64

شکل 4-11: بلوک دیاگرام پیشنهادی به‌منظور بهره‌برداری از فیلتر میان‌گذر طراحی‌شده..... 65

شکل 4-12: دیاگرام بود تابع انتقال رابطه (4-37)..... 65

شکل 4-13: تاثیر فیلتر میان‌گذر بر جریان مرجع محور d..... 66

شکل 4-14: تاثیر عملکرد فیلتر میان‌گذر بر توان راکتیو و جریان مرجع محور q..... 67

شکل 4-15: چگونگی استفاده از فیلتر میان‌گذر در حلقه کنترل زاویه پره..... 67

شکل 4-16: تاثیر استفاده از دو فیلتر میان‌گذر بر جریان مرجع محور d و زاویه پره در سرعت بالای باد..... 68

شکل 4-17: بلوک دیاگرام کلی حلقه کنترل توان اکتیو بدون وجود فیلتر میان‌گذر..... 69

شکل 4-18: بلوک دیاگرام کلی حلقه کنترل توان اکتیو با وجود فیلتر میان‌گذر..... 69

شکل 4-19: مکان هندسی تابع انتقال حلقه کنترل توان به‌ازای تغییرات a_p..... 70

شکل 4-20: مکان هندسی تابع انتقال حلقه کنترل توان به‌ازای تغییرات بهره فیلتر..... 71

شکل 4-21: پاسخ پله تابع انتقال حلقه کنترل توان اکتیو با وجود فیلتر میان‌گذر.....72

شکل 5-1: مدل‌سازی شدت آشفتگی بر سرعت باد.....74

شکل 5-2: منحنی سرعت باد مدل‌سازی‌شده با شدت آشفتگی 10درصد برای سرعت باد 13 متر بر ثانیه.... 74

شکل 5-3: پروفیل سرعت باد و مقدار ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 12 متر بر ثانیه.....75

شکل 5-4: مقدار ولتاژ و جریان شبکه در شرایط گذرای اولیه در سرعت باد 12 متر بر ثانیه.....76

شکل 5-5: توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور در سرعت باد 12 متر بر ثانیه.....76

شکل 5-6: سرعت رتور ژنراتور، ولتاژ خازن لینک DC و تغییرات زاویه پره در سرعت باد 12 متر بر ثانیه.....77

شکل 5-7: پروفیل سرعت باد و مقدار ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 15 متر بر ثانیه.....78

شکل 5-8: توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور در سرعت باد 15 متر بر ثانیه.....78

شکل 5-9: سرعت رتور ژنراتور، ولتاژ خازن لینک DC و تغییرات زاویه پره در سرعت باد 15 متر بر ثانیه.....79

شکل 5-10: پروفیل سرعت باد و مقدار ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 18 متر بر ثانیه.....79

شکل 5-11: توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور در سرعت باد 18 متر بر ثانیه.....80

شکل 5-12: سرعت رتور ژنراتور، ولتاژ خازن لینک DC و تغییرات زاویه پره در سرعت باد 18 متر بر ثانیه....80

شکل 5-13: پروفیل سرعت باد و مقدار ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 8 متر بر ثانیه.....81

شکل 5-14: توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور در سرعت باد 8 متر بر ثانیه.....82

شکل 5-15: سرعت رتور ژنراتور، ولتاژ خازن لینک DC و تغییرات زاویه پره در سرعت باد 8 متر بر ثانیه.....82

شکل 5-16: پروفیل سرعت باد با توجه به میزان شدت آشفتگی، مقدار ولتاژ و جریان شبکه.....84

شکل 5-17: پروفیل سرعت باد، توان اکتیو و راکتیو ژنراتور با توجه به میزان شدت آشفتگی.....85

شکل 5-18: تاثیر تغییر ظرفیت اتصال کوتاه شبکه بر مقدار ولتاژ و جریان شبکه.....86

شکل 5-19: تاثیر تغییر ظرفیت اتصال کوتاه شبکه بر توان اکتیو و راکتیو ژنراتور.....86

شکل 5-20: تاثیر تغییر نسبت $\frac{X}{R}$ شبکه بر مقدار ولتاژ و جریان شبکه 87

شکل 5-21: تاثیر تغییر نسبت $\frac{X}{R}$ شبکه بر توان اکتیو و راکتیو ژنراتور.....88

شکل 5-22: مقدار ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 8 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....89

شکل 5-23: توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در سرعت باد 8 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....89

شکل 5-24: سرعت رتور ژنراتور در سرعت باد 8 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....90

شکل 5-25: مقدار ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 9 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....91

شکل 5-26: توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در سرعت باد 9 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....91

شکل 5-27: سرعت رتور ژنراتور در سرعت باد 9 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....92

شکل 5-28: مقدار ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 12 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....92

شکل 5-29: توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در سرعت باد 12 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....93

شکل 5-30: سرعت رتور ژنراتور در سرعت باد 12 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....93

شکل 5-31: مقدار ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 16 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....94

شکل 5-32: توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در سرعت باد 16 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....94

شکل 5-33: سرعت رتور ژنراتور در سرعت باد 16 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....95

شکل 5-34: مقدار ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 17 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....96

شکل 5-35: توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در سرعت باد 17 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....96

شکل 5-36: سرعت رتور ژنراتور و زاویه پره در سرعت باد 17 متر بر ثانیه با اعمال اثرات پره.....97

شکل 5-37: ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 10 متر بر ثانیه و شدت آشفتگی 10 درصد با اعمال اثرات پره.....98

شکل 5-38: توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در سرعت باد 10 متر بر ثانیه و شدت آشفتگی 10 درصد با اعمال اثرات پره..98

شکل 5-39: ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 12 متر بر ثانیه و شدت آشفتگی 10 درصد با اعمال اثرات پره.....98

شکل 5-40: توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در سرعت باد 12 متر بر ثانیه و شدت آشفتگی 10 درصد با اعمال اثرات پره..99
شکل 5-41: ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 15 متر بر ثانیه و شدت آشفتگی 10 درصد با اعمال اثرات پره.....99
شکل 5-42: توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در سرعت باد 15 متر بر ثانیه و شدت آشفتگی 10 درصد با اعمال اثرات پره..99
شکل 5-43: ولتاژ و جریان شبکه در سرعت باد 18 متر بر ثانیه و شدت آشفتگی 10 درصد با اعمال اثرات پره.....100
شکل 5-44: توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در سرعت باد 18 متر بر ثانیه و شدت آشفتگی 10 درصد با اعمال اثرات پره100
شکل 5-45: پروفیل سرعت باد متغیر و مقدار ولتاژ و جریان شبکه بدون اعمال شدت آشفتگی.....101
شکل 5-46: پروفیل سرعت باد متغیر و توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور بدون اعمال شدت آشفتگی.....102
شکل 5-47: پروفیل سرعت باد متغیر به‌همراه تغییرات سرعت رتور ژنراتور بدون اعمال شدت آشفتگی.....102
شکل 5-48: پروفیل سرعت باد متغیر و مقدار ولتاژ و جریان شبکه با اعمال شدت آشفتگی.....103
شکل 5-49: پروفیل سرعت باد متغیر و توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور با اعمال شدت آشفتگی.....103
شکل 5-50: پروفیل سرعت باد متغیر به‌همراه تغییرات سرعت رتور ژنراتور با اعمال شدت آشفتگی.....103
شکل 5-51: پروفیل باد و مقدار ولتاژ و جریان شبکه با اعمال تندباد و کاهش ناگهانی سرعت باد.....104
شکل 5-52: پروفیل باد و توان اکتیو تولیدی ژنراتور با اعمال تندباد و کاهش ناگهانی سرعت باد.....105
شکل 5-53: ولتاژ و جریان فازهای شبکه و توان اکتیو و راکتیو ژنراتور با وقوع خطای سه‌فاز به زمین.....106
شکل 5-54: ولتاژ و جریان فازهای شبکه و توان اکتیو و راکتیو ژنراتور با وقوع خطای دوفاز به زمین.....107
شکل 5-55: ولتاژ و جریان فازهای شبکه و توان اکتیو و راکتیو ژنراتور با وقوع خطای تکفاز به زمین.....108

فهرست اختصارات

BEM	Blade Element Momentum
BPF	Band Pass Filter
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
GSC	Grid Side Converter
HF	Harmonic Factor
IEC	International Electro-technical Commission
LPF	Low Pass Filter
LVRT	Low Voltage Ride Through
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PCC	Point of Common Coupling
PLL	Phase Lock Loop
PI	Proportional Integrator
RSC	Rotor Side Converter
PSS	Power System Stabilizer
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
PWM	Pulse Width Modulation
RMS	Root Mean Square
SCC	Short Circuit Capacity
SCR	Short Circuit Ratio

SFOC Stator Flux Orientation Control

SRF Synchronous Reference Frame

SVOC Stator Voltage Orientation Control

THD Total Harmonic Distortion

فصل اول

مقدمه

1 - 1 - مقدمه

1 - 1 - 1 - وضعیت استفاده از انرژی باد در جهان

ایرانیان باستان اولین کسانی بوده‌اند که از انرژی باد در آسیابهای بادی استفاده می‌کرده‌اند [1،2]. این نوع انرژی بزرگ‌ترین سهم تولید توان الکتریکی را بعنوان منبع تجدیدپذیر[1] داراست و تا اواخر سال 2011 تجهیزات نیروگاههای بادی با ظرفیت 238 گیگاوات در سراسر دنیا نصب شده است [3]. افزایش استفاده از منابع بادی برای تولید توان اثرات مثبت محیطی و منافع اقتصادی فراوانی را به‌همراه دارد [4]، از طرفی محدودیت منابع سوخت فسیلی و ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از آن باعث شده است که باد بعنوان یک انرژی پاک، نامحدود و رایگان مورد توجه بشر قرار گیرد.

در حال حاضر از منابع تجدیدپذیر به‌ویژه باد برای تولید توان از چند کیلووات تا چندین مگاوات بهره‌برداری می‌گردد [5،6]. پتانسیل قابل استحصال از انرژی باد در جهان در حدود یک میلیون مگاوات برآورد شده و از سال 1990 تا 2000 ظرفیت استفاده جهانی از آن برای شبکه‌های تغذیه‌شونده به‌طور متوسط در هر سه سال دو برابر گردیده است [7]. توربینهای بادی نصب‌شده در سال 2009 به‌میزان 31 درصد افزایش یافته و به ظرفیت 158 گیگاوات رسیده و این مقدار تا انتهای 2012 به 292 گیگاوات افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود تا انتهای 2015 به ظرفیت 425 گیگاوات برسد [7].

1-Renewable energy resourece

در حال حاضر کشورهای زیادی در دنیا از نیروگاههای بادی بهره‌برداری می‌کند که آمریکا با در اختیار داشتن بزرگترین نیروگاه مزرعه بادی[1] با ظرفیت 81/5 مگاوات با 627 توربین در مساحت 400 کیلومتر مربع در سال 2010 از کشورهای پیشتاز در این زمینه بوده است. برای کشور چین نیز پیش‌بینی شده است که تا آخر سال 2020 ظرفیت بهره‌برداری از 20 گیگاوات توان الکتریکی را بدست آورد [7]. از دیگر کشورهای مطرح در این زمینه می‌توان به هلند، آلمان، دانمارک، انگلستان، ایرلند، هند، ژاپن و... اشاره کرد. در ایران در مناطق منجیل در استان گیلان و خواف در استان خراسان تجهیزات نیروگاه بادی نصب و استفاده شده و در سال 1392 نیز در منطقه کهک در استان قزوین اولین فاز یک مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه بهره‌برداری گردیده است اما با توجه به پتانسیل فراوان باد در ایران نیاز به برنامه‌ریزی و مدیریت قدرتمند برای استفاده روز افزون از آن می‌باشد.

1 - 1 - 2 - کاربرد ژنراتور القایی دوسوتغذیه

از ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه[2] که به اختصار DFIG نامیده می‌شود در نیروگاههای بادی به‌وفور استفاده می‌شود. قابلیت‌های مهم این ژنراتورها موارد زیر را شامل می‌شود [7-9]:

- عملکرد مناسب در دامنه وسیع تغییرات سرعت باد
- بهره‌وری سودمند از سیستم
- توانایی تولید توان بیشتر از ظرفیت نامی
- حذف خازنهای جبرانساز توان راکتیو
- اصلاح ضریب توان

بنابراین این نوع ژنراتور نقش مهمی را در فرآیند تامین توان شبکه‌های متصل به نیروگاههای بادی ایفا می‌کند.

1 - 1 - 3 - اهمیت کیفیت توان در نیروگاههای بادی

مسئله کیفیت توان[3] در مهندسی برق بعنوان یکی از مباحث مهم با جنبه‌های گوناگون مطرح است [10-16]. در نیروگاههای بادی به‌علت تغییرات مداوم سرعت باد، وجود پدیده‌های آیرودینامیکی[4] و همچنین ساختار شبکه متصل به آن و شرایط بهره‌برداری از سیستم، توجه به

1-Wind farm
2-Doubly fed induction generator
3-Power quality
4-Aerodynamic

مشخصه‌های کیفیت توان و بهبود آن دارای اهمیت ویژه‌ای است و به‌منظور بهبود کیفیت توان نیاز به طراحی اصولی کنترل‌کننده‌ها و حلقه‌های کنترلی DFIG و ارزیابی پارامترهای شبکه متصل به آن می‌باشد. در مواردی نیز استفاده از تجهیزات بهبوددهنده کیفیت توان ضروری به‌نظر می‌رسد.

1 - 2 - مروری بر مطالعات انجام شده قبلی

همانطور که اشاره شد یکی از روشهای کلی برای بهبود کیفیت توان شبکه متصل به DFIG طراحی اصولی حلقه‌های کنترلی و کنترل‌کننده‌های ژنراتور می‌باشد. بر این اساس ابتدا باید اصول عملکرد DFIG بررسی و مطالعه گردد [5،17،18]. در مرجع [19] روش کنترلی پیشرفته برای ژنراتور پیشنهاد شده است که در آن کنترل‌کننده‌ها بر اساس روش LQG[1] طراحی شده است. در سیستم‌های قدرت شامل DFIG و ژنراتورهای سنکرون که به‌طور همزمان بهره‌برداری می‌شود جهت طراحی حلقه‌های کنترلی مبدل سمت رتور و بهبود کیفیت توان روش کنترل دمپینگ هماهنگ‌شده[2] بر اساس طراحی پایدارساز سیستم قدرت[3] (PSS) پیشنهاد شده است [20]. از جمله مطالعات اخیر که می‌تواند به حوزه ارزیابی کیفیت توان با وجود DFIG مربوط شود ارائه مدل جامع ژنراتور جهت ارزیابی میزان کفایت سیستم‌های قدرت[4] است که در مرجع [21] به آن پرداخته شده و همچنین در این مطالعه به مسائل قابلیت اطمینان[5] توجه گردیده است.

ارزیابی میزان کیفیت توان شبکه متصل به DFIG و تجزیه و تحلیل ولتاژ شبکه از دیدگاه کیفیت توان گامی موثر جهت انجام تمهیدات لازم برای ارتقاء کیفیت توان شبکه است [22-24]. در این بین تاثیر پدیده فلیکر ولتاژ به‌عنوان مهمترین مشکل کیفیت توان در نیروگاههای بادی همواره مورد توجه قرار گرفته است [25،26] به‌ویژه اگر فیدرهای شبکه به مزرعه‌های بادی بزرگ متصل شده باشد [27]. به‌منظور کاهش فلیکر استراتژی‌های مختلفی پیشنهاد شده که یکی از این روشها بر اساس تثبیت ضریب توان ژنراتور مطرح گردیده است [27،30،31]. در این روش همواره ضریب توان ژنراتور ثابت می‌باشد در حالیکه با تغییر شرایط

1- Linear quadratic gaussian
2-Coorinated damping control
3-Power system stabilizer
4-Adequacy assessment of power systems
5-Reliability

و نقطه کار سیستم و ورود تنظیم‌کننده‌های ولتاژ شبکه در بلند مدت سطح ولتاژ شبکه تغییر می‌کند و بنابراین ضریب توان ژنراتور نیز باید اصلاح گردد. روش دیگر کاهش فلیکر بر اساس کنترل توان راکتیو می‌باشد [32-34]. قابلیت‌های کنترل توان راکتیو در DFIG به‌طور مستقیم بر مشخصه‌های کیفیت توان شبکه موثر است و طراحی کنترل‌کننده‌های توان راکتیو ژنراتور طبق استراتژی‌های گوناگون بر اساس این روش از مباحث مهم پژوهشی است [35-37].

از دیگر عوامل بروز فلیکر، اغتشاشات سرعت باد می‌باشد که عمدتا شامل سایه برج و Wind shear است و اثرات پره نیز نامیده شده و در مراجع [38،39] به‌طور مفصل به آن پرداخته شده است. نتایج مربوط به تجزیه و تحلیل اثرات پره در مراجع [1،2] نیز ارائه و بررسی شده است. برای کاهش این اثرات استفاده از فیلتر میان‌گذر[1] در نیروگاههای بادی مبتنی بر ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم[2] (PMSG) بر اساس کنترل توان اکتیو [40] و کنترل سرعت [41] پیشنهاد گردیده که در این پایان‌نامه از آن به‌گونه‌ای دیگر برای DFIG استفاده شده است.

در سایر مراجع روشهای دیگری نیز به‌منظور کاهش فلیکر مطرح گردیده که جنبه عمومی کمتری داشته و صرفا در قالب یک مطالعه بیان شده است. از جمله این مطالعات کاهش اغتشاشات کیفیت توان با کنترل پهنای باند هیسترزیس در مبدلهای DFIG بوده است [42]. یکی دیگر از روشهای پیشنهادی، کنترل توان اکتیو و راکتیو به‌طور هماهنگ و با استفاده از کنترل همزمان توان راکتیو در مبدل سمت رتور و شبکه بوده است [43]. علاوه بر فلیکر، هموارسازی[3] پروفیل توان تولیدی و درنتیجه آن هموارسازی پروفیل ولتاژ شبکه نیز مربوط به مطالعات کیفیت توان است [44]. از دیدگاه دیگر استفاده از تجهیزات بهبوددهنده کیفیت توان در مطالعات مورد توجه قرار گرفته است [45،46]. این تجهیزات غالبا بر اساس استراتژی جبران توان راکتیو کار می‌کند ولی استفاده از آن هزینه‌های نسبتا زیادی را به سیستم تحمیل می‌نماید. از معروف‌ترین این تجهیزات STATCOM می‌باشد که از آن برای بهبود کیفیت توان استفاده شده است [46].

از جنبه دیگر جهت ارزیابی و بهبود کیفیت توان نیاز به اندازه‌گیری درست پارامترهای مختلف مانند ولتاژ و جریان شبکه، توان اکتیو و راکتیو تولیدی، ولتاژ لینک DC، سرعت توربین و ژنراتور و زاویه پره می‌باشد. در مرجع [47] اصول اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در مطالعات

1-Band pass filter
2-Permanent magnet synchronous generator
3-Smoothing

کیفیت توان برای یکی از بزرگ‌ترین مزارع بادی آسیا در هند به‌طور کامل بیان شده است. به‌منظور اندازه‌گیری شاخصهای کوتاه و بلند مدت فلیکر از فلیکرمتر استفاده می‌گردد که نحوه مدل‌سازی آن در محیط شبیه‌سازی گسسته نرم‌افزار Matlab[1] در مراجع [48،49] ارائه شده است. این مدل‌سازی بر اساس استاندارد IEC61000-4-15 انجام شده است [50].

در مراجع [51،52] سایر مسائل مربوط به کیفیت توان در نیروگاههای بادی شامل مروری بر سیستم‌های مبتنی بر انواع مختلف ژنراتورهای با توربین بادی و همچنین تعیین کدهای شبکه انجام شده است. در سایر مراجع بکار رفته در این مطالعه گروه دیگری از مسائل پیرامون موضوع بحث مانند طراحی کنترل‌کننده‌های DFIG، ارائه روشهای پیشنهادی دیگر جهت بهبود کیفیت توان، بررسی هارمونیکها و رزونانس در تاسیسات نیروگاههای بادی [53] و... بررسی شده است.

1 - 3 - اهداف پایان‌نامه

بهبود مشخصه‌های کیفیت توان برای شبکه تغذیه‌شونده از DFIG علاوه بر جلب رضایت بیشتر مشترکین شبکه باعث کاهش هزینه‌ها و خسارات ناشی از مشکلات کیفیت توان به‌ویژه برای تجهیزات حساس می‌باشد. اهداف این پایان‌نامه شامل موارد زیر می‌باشد:

1- بررسی مشکلات کیفیت توان برای شبکه متصل به DFIG با مطالعه جنبه‌های گوناگون
2- مطالعه راهکارهای مطرح‌شده در مقالات و مراجع مربوطه تاکنون
3- ارائه روش پیشنهادی به‌منظور کاهش فلیکر و هموارسازی پروفیل ولتاژ بر اساس طراحی کنترل‌کننده‌ها و حلقه‌های کنترلی ژنراتور و طراحی فیلتر میان‌گذر جهت کاهش مشکلات کیفیت توان ناشی از اثرات پره
4- انجام شبیه‌سازیهای جامع برای سیستم تست و نتیجه‌گیری کلی از مطالعه

1-Discrete matlab simulink