دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

شماره پایان نامه : 9341301

رساله دکتری در رشته مهندسی برق

گرایش قدرت

عنوان :

اتصال منابع DG به شبکه با اینورترهای چند سطحی با قابلیت جبران سازی جریان های هارمونیکی بار

استاد/اساتید راهنما:

دکترمحمود جورابیان

استاد/اساتید مشاور:

دکترجواد شکرالهی مغانی

نگارنده :

مزدک عبادی

تیر ماه سال 1393

چکیده

نام خانوادگی : عبادی	**نام:** مزدک	**شماره دانشجویی :** 8741301

عنوان پایان نامه :

اتصال منابع DG به شبکه با اینورترهای چند سطحی با قابلیت جبران سازی جریان های هارمونیکی بار

استاد/ اساتیدراهنما: دکتر محمود جورابیان

استاد/ اساتید مشاور: دکتر جواد شکرالهی مغانی

درجه تحصیلی: دکتری phd	**رشته:** مهندسی برق	**گرایش:** قدرت
دانشگاه : شهید چمران اهواز	**دانشکده:** مهندسی	**گروه :** مهندسی برق

تاریخ فارغ التحصیلی : **تعداد صفحه:**

کلید واژه ها : منابع تولید پراکنده، اینورترهای چند سطحی، جبران سازی هارمونیکی، کنترل منبع ولتاژی اینورتر، کنترل منبع جریانی اینورتر

منابع تولید پراکنده (DG) به استفاده از واحدهای مولد ولتاژ و توان کوچکی اطلاق می شود که در نقاط استراتژیک شبکه قدرت یا مکان هایی که بار در آنها قرار گرفته بکار گرفته می شوند. این منابع می توانند بصورت جدا از شبکه به کار گرفته شوند و نیازهای محلی بار را تامین کنند یا اینکه بصورت یک منبع تغذیه به شبکه وصل شوند و توان تولیدی خود را به شبکه تزریق کنند. منبع تغذیه DG طیف وسیعی از منابع، از منابع مبتنی بر سوخت های فسیلی گرفته تا منابع تجدیدپذیر انرژی و یا حتی گرمای تلف شده منابع انرژی دیگر را شامل می شوند.

در این رساله تلاش شده به موضوع اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه قدرت از طریق اینورترهای چند سطحی پرداخته شود. با توجه به انعطاف پذیری مناسب ولتاژ تولیدی اینورترهای چند سطحی، می توان از آنها -وقتی منبع تولید پراکنده در کنار یک مجموعه بار غیر خطی بنا شود- برای جبران بار هارمونیکی در کنار تزریق توان به شبکه استفاده کرد. به این ترتیب موضوع انتخاب شده برای رساله، اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه قدرت به کمک اینورترهای چند سطحی، با قابلیت جبران جریان های هارمونیکی بار است.

در این رساله پس از یک مقدمه پیرامون موضوع تحت مطالعه و نیز بررسی برخی از مطالعات پیشین مرتبط با بحث، در نهایت اینورتر چند سطحی متوالی به دلیل مجزا بودن ولتاژ سطوح مختلف و قابلیت کنترل هر چه بهتر ولتاژ DC سطوح اینورتر، وقتی مدار تحت بار قرار می گیرد، به عنوان مناسب ترین ساختار برای موضوع این رساله انتخاب شده و ادامه محتوای رساله بطور کامل بر اساس این انتخاب پیش رفته است. همچنین با مروری به ساختارها و عملکرد اینورترها می توان دریافت، اینورترهای بدون ترانس که تنها بواسطه یک امپدانس به شبکه متصل می شوند، وقتی هدف جبرانسازی بار غیرخطی باشد، گزینه بهتری هستند. زیرا ترانس جلوی عبور برخی هارمونیک ها را می گیرد یا بر دامنه آنها تاثیر می گذارد.

روند طراحی بخش های مختلف مدار اینورتر چند سطحی متوالی، به نحوی که برای انجام وظایف تعریف شده در این رساله مناسب باشد در ادامه شرح داده شده است. سپس یک نمونه از چنین محاسباتی برای طراحی یک نمونه ولتاژ پایین و کم توان از این مدار شرح داده شده و مقادیر مناسب برای اجزای اصلی مدار مورد نظر محاسبه شده اند. در ادامه یک طرح اصلاح شده برای اینورتر چند سطحی بدون ترانس پیشنهاد شده که برخی امپدانس های به کار رفته در آن بطور دائم در مسیر جریان اینورتر نیستند. به این ترتیب از امپدانس کوچکی در مسیر اتصال به شبکه بهره برده می شود که به جبرانسازی بارهای غیر خطی کمک می کند، در عین حال امپدانس های اضافی در مقاطعی به مسیر جریان آمده و تغییرات جریان مدار را محدود می کنند. نحوه طراحی اجزای این مدار و حالات مختلف عملکردی آن نیز شرح داده شده است. نتایج شبیه سازی ها و آزمایشات عملی روی این مدار نشان می دهد نسبت به اینورتر چند سطحی بدون ترانس رایج، برای کاربرد در موضوع این رساله عملکرد بهتری دارد.

در فصل چهارم همچنین الگوریتم کلیدزنی مناسب برای اینورتر تحت مطالعه مورد بحث قرار گرفته است. در جایی که هدف تزریق توان اکتیو و جبرانسازی بار غیرخطی بطور همزمان باشد، همانند آنچه بعنوان موضوع این رساله تعریف شده است، به نظر می رسد الگوریتم کلیدزنی اینورتر نیز باید ترکیبی از روش های منبع ولتاژی و منبع جریانی باشد. یک روش مناسب برای چنین هدفی، تحت عنوان روش جدول جستجو، در این رساله پیشنهاد شده و کلیات آن شرح داده شده است. اساس این روش ساخت مرجع ولتاژ اینورتر بر اساس مرجع جریان آن است، که می تواند ترکیبی از

جریان مولفه اصـلی و نیز هارمونیک های جریان بار باشـد. در نهایت کلیدزنی اینورتر بر اسـاس ولتاژ مرجع صـورت می گیرد که نسبت به روش های منبع جریانی، تعداد کلیدزنی در مدار را بسیار پایین می آورد.

شـبیه سـازی های نرم افزاری این روش و نیز آزمایشـات عملی آن که در فصـل پنجم آورده شده اند، نشان می دهند این روش می تواند با کلیدزنی بسـیار کمتر، هم در حالت تزریق توان خالص و هم در زمان جبرانسـازی بار غیرخطی مرجع ولتاژ و جریان تعیین شـده برای آنرا به خوبی دنبال کند. البته این روش برای پیاده سـازی نیاز به ولتاژ و توان های متفاوت از پل های مختلف اینورتر چند سـطحی دارد که محاسـبات مربوط به آن در رسـاله شرح داده شده است.

تقدیم به مادر و پدرم که چون شمعی فروزان مرا در مسیر پر پیچ و خم زندگی راهنما بوده اند.

و تقدیم به همسر عزیز و برد بارم.

بر خود لازم می دانم از زحمات جناب آقای دکتر محمود جورابیان در نقش استاد راهنما، و نیز جناب آقای دکتر جواد شکرالهی مغانی، به عنوان مشاور این رساله نهایت تقدیر و تشکر را بیان کنم.

همچنین از جناب آقایان دکتر رضا کیانی نژاد و سید قدرت اله سیف السادات، اساتید کمیته هادی این رساله نیز به دلیل توجهاتشان سپاسگذارم.

جناب آقای دکتر محسن صنیعی و نیز جناب آقای دکتر داود عرب خابوری نیز در نقش داوران داخلی و خارجی این رساله را کامل تر و رسا تر نمودند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه 1
1-1- استفاده از اینورترها در اتصال منابع DG به شبکه 2
2-1- معرفی موضوع رساله و ترکیب فصل های آن 4

فصل دوم: مرور منابع 7
1-2- DG های مبتنی بر اینورتر 8
2-2- کاربرد اینورتر های چند سطحی در نیروگاه های بادی 9
3-2- اینورتر ها و سلول های خورشیدی 12
4-2- کاربرد اینورترهای چند سطحی در درایو موتورها و خودروهای الکتریکی 14
5-2- کیفیت توان اینورتر ها و استفاده از اینورترهای چند سطحی در کنترل کننده های کیفیت توان 19
6-2- اینورترهای چند سطحی 24
7-2- اینورترهای چند سطحی با یک منبع تغذیه DC مشترک 29
8-2- اینورترهای بدون ترانس 34
9-2- استفاده از منابع تولید پراکنده های مبتنی بر اینورتر برای جبران همزمان بازهای غیر خطی ... 41

فصل سوم: مبدّل های قدرت چند سطحی 46
1-3- ساختار مبدل های چند سطحی قدرت 48
3-1-1- پُل های H متوالی 49
3-1-2- اینورتر چند سطحی مهار دیودی 51
3-1-3- اینورتر چند سطحی با خازن گردان 53
2-3- طراحی اینورتر سه فاز برای اتصال منابع DG به شبکه با قابلیت جبران بارهای هارمونیکی 56
3-2-1- تغذیه مدار 57
3-2-2- طراحی لینک dc 61
3-2-3- طراحی فیلتر خروجی 62
3-2-4- محاسبه بازده اینورتر 66
3-2-5- طراحی قسمت های حفاظتی مدار 72

فصل چهارم: مبدل چند سطحی بهبود یافته پیشنهادی و الگوریتم کلیدزنی پیشنهادی VLUT 78
4-1- طرح مبدل بهبود یافته پیشنهادی این رساله 78
4-2- روش های کنترل منبع ولتاژی 82
4-3- روش های کنترل منبع جریانی 85
4-4- الگوریتم پیشنهادی 87
4-4-1- تولید ولتاژ مرجع 88
4-4-2- محاسبه ولتاژهای لینک های DC در طبقات مختلف اینورتر 92
4-4-3- محاسبه ظرفیت خازن های لینک های DC 95
4-4-4- توان دریافتی از منبع تولید پراکنده 97

فصل پنجم: نتایج شبیه سازی و آزمایشات عملی 99
5-1- روش های منبع ولتاژی 99
5-1-1- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی 101
5-1-2- مدولاسیون پهنای پالس ثابت 107
5-1-3- مدولاسیون فضای برداری 109
5-1-4- روش حذف انتخابی هارمونیک ها (SHEPWM) 113
5-2- روش های منبع جریانی 115
5-3- بررسی روش پیشنهادی در این رساله 123
5-4- مدار اینورتر چند سطحی بهبود یافته 130
5-5- نتایج آزمایشات عملی 141
5-5-1- روش کلید زنی VLUT 141
5-5-2- مدار اینورتر چندسطحی اصلاح شده 146
5-6- مرور نتایج 150

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات 153
مقالات استخراج شده از این رساله 160
فهرست منابع 162
ضمیمه A: طراحی مدار مورد استفاده برای این رساله 173
ضمیمه B: محاسبه امپدانس های اتصال دهنده و محدود کننده 179

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل 2-1: تغذیه اینورتر چند سطحی تکفاز به کمک ژنراتور سه فاز [5] 10
شکل 2-2: تغذیه همزمان لینک DC بوسیله دو منبع عمود بر هم [6] 11
شکل 2-3: اینورتر چند سطحی با ترانس های سری شده در سمت خروجی [11] 14
شکل 2-4: تغذیه دوطرفه سیم پیچ های موتور سه فاز با دو اینورتر 3 و 8 سطحی [17] 15
شکل 2-5: تغذیه دو طرفه استاتور موتور سه فاز با اینورترهای دو و چند سطحی [18] 15
شکل 2-6: ماژول های اینورتری برش خورده با دیود [20] 17
شکل 2-7: اینورترهای چندسطحی مبتنی بر رگولاتور تقویت کننده پیشنهدی در [23] 19
شکل 2-8: استفاده از ترانس چند سیم پیچ با اتصال Δ-ZYZ برای بهبود کیفیت توان اینورترها [25] 20
شکل 2-9: اینورترهای چند سطحی متوالی برمبنای اینورترهای کاهنده دوتایی [40] 25
شکل 2-10: اینورتر های چند سطحی با استفاده از واحد های موسوم به بسته های U شکل [47] 26
شکل 2-11: اینورتر چند سطحی متوالی با حداقل تعداد کلید ها به ازای تعداد پله های ولتاژ [54] 28
شکل 2-12: تغذیه دو سویه موتور سه فاز با اینورترهای چند سطحی برش خورده با دیود [60] ... 30
شکل 2-13: اینورتر چند سطحی با یک منبع تغذیه و دو بانک خازنی مجزا [61] 31
شکل 2-14: استفاده از ترانس های سه فاز برای ایزوله سازی خروجی اینورترهای چند سطحی [62] 32
شکل 2-15: تغذیه موتور سه فاز از یک مجموعه باطری واحد در خودروی الکتریکی [63] 33
شکل 2-16: اینورتر چند سطحی با حداقل تعداد کلید [65] 35
شکل 2-17: برخی طرح های اینورتر 3 سطحی بدون ترانس با بازده بالا [68] 36
شکل 2-18: اینورتر چند سطحی سه فاز با نقطه خنثای برش خورده با دیود [78] 38
شکل 2-19: اتصال مثبت-منفی با نقطه خنثای برش خورده با دیود [79] 38
شکل 2-20: اینورتر سه سحطی با نقطه خنثای برش خورده با دیود و دو اندوکتانس مجزا برای دو نیم سیکل [80] 39
شکل 2-21: اتصال بدون ترانس H5 بهبود یافته [81] 39
شکل 2-22: اینورتر بدون ترانس چند سطحی با یک منبع واحد و دو بانک خازنی [82] 40
شکل 2-23: اتصال بدون ترانس سلول خورشیدی به شبکه با اینورتر بهبود یافته بدون خازن برش خورده [83] 40
شکل 2-24: اینورتر سه سطحی سه فاز با لینک DC نوع Z-Source [84] 40

شکل 2-25: کنترل DG مبتنی بر اینورتر برای جبران بارهای غیر خطی در حالت منبع جریانی [89] 42
شکل 2-26: پشتیبانی از UPQC با DG برای بهبود کیفیت توان بارهای غیرخطی (10-2-2) 44
شکل 3-1: ساختار مدار یک فاز از اینورتر چند سطحی متوالی 50
شکل 3-2: ساختار اینورتر سه فاز شش سطحی مهار دیودی 52
شکل 3-3: ساختار اینورتر سه فاز شش سطحی با خازن گردان 54
شکل 3-4: تغذیه پل های اینورتر متوالی با سلول های خورشیدی مجزا 57
شکل 3-5: تغذیه پل های اینورتری فازهای مختلف با منبع مشترک 58
شکل 3-6: تغذیه پل های اینورتری فازهای مختلف با منبع مشترک وقتی پل ها در وضعیت مشابهی باشند 60
شکل 3-7: تغذیه پل های اینورتری فازهای مختلف با منبع مشترک وقتی پل ها در وضعیت متفاوتی باشند 60
شکل 3-8: دو طرح اصلی فیلتر چیشف 63
شکل 3-9: طرح فیلتر LCL میرا شده با RC 64
شکل 3-10: طرح فیلتر LLCL 65
شکل 3-11: سلف های تیروئیدی مناسب برای اوندوکتانس های تا 5 mH و جریان 5 A 68
شکل 3-12: هسته های ورقه سیم پیچی شده مناسب برای تهیه اندوکتانس های بزرگ جریان بالا 69
شکل 3-13: نمودار تغییرات جریان – ولتاژ کلید نیمه هادی ماسفت IRF640 69
شکل 3-14: تغییرات ولتاژ – جریان کلید های نیمه هادی قدرت و تلفات ناشی از کلیدزنی 71
شکل 3-15: تاخیر روشن و خاموش شدن کلیدهای نیمه هادی قدرت 74
شکل 3-16: طرح های مختلف مدارهای اسنابر a) اسنابر RC b) طرح RCD شارژ و دشارژ c) طرح RCD با تخلیه سریع d) طرح اسنابر C d) طرح اسنابر RCD [105] 76
شکل 4-1: طرح پیشنهادی اینورترهای چندسطحی متوالی بدون ترانس بهینه شده 79
شکل 4-2: a) منحنی عملکرد کنترل کننده هیسترزیس تک قطبی و دو قطبی b) تعقیب جریان مرجع توسط جریان اینورتر توسط کنترل کننده هیسترزیس 86
شکل 4-3: مدار معادل اتصال بدون ترانس منبع تولید پراکنده به شبکه قدرت از طریق اینورترهای چند سطحی متوالی 89
شکل 4-4: بلوک دیاگرام کنترل اینورتر در طرح پیشنهادی VLUT 91
شکل 4-5: دیاگرام برداری ولتاژها در سمت خروجی اینورتر طبق شکل 4-3 93
شکل 5-1: نمایی از سیستم شبیه سازی شده در Matlab/Simulink 101
شکل 5-2: عملکرد اینورتر چند سطحی با کلیدزنی SPWM با مدولاسیون چند گانه تک قطبی 104
شکل 5-3: جریان تولیدی اینورتری که به روش نشان داده شده در شکل 5-2 کلیدزنی می شود 105
شکل 5-4: SPWM چندسطحی با مدولاسیون یکسان و فرکانس های حامل متفاوت 106
شکل 5-5: جریان تولیدی اینورتر چند سطحی که به روش نشان داده شده در شکل 5-4 کلیدزنی می شود 107
شکل 5-6: منحنی تغییرات دامنه هارمونیک اول بر حسب k در روش مدولاسیون پهنای پالس ثابت 108

شکل 5-7: منحنی تغییرات THD ولتاژ خروجی بر حسب k در روش مدولاسیون پهنای پالس ثابت 108
شکل 5-8: عملکرد روش مدولاسیون پهنای پالس ثابت از دید خروجی 109
شکل 5-9: بردارهای فضایی برای هر فاز از اینورتر چند سطحی 111
شکل 5-10: ولتاژ تولیدی اینورتر 5 سطحی با روش کلیدزنی SVPWM 112
شکل 5-11: ولتاژ تولیدی اینورتر 5 سطحی با مدولاسیون SVPWM با پارامترهای طراحی شده در این رساله 112
شکل 5-12: خروجی اینورتر چند سطحی که با روش نشان داده شده در شکل 5-11 کنترل می شود 113
شکل 5-13: شمای کلی شکل موج ولتاژ اینورتر چند سطحی با مدولاسیون SHEPWM 114
شکل 5-14: ولتاژ تولیدی اینورتر چند سطحی با روش SHEPWM با زوایای آتش بهینه شده 115
شکل 5-15: بلوک دیاگرام روش کنترل جبران ساز هارمونیکی جریان بار غیرخطی 116
شکل 5-16: مرجع جریان تهیه شده برای جبرانسازی بار غیر خطی، در کنار جریان اصلی بار 117
شکل 5-17: جریان تولیدی اینورتر بر اساس مرجع جبرانسازی بار غیر خطی، برای هیسترزیس تک قطبی و دو قطبی ... 119
شکل 5-18: ولتاژ خروجی اینورتر در زمان جبرانسازی بار غیر خطی بر اساس هیسترزیس جریانی تک قطبی و دو قطبی 120
شکل 5-19: عملکرد جبرانسازی اینورتر چند سطحی با هیسترزیس تک قطبی 121
شکل 5-20: اثر افزایش عرض باند هیسترزیس بر کیفیت جبرانسازی بار غیرخطی در هیسترزیس تک قطبی 122
شکل 5-21: ولتاژ و جریان اینورتر در کنار مرجع آنها در روش VLUT 124
شکل 5-22: عملکرد روش VLUT در جبران سازی بار غیرخطی 122
شکل 5-23: ولتاژ پل های مختلف اینورتر چند سطحی در کنار ولتاژ نهایی خروجی، در جبرانسازی بار غیرخطی به روش VLUT 126
شکل 5-24: ولتاژ پل های مختلف اینورتر در کنار ولتاژ خروجی نهایی، در زمان تزریق توان اکتیو به روش VLUT .. 127
شکل 5-25: عملکرد اینورتر چند سطحی در تزریق توان اکتیو با کلیدزنی به روش VLUT 128
شکل 5-26: ولتاژ پل های مختلف اینورتر در کنار جریان تزریقی هر یک از آنها، در حالت تزریق ماکزیمم توان اکتیو . 129
شکل 5-27: عملکرد مدار اینورتر چند سطحی با امپدانس اتصال دهنده یکپارچه و کوچک، در حالت تزریق ماکزیمم توان اکتیو 133
شکل 5-28: عملکرد مدار اینورتر چند سطحی با امپدانس اتصال دهنده یکپارچه و بزرگ، در حالت تزریق ماکزیمم توان اکتیو 134
شکل 5-29: عملکرد مدار اینورتر چند سطحی اصلاح شده با امپدانس اتصال دهنده یکپارچه و کوچک و امپدانس های محدودکننده در پل های مختلف، در حالت تزریق ماکزیمم توان اکتیو 135
شکل 5-30: عملکرد مدار اینورتر چند سطحی با امپدانس اتصال دهنده یکپارچه و کوچک، در حالت جبران بار غیر خطی 136
شکل 5-31: عملکرد مدار اینورتر چند سطحی با امپدانس اتصال دهنده یکپارچه و بزرگ، در حالت جبران بار غیر خطی 137
شکل 5-32: عملکرد مدار اینورتر چند سطحی با امپدانس اتصال دهنده یکپارچه و بزرگ، در حالت جبران بار غیر خطی 138

شکل 5-33: جریان امپدانس های محدودکننده پل های مختلف در هر دو حالت بهره برداری مدار a) تزریق توان اکتیو ماکزیمم b) جبرانسازی بار غیرخطی 139
شکل 5-34: نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده 141
شکل 5-35: ولتاژ خروجی اینورتر در روش VLUT در تزریق ماکزیمم توان 142
شکل 5-36: جریان خروجی اینورتر در کنار ولتاژ PCC در روش VLUT به ازای تزریق ماکزیمم توان اکتیو 143
شکل 5-37: ولتاژ تولیدی پل های مختلف اینورتر در روش VLUT به ازای تزریق ماکزیمم توان اکتیو 143
شکل 5-38: شکل موج جریان بار غیرخطی و طیف هارمونیکی آن (20 dB/div) 144
شکل 5-39: شکل موج جریان اینورتر در حالت جبران سازی و جریان سمت شبکه پس از جبران سازی اکتیو و پسیو به همراه طیف هارمونیکی (20 dB/div) 145
شکل 5-40: ولتاژ خروجی پل های مختلف اینورتر در جبران سازی بار غیر خطی به روش VLUT 146
شکل 5-41: عملکرد مدار اینورتر چند سطحی با امپدانس های طراحی شده تحت بار خطی (تزریق توان اکتیو) 148
شکل 5-42: عملکرد مدار اینورتر چند سطحی با امپدانس های طراحی شده تحت بار غیر خطی (جبرانسازی هارمونیکی) تمامی طیف های هارمونیکی 20 dB/div 149

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول 3-1: تمام سطوح ولتاژ یک اینورتر شش سطحی مهار شده با دیود و وضعیت کلیدها برای هرولتاژ 64
جدول 3-2: فهرست سطوح ولتاژ تولیدی در اینورتر شش سطحی با خازن گردان و وضعیت کلیدها برای تولید هر سطح ولتاژ 69
جدول 4-1: حالات مختلف کلیدزنی اینورتر چند سطحی طراحی شده و ولتاژ تولیدی در هر حالت 91
جدول 5-1: خلاصه نتایج شبیه سازی ها برای انواع روش های کنترل منبع ولتاژی اینورتر چند سطحی 128
جدول 5-2: خلاصه نتایج شبیه سازی ها برای انواع روش های کنترل منبع جریانی اینورتر چند سطحی 129
جدول 5-3: خلاصه نتایج شبیه سازی مدار اینورتر چند سطحی متوالی بهبود یافته، در کنار اینورتر بدون ترانس رایج 136
جدول 5-4: خلاصه مشخصات نمونه مدار آزمایشگاهی تهیه شده 137

فصل اول:

مقدمه

منابع تولید پراکنده (DG[1]) به استفاده از واحدهای مولد ولتاژ و توان کوچکی اطلاق می شود که در نقاط استراتژیک شبکه قدرت یا مکان هایی که بار در آنها قرار گرفته به کار گرفته می شوند. این منابع می توانند به صورت جدا از شبکه به کار گرفته شوند و نیازهای محلی بار را تامین کنند یا این که به صورت یک منبع تغذیه به شبکه وصل شوند و توان تولیدی خود را به شبکه تزریق کنند. منبع تغذیه DG طیف وسیعی از منابع، از منابع مبتنی بر سوخت های فسیلی گرفته تا منابع تجدیدپذیر انرژی و یا حتی گرمای تلف شده منابع انرژی دیگر را شامل می شوند. با توجه به تجهیزات به کار گرفته شده، توان تولیدی این منابع از چند ده وات تا چند مگاوات متغیر است. این منابع می توانند تمام شرایط مورد نیاز انرژی بار را تامین کنند. همین طور اگر به شبکه انتقال یا توزیع متصل شوند می توانند انرژی خود را به مدیریت شبکه یا یک کاربر سوم بفروشند.

در حال حاضر منابع تولید پراکنده انرژی هم به جهت افزایش ایمنی سیستم تامین انرژی با کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و هم به جهت کاهش تولید گازهای گلخانه ای توجهات زیادی را در سطح جهان به خود جلب کرده اند.

[1] Distributed Generation

1-1- استفاده از اینورترها در اتصال منابع DG به شبکه

از نظر نوع ولتاژ تولیدی، تمامی منابع تولید پراکنده را می توان به دو نوع منابع dc و ac تقسیم کرد. برای مثال سلول های خورشیدی و یا پیل های سوختی از جمله پرکاربرد ترین منابع dc تولید پراکنده، و ژنرتورهای سه فاز و تکفاز (مثلا در دیزل-ژنراتورها و یا در توربین های بادی) از جمله شناخته شده ترین منابع ac تولید پراکنده هستند. با توجه به ماهیت مصرف کننده هایی که از این منابع تغذیه خواهند شد، بسیاری از این منابع از یک اینورتر تکفاز یا سه فاز به عنوان واسط برای اتصال به بار یا به شبکه استفاده می کنند. در موارد معدودی، مثلاً جایی که خروجی سلول های خورشیدی برای تغذیه مصرف کننده های dc استفاده شود نیازی به استفاده از اینورترها نخواهد بود. اما در شرایطی که خروجی DG باید به شبکه برق متصل شود تقریباً تمامی انواع این منابع برای این اتصال به یک اینورتر نیاز دارند (ژنراتورهای القایی و دیزل-ژنراتورهایی که قابلیت حفظ سرعت محور را دارند شاید تنها منابع پرکاربرد DG باشند که بطور مستقیم به شبکه وصل می شوند، که این خود از مزایای اصلی آنهاست).

انواع اتصالات اینورترهای تکفاز و سه فاز برای اتصال منابع DG از نوع dc (مثل سلول های خورشیدی) به شبکه معرفی شده است که برخی از آنها در فصول آینده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در مورد منابع ac نیز، وقتی ولتاژ تولیدی از لحاظ دامنه یا فرکانس، قابل تزریق بی واسطه به شبکه سراسری نباشد، اینورترها برای تبدیل ولتاژ خروجی منبع DG به ولتاژ ac با دامنه و فرکانس ثابت و فاز قابل تنظیم (برای تزریق حداکثری توان) به کار گرفته می شوند. اما کاربرد اینورترها در DG با مسائلی همراه است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می شود:

- هزینه تمام شده اینورترها ممکن است زیاد باشد. بویژه وقتی سطح ولتاژ و جریان کمی بالا رود ادوات به کار رفته در اینورترها به صورت تصاعدی گران تر می شوند. برای منابع بزرگ که سطح بالایی از انرژی را تولید می کنند ممکن است هزینه اضافی ناشی از کاربرد اینورتر چندان چشمگیر نباشد اما در مورد منابع کوچک با توان پایین ممکن است این هزینه باعث شود کاربرد DG صرفه اقتصادی خود را از دست بدهد.

- اینورترها در ساختار خود از ادوات کلیدزنی نیمه هادی استفاده می کنند. به این ترتیب ولتاژ خروجی در بهترین حالت آلوده به تعدادی هارمونیک های مرتبه بالاست که برای جلوگیری از تزریق آنها نیاز به فیلترگذاری در خروجی اینورتر وجود خواهد داشت. گرچه به کمک برخی الگوریتم های کنترلی می توان دامنه هارمونیک های مرتبه پایین را تا حد قابل قبولی کاهش داد و به این ترتیب برای فیلتر کردن هارمونیک های مرتبه بالا نیز به فیلتر بزرگی نیاز نخواهد بود.

- در اکثر موارد خروجی اینورتر بعد از فیلتر شدن با واسطه یک ترانسفورماتور به شبکه متصل می شود. این ترانسفورماتور علاوه بر تغییر سطح ولتاژ (در صورت نیاز) دو وظیفه مهم دیگر را نیز بر عهده دارد. اول این که ترانسفورماتور بویژه در حالت سه فاز می تواند برخی از هارمونیک های مرتبه بالای خروجی اینورتر را حذف کند یا کاهش دهد تا از تزریق آنها به شبکه جلوگیری شود. از سوی دیگر ترانسفورماتور باعث مجزا شدن اینورتر و منبع DG از شبکه شده و امنیت منبع DG را در زمان بروز خطا در شبکه افزایش می دهد. اما کاربرد ترانسفورماتور باعث افزایش ابعاد، وزن و قیمت تمام شده DG نیز می شود.

- کاربرد ترانسفورماتور باعث می شود هماهنگ کردن زاویه فاز ولتاژ خروجی اینورتر با ولتاژ شبکه کمی مشکل شود. به این ترتیب ماکزیمم کردن توان خروجی اینورتر نیز چالش برانگیز خواهد بود. از طرفی ممکن است ترزیق برخی هارمونیک های جریانی فرکانس پایین به منظور جبران بارهای غیر خطی جزء اهداف کاربرد DG باشد. در اینصورت کاربرد ترانسفورماتور به دلیل اثری که روی هارمونیک های جریان می گذارد باعث مختل شدن این هدف خواهد شد. اتصال بدون ترانسفورماتور اینورترها به شبکه که صرفاً بواسطه یک امپدانس مناسب صورت می گیرد با هدف حداقل کردن هزینه و نیز کنترل تاثیر اتصال بر هارمونیک های جریان در سال های اخیر پیشنهاد شده است.

2-1- معرفی موضوع رساله

همان طور که پیشتر گفته شد منابع تولید پراکنده معمولاً در نزدیکی محل مصرف کننده نصب می شوند. نوع مصرف کننده می تواند از مصارف خانگی مثل مصارف روشنایی و گرمایشی تا مصارف صنعتی که می تواند شامل بارهای غیر خطی همچون مدارهای الکترونیک قدرت باشد متغیر است. بنابراین دور از ذهن نیست که منابع DG در کنار بارهای غیر خطی قرار بگیرند که شامل هارمونیک های مرتبه پایین جریان باشند که می تواند به شدت باعث اشغال شدن ظرفیت ترانسفورماتور های شبکه و محدود شدن سطح جریان هارمونیک اصلی و توان اکتیو شبکه شود. با توجه به این که فیلتر کردن هارمونیک های مرتبه پایین با فیلترهای پسیو قدری دشوار است، استفاده از فیلترهای فعال برای حل این مشکل پیشنهاد شده است. این فیلترها جریان های هارمونیک بالایی از خود شبکه برای شارژ خازنهایشان می گیرند و سپس آنرا در قالب جریان های هارمونیک مرتبه پایین به صورتی کنترل شده به شبکه تزریق می کنند تا هارمونیک های مرتبه پایین بار را خنثی کنند. البته واضح است استفاده از فیلترهای فعال مشکل هارمونیک های مرتبه بالا را افزایش می دهد که برای فیلتر کردن آنها پیش از عبورشان از ترانسفورماتور شبکه، می توان از فیلترهای پسیو استفاده کرد.

در جاییکه منابع تولید پراکنده در کنار بارهای غیر خطی (مثل کارخانجات) قرار گرفته باشند، می توان همزمان از آنها برای جبران هارمونیک های برجسته مرتبه پایین بار استفاده کرد. گرچه این امر بخشی از جریان موثر DG را اشغال می کند و قابلیت تزریق توان اکتیو را کاهش می دهد. اما برای بارهای به شدت غیر خطی، ممکن است استفاده از این روش نسبت به حالتی که در کنار DG از فیلترهای فعال به صورت جداگانه بهره برده شود اقتصادی تر باشد.

در این رساله موضوع استفاده از منابع تولید پراکنده برای جبران همزمان بارهای غیر خطی در کنار تزریق توان اکتیو به شبکه، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این امر از طریق اعمال روش کنترلی مناسب روی اینورتری که برای اتصال DG به شبکه به کار گرفته می شود میسر خواهد شد. با توجه به این که در اینورترهای چند سطحی، کنترل مشخصه های ولتاژ و جریان خروجی بویژه در بحث هارمونیکی بسیار دقیق

تر خواهد بود، از این مدارها به عنوان واسطی بین DG و شبکه استفاده خواهد شد. نظر به این که ترانسفورماتور های اتصال دهنده DG به شبکه، چنانکه پیشتر اشاره شد، روی هارمونیک های ولتاژ و جریان خروجی تاثیر گذارند، اینورترهای بدون ترانسفورماتور برای رسیدن به هدف این رساله گزینه مناسب تری به نظر می رسند.

به این ترتیب اهداف اصلی این رساله را می توان به شرح زیر بیان کرد:

- بررسی طرح های اینورترهای سه فاز به هدف انتخاب مناسب ترین طرح جهت کاربرد در موضوع رساله.

- بررسی کاربرد های اینورتر های با و بدون ترانسفورماتور به هدف انتخاب اینورتر چند سطحی با یا بدون ترانسفورماتور جهت اتصال منابع DG به شبکه با امکان جبران بارهای غیرخطی.

- طراحی اجزای مختلف مدار انتخاب شده بر اساس قابلیت جبران سازی بار هارمونیکی و تزریق همزمان توان اکتیو.

- ارائه طرح بهبود یافته اینورترهای چند سطحی بدون ترانسفورماتور با جایگزینی ترانسفورماتور با چند امپدانس کوچک و مناسب با هدف حداقل کردن هزینه در عین حفظ کارآیی.

- ارائه طرح کنترلی اینورتر چند سطحی بدون ترانسفورماتور با هدف تزریق ماکزیمم توان اکتیو ممکن در عین جبران چند هارمونیک شاخص مرتبه پایین بار.

1-3- ساختار رساله

- فصل دوم به بررسی مقالات منتشر شده در معتبرترین مجلات علمی بین المللی پیرامون موضوع منابع تولید پراکنده که بر اساس اینورتر کار می کنند و نیز پیرامون ساختارها و کابرد های اینورترهای چند سطحی در این مبحث می پردازد.

- فصل سوم با معرفی ساختارهای مبنایی اینورترهای چند سطحی، به بحث پیرامون مناسب ترین ساختار برای کاربرد در این رساله پرداخته و مراحل طراحی اجزای مدار انتخاب شده را شرح می دهد.

- در فصل چهارم ابتدا ساختار بهبود یافته ای برای موضوع این رساله پیشنهاد شده و طراحی می شود. این فصل در ادامه به بررسی الگوریتم های کلیدزنی اینورترهای چند سطحی می پردازد که در اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه به کار گرفته می شوند. سپس در این فصل الگوریتم پیشنهادی این رساله برای رسیدن به موضوع طرح شده معرفی و تحلیل می شود.

- فصل پنجم به بررسی عملکرد مدار پیشنهادی و الگوریتم کنترلی پیشنهادی از طریق شبیه سازی نرم افزاری آن پرداخته و نتایج حاصله را با نتایج پیشین مقایسه و تحلیل می کند. در ادامه پیشنهادات این رساله روی یک نمونه آزمایشگاهی از اینورتر چندسطحی پیاده سازی می شود تا اعتبار نتایج شبیه سازی بررسی شود.

- فصل ششم در پایان رساله به جمع بندی و نتیجه گیری از فعالیت های انجام شده و پیشنهاداتی پیرامون ادامه آن می پردازد.

فصل دوم:

مرور منابع

در این فصل تلاش می شود مروری هر چند کوتاه بر برخی مقالات علمی منتشر شده که به نحوی با موضوع این رساله در ارتباط باشند صورت گیرد. ترکیب موضوعی مقالاتی را که در این بخش بررسی می شوند می توان در چند سر فصل خلاصه کرد:

- با توجه به عنوان رساله، بخشی به بررسی مقالات پیرامون کاربرد اینورترها در اتصال DG شبکه اختصاص یافته است.

- از آنجا که توربین های بادی بخشی مهم از منابع تولید پراکنده اند، چند مقاله پیرامون اتصال آنها به شبکه به کمک اینورتر بررسی می شود.

- سلول های خورشیدی از مهمترین منابع DG هستند که برای اتصال به شبکه به اینورتر نیازمندند. لذا چند مقاله پیرامون موضوع اینورترهای اتصال دهنده سلول خورشیدی به شبکه و مسائل پیرامونی آن اختصاص یافته است.

- اینورترهای چند سطحی همچنین در کاربردهایی نظیر خودروهای الکتریکی و راه انداز موتورها کاربرد دارند که برخی مقالات پیرامون این موضوع نیز بررسی خواهد شد.

- کیفیت توان خروجی اینورترها و نیز کاربرد آنها در ادوات جبرانساز کیفیت توان، از موضوعاتیست که در مقالات متعدد بررسی شده است که برخی نمونه های آن در این رساله مرور خواهد شد.

- از آنجا که موضوع این رساله به کاربرد اینورترهای چند سطحی مربوط می شود، برخی مقالات مربوط به ساختارهای مختلف پیشنهادی آنها، و نیز کاربردها و مسائل پیرامونی آن در این بخش مورد مطالعه قرار می گیرد.

- در ادامه، مقالاتی با موضوع اینورترهای چند سطحی که سطوح مختلف آنها از یک منبع مشترک تغذیه می شود مورد بررسی قرار می گیرند.

- با توجه به این که برای موضوع مورد مطالعه در این رساله، اینورترهای بدون ترانسفورماتور مناسب تر به نظر می رسند، مقالات مختلفی پیرامون کاربرد اینورترهای بدون ترانسفورماتور و مسائل جانبی آن در بخشی از این فصل بررسی خواهند شد.

- در نهایت برخی مقالات نزدیک به موضوع مورد بررسی در این رساله بررسی می شوند.

2-1- DG های مبتنی بر اینورتر

محمد و عبدالراضی در سال 2011 موضوع تاثیرات مشکلات ولتاژ شبکه روی اینورتر های اتصال دهنده DG به شبکه ونحوه خنثی کردن آن را بررسی کرده اند [1]. برای مثال متغیر بودن امپدانس معادل شبکه از دید DG که می تواند ناشی از عواملی چون اضافه بار کابل های توزیع، اشباع ترانسفورماتور ها ... باشد از عواملی است که می تواند عملکرد اینورتر را تحت تاثیر قرار دهد.

در جاییکه یک حلقه کنترل جریان برای کنترل کیفیت جریان خروجی اینورتر ها به کار گرفته می شود حساسیت قطب های غالب این حلقه کنترلی به عدم قطعیت پارامتر امپدانس متقابل با شبکه بسیار زیاد است. همچنین عملکرد DG هایی که به وسیله اینورتر به شبکه وصل می شوند به شدت به ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (PCC) وابسته است و هر نوع اعوجاج ولتاژ PCC می تواند تاثیر منفی روی خروجی اینورتر بگذارد.