استخراج توابع انتقال بهمنظور جداسازی انتشار جریان هارمونیکی اولیه و ثانویه در یک مزرعه بادی

حامد قنواتی'، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ علیرضا جلیلیان'، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت - تهران - ایران - ایران - h_ghanavati@elec.iust.ac.ir

۲- قطب علمی اتوماسیون و بهرهبرداری سامانههای قدرت - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت - تهران - ایران - ا

چکیده: کاربرد مبدلهای الکترونیک قدرت در توربینهای بادی، منجر به تولید هارمونیک و میانهارمونیک می ود. همچنین کلیدزنی مبدلها، منجر به اغتشاش توان اکتیو خروجی توربینها می شود. برهم کنش هارمونیکی مزارع بادی با شبکه بالاد ستی، انتشار هارمونیکها در آن و تقویت این انتشارها بهوا سطه تشدیدهای موجود در کابلهای انتقال زیرزمینی، میتواند به افزایش مشکلات کیفیت توان منجر شود. این مقاله رو شی را برای مطالعه و دستهبندی انتشارهای جریان هارمونیکی متداول در یک مزرعه بادی ارائه می دهد. این روش از مفهوم تابع انتقال برای ارزیابی سهم جریان هارمونیکی هر توربین بادی در محل اتصال مشترک به شبکه و نیز سهم ولتاژ هارمونیکی پسزمینه شبکه بر اعوجاج جریان هارمونیکی هر یک از توربینها استفاده میکند. در این راستا، استخراج توابع انتقال ولتاژ و جریان، و امپدانس و ادمیتانس انتقال بر اساس نظریه مدار و مدل سازی یک از توربینها استفاده میکند. در این راستا، استخراج توابع انتقال ولتاژ و جریان، و امپدانس و ادمیتانس انتقال بر اساس نظریه مدار و مدل سازی آنتشار اولیه" و "انتشار ثانویه" بر اساس این توابع بررسی میشود. به کمک این روش میتوان سهم هر توربین و نیز سهم هر توربینه می می و انجر این را در انتشار هارمونیکی تحت عنوان "انتشار اولیه" و "انتشار ثانویه" بر اساس این توابع بررسی میشود. به کمک این روش میتوان سهم هر توربین و نیز سهم شبکه را در انتشار برآیند مزرعه بادی تفکیک کرد. همچنین تأثیر تابع انتقال فیلتر LCL رایج در توربینهای بادی بر هر یک از آن توابع انتقال بررسی می شود. نتیجه مهم تابع انتقال اولیه از توربین به شبکه بیش تر باعث می شود دامنه تابع انتقال هارمونیکی اولیه از توربین به توربین در محدود فرکانسی معینی از دامنه

واژههای کلیدی: هارمونیک، مزرعه بادی، تشدید، تابع انتقال، انتشار اولیه و ثانویه، مدلسازی حوزه فرکانس، تحلیل امپدانسی، فیلتر LCL

Extraction of Transfer Functions for Decomposition of Primary and Secondary Current Harmonic Emission in a Wind Farm

H. Ghanavati¹, MSc Student; A. Jalilian², Associate Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran, Email: h_ghanavati@elec.iust.ac.ir
 2- Centre of Excellence for Power System Automation and Operation, Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran, Email: jailian@iust.ac.ir

Abstract: Application of power electronic converters in wind turbines results in generation of harmonic and interharmonic. Also, the switching of converters results in turbines active output power distortions. Harmonic interaction of wind farms with external grid, harmonic propagations in it and amplification of these propagations due to resonance of underground transmission cables, can leads to increase in power quality problems. This paper presents a method for study and classification of conventional current harmonic emissions in a wind farm. This method uses the concept of transfer function in order to evaluate the harmonic contributions of each wind turbines at point of connection as well as the contribution of external grid background harmonic voltage on each turbine current harmonic distortion. In this regard, extraction of voltage and current transfer functions, transfer admittance and impedance is done based on circuit theory and harmonic modeling of wind farm components from medium voltage (MV) side of turbine transformer in frequency domain. Two classification of harmonic propagation called as "primary emission" and "secondary emission" is evaluated based on these functions. With use of this method, the contribution of each turbine and also the contribution of external grid at overall wind farm emission can be decomposed. Also, the import of transfer function of conventional LCL filter used in wind turbines, on each those transfer function from one turbine to another turbine, in special frequency range, be more than the amplitude of primary harmonic transfer function from one turbine to the grid.

Keywords: Harmonic, Wind farm, Resonance, Transfer function, Primary and Secondary emission, Frequency domain modeling, Impedance analysis, LCL filter.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۲ ۱۳۹۵ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲ ، ۱۳۹۶/۰۵/۱۵ ، ۱۳۹۶/۰۶/۲۶ ، ۱۳۹۶/۰۶/۲۶ و ۱۳۹۶/۰۷/۱۴ و ۱۳۹۶/۰۷/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۴ نام نویسنده مسئول: ایران – تهران – میدان رسالت – خیابان هنگام – خیابان دانشگاه علم و صنعت – دانشکده مهندسی برق.

۱– مقدمه

انرژی بادی در بین منابع انرژی با بالاترین سرعت رشد در جهان است. از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۱۵، نرخ رشد بهرهبرداری از انرژی بادی سالانه بهطور میانگین حدود ۲۲٪ افزایش یافته است؛ یعنی ۶۳ گیگاوات ظرفیت اضافه شده در مدت یک سال. ظرفیت کلی انرژی حاصل از این نوع منبع تجدیدپذیر حدود ۴۳۳ گیگاوات است که بیش از نیمی از آن طی ۵ سال گذشته اضافه شده است. باد، منبع پیشتاز ظرفیت جدید تولید انرژی در اروپا و ایالات متحده بوده و در چین جایگاه دوم را دارد. با یک تقریب کلی می توان گفت باد، ظرفیت تولید انرژی بیش تری را در سرتاسر جهان نسبت به سایر منابع فراهم آورده است [1].

توربینهای بادی در دو نوع سرعت ثابت و سرعت متغیر به کار میروند [۲]. در انواع سرعت ثابت اکثراً سرعت نسبت به فرکانس شبکه تثبیت می شود و ولتاژ متأثر از سرعت باد است یعنی نو سانات باد در عملکرد توربین و ولتاژ خروجی تاثیرگذار است. برای توربینهای سرعت متغیر که ژنراتور توسط تجهیزات الکترونیک قدرت کنترل می شود، این امکان فراهم است که سرعت روتور کنترل شود. در این روش نو سانات توان ایجاد شده تو سط تغییرات باد – که ممکن است زیاد یا کم با شند بهو سیله تغییر سرعت روتور مستهلک می شوند [۳]. ژنراتورهای بادی نوین به علت اســـتفاده از مبدلهای منبع ولتاژی بر مبنای ابزارهای الکترونیک قدرت کموتاسـیون اجباری، هارمونیک (مضـارب صـحیح فرکانس شبکه) و میانهارمونیک (مضارب غیر صحیح فرکانس شبکه) تولید می کنند [۴]. این هارمونیکها با مؤلفه اصـلی ولتاژ یا جریان

توربینهای بادی مبتنی بر ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه^۱ (نوع ^۲۳) به مبدل های قدرت ظرفیت پایین^۳، و توربین های بادی نوع ^۴ (مبتنی بر ژنراتور های سنکرون آهنر بای دائم^۵، ژنراتور سنکرون روتورسیم پیچی شده یا ژنراتور القایی روتورسیم پیچی شده) به مبدل های قدرت ظرفیت بالا^۶ مجهز شدهاند. تبدیل شکل موج از AP به DC و میپس از DC به AC در مدل یک مبدل قدرت به کار برده شده است. کلیدزنی مبدل اعوجاجات شکل موج در توان خروجی را به همراه دارد. هرگونه انحراف قابل توجه در دامنه، فرکانس و یا خلوص شکل موج، یک مسئله کیفیت توان خواهد بود. اعوجاج شکل موج درهر صورت در بسیاری از کشورها، بهوا سطه محدودیت های اجباری یا ارادی به خوبی تنظیم شده است. نگرانی ا صلی برای صاحبان پارک بادی و مت صدیان شبکه، نگهداشتن سطوح اعوجاج زیر این محدودیت ها است. اعوجاجات

هارمونیک و میانهارمونیکهای حاصلشده در محل اتصال مشترک^۷ باید بهدرستی اندازه گیری و شبیهسازی شوند چرا که میتوانند منجر به تقویت، عکسالعمل سیستم کنترل، تداخل سیستم حفاظت، یا سطوح جریان غیرمنتظره در تأسیسات مجاور مجهز به بانکهای فیلتری شوند [۴، ۲]. همچنین بدیهی است که فیلترهای هر ژنراتور بادی و فیلترهای مربوط به سیستم جمعکننده اکثر

فرکانسهای بالای تزریق شده تو سط ژنراتور بادی به شبکه را پالایش میکند. و نیز اثر حذف بین ژنراتور های بادی اتفاق خواهد افتاد، که برخی مؤلفه های فرکانس بالا را تحت تأثیر قرار خواهد داد. اطلاعات بسیار کمی درباره چگونگی تجمیع سهم هارمونیکی ژنراتورهای بادی مجزا و سطوح مورد انتظار، در محل اتصال مشترک، در دسترس است. باید گفت انتشار از توربینهای بادی با انتشار از منابع عمدتاً رایج مانند تأسیسات صنعتی یا مناطق مسکونی، فرق دارد [۸، ۹]. این اعوجاجات گونه جدیدی از منبع انتشار هارمونیک، غیر از منابع متداول متصل به شبکه هستند [۱۰، ۱۱].

مطالعه صورت گرفته در [۱۲] به ارائه یک روش جدید برای سنجش آلودگی هارمونیکی در محل اتصال مشترک یک توربین بادی نوع ۳ به شبکه پرداخته است اما درباره انتشار سطوح هارمونیکی محاسبه شده در شبکه و نیز نحوه تجمیع جریان های هارمونیکی حاصل از چند توربین بادی به کمک این روش جدید صحبتی به میان نیامده مرزعه بادی تأثیر مهمی بر انتشار برآیند آن دارد [۱۳]: به علت ترکیب خازن کابل و اندوکتانس ترانسفورماتور پست، این کابل ها تشدیدهایی را در شبکه جمع کننده به وجود آورده که جریان های هارمونیکی انتشار یافته توسط یک توربین بادی به واسطه این تشدیدها تقویت شده و منجر به تجاوز از محدوده های مجاز اعوجاج ولتاژ هارمونیکی می شود.

به منظور مطالعه انتقال و انتشار هارمونیک ها به یک روش نظاممند، مرجع [۱۳] دستهبندی آنها را به دو گروه پیشنهاد میدهد: انتشار اولیه از یک توربین به سایر توربینها و نیز به شبکه اصلی؛ و انتشار ثانویه از شبکه اصلی به شبکه جمع کننده و به هر یک از توربینهای موجود در مزرعه بادی. این رویکرد امکان ارزیابی انتشار هارمونیکی کل را در هر نقطهای از مزرعه بادی فراهم آورده و به کمک آن می توان سهم هر توربین را در انتشار کلی مزرعه بادی بهدست آورد.

مراجع [۷، ۱۴] تنها تابع انتقال انتشار اولیه را ارائه کرده و سهم هر توربین را در آلودگی هارمونیکی برآیند در محل اتصال مشترک بهدست آوردهاند. این در حالی است که برای مطالعه جریان هارمونیکی برآیند در هر نقطه از شبکه، بهدستآوردن سهم اعوجاج ولتاژ پسزمینه^۸ ناشی از شبکه در اعوجاج هارمونیکی محل مورد مطالعه نیز ضروری است. مرجع [۱۳] به برر سی تأثیر فیلتر توربین بر انتشار نیز پرداخته است. این فیلتر به صورت یک فیلتر SLC در نظر گرفته شده است که البته پارامترهای آن داده نشده است. این در حالی است که فیلتر LCL بهصورت معمول در قسمت مبدل سمت شبکه^۹ یک توربین بادی نوع ۳ نصب می شود. روند طراحی فیلتر LCL برای این نوع توربین بادی در مراجع [۷۱] دکر شده است. روند طراحی فیلتر یادی نوع ۳ نصب می شده است اما درباره تأثیر پا سخ فرکانسی ملک در این مولیتر غیرخعلی آن سلف، در [۱۵] برر سی شده است اما درباره تأثیر پا سخ فرکانسی فیلتر طراحی شده بر نحوه انتقال هارمونیکهای تولیدی تو سط اینورتر محبتی به میان نیامده است. همچنین انواع ساختارهای فیلتر غیرفعال

مورد استفاده در ساختار یک توربین بادی در [۱۷] ارائه شده است. در هیچیک از این مراجع درباره بهکارگیری پاسخ فرکانسی فیلتر LCL در مدل تابع انتقال صحبتی به میان نیامده است. ازاینرو هدف اصلی این مقاله، برر سی تأثیر پاسخ فرکانسی فیلترهای LCL رایج در توربینهای بادی بر هر یک از توابع انتقال انتشار اولیه و ثانویه است.

این مقاله به ارائه یک رویکرد نظاممند به منظور مطالعه انتشار هارمونیکی و تکثیر هارموذیک ها در یک مزر عه بادی می پردازد. از آنجایی که اندازه گیری جریان در محل اتصال بین شبکه و مزرعه بادی، به خودی خود هیچ اطلاعاتی را درباره انتشار از توربینهای مجزا در اختیار نمی گذارد، برای بهدستآوردن سهم جریان هارمونیکی هر توربین بادی در محل اتصال مشترک و نیز سهم اعوجاج ولتاژ شبکه بر هر یک از توربین ها، از تابع انتقال ولتاژ یا جریان، امپدانس انتقال و ادمیتانس انتقال در یک مزرعه بادی نمونه استفاده می شود. مزیت اصلی این توابع این است که می توانند اطلاعاتی را درباره سطوح هارمونیکی بدون داشــتن دانش دقیقی از منابع هارمونیکزا و نوع توربین بادی (نوع ۳ یا ۴) در اختیار قرار دهند. بهدستآوردن این توابع بر اساس نظریه مدار و مدلسازی هارمونیکی اجزای مزرعه بادی در حوزه فركانس به كمك نرمافزار MATLAB صورت گرفته است. تحليل حساسیت مقاومت وابسته به فرکانس کابل به توان اثر پوستی در نرمافزار DIgSILENT انجام داده شده است. همچنین به برر سی تأثیر فيلتر LCL نصب شده بر قسمت مبدل سمت شبکه يک توربين بادي نوع ۳ نیز بر توابع انتقال پرداخته شده است.

در راستای مطالعات ذکرشده، در بخش ۲ راهکارهای مدلسازی هارمونیکی یک مزرعه بادی نمونه ارائه شده است. انتقال هارمونیکها و دستهبندی انتشارهای هارمونیکی در بخش ۳ بیان شده است. در بخش ۴ انتشار اولیه و در بخش ۵ انتشار ثانویه مبتنی بر توابع تشریح شدهاند. در بخش ۶ به کارگیری فیلتر LCL در مدل تابع انتقال ارزیابی خواهد شد. در بخش ۷، جمعبندی کلی از نتایج حاصل از قسمتهای پیشین بیان شده و در بخش ۸ نیز نتیجه گیری ارائه شده است.

۲- مدلسازی هارمونیکی مزرعه بادی

بهاستثنای جریان مغناطیس کنندگی ترانسفورماتور که در ولتاژ نامی بسیار پایین است، ژنراتورهای بادی تنها منبع تولید هارمونیک و میانهارمونیک برای نیروگاه بادی مورد آزمایش هستند. مبدل سمت شبکه، مبدل سمت روتور ^۱ و سیمپیچهای ژنراتور القایی دوسو تغذیه سه منبع عمده تولید هارمونیک و میانهارمونیک هستند [۴]. یک مبدل منبع ولتاژی کنترل شده در یک ژنراتور بادی، بهعنوان یک مبدل هارمونیکها و میانهارمونیکهای فرکانس بالای ولتاژ ایجاد میکند. اگرچه مبدل سمت شبکه در فرکانس سیستم قدرت کار میکند، مبدل سمت روتور در فرکانسی بسیار پایینتر مطابق با لغزش ژنراتور بادی عمل میکند. با توجه به اتصال غیرمستقیم مبدل سمت روتور به شبکه،

مؤلفههای فرکانسی در جریان روتور بهواسطه فاصله هوایی، به استاتور ماشین انتقال مییابند. فرکانس این مؤلفهها با سرعت ژنراتور بادی تغییر می کند [۴]. از طرفی، هنگامی که جریان رابط DC یک یکسوساز کاملاً صاف نباشد، سمت AC آن توسط ریپل DC مدوله شده و میان هارمونیکها تولید میشوند [۱۸]. به علت توزیع فیزیکی سیم پیچهای استاتور و روتور، ژنراتور القایی یک شار فاصله هوایی تقریباً غیر سینوسی ایجاد می کند. هارمونیکهای بالاتر که به هارمونیکهای فضای MMF از آن ها یاد میشود، نیز در شار فاصله هوایی وجود دارند [۴].

مدل سازی توربین بادی نوع ۳ پیچیده تر از نوع ۴ است چراکه علاوه بر دا شتن یک مبدل که دقیقاً مانند مبدل نوع ۴ مدل می شود، ات صال مســـتقیمی نیز از ژنراتور به شــبکه وجود دارد که به نوبه خود منبعی برای هارمونیکها به خصوص میان هارمونیکهای مرتبط با لغزش ژنراتور اسـت. مطابق [۱۹] مدل سـازی DFIG به این صـورت اسـت: GSC از طریق یک فیلتر LCL به شـبکه متصـل است. هارمونیکهای تولیدی توسـط GSC از طریق این عناصـر القایی به شـبکه انتشـار مییابند. هارمونیکهای تولیدی تو سط RSC نیز از روتور به ا ستاتور القا شده و سپس از آن جا به شبکه انتشار مییابند؛ مطابق شکل ۱.

متأسفانه تاکنون هیچ روش نظاممندی برای نمایش توربین بادی از منظر عملکرد هارمونیکیاش وجود ندا شته است [۲۰]. این موضوع در ارزیابی عملکرد هارمونیکی توربین بادی، ارزیابی اعوجاج پسزمینه در توربین بادی متصل به شبکه و تجزیه و تحلیل هارمونیکی نیروگاههای بادی، ناسازگاری به بار میآورد. ویژگیهای مورد نظر مدل هارمونیکی توربین بادی مطابق [۲۰] بهصورت زیر است:

- مدل هارمونیکی توربین بادی اجازه حذف تأثیر شبکه جمع کننده را از خصوصیات اندازه گیری شده توربین بادی می دهد.
- مدل هارمونیکی توربین بادی به طور صحیحی واکنش توربین
 بادی را به ولتاژهای هارمونیکی پس زمینه در شبکه جمع کننده
 ارائه می دهد.
- مدل هارمونیکی توربین بادی میتوا ند در مطالعات ارز یابی هارمونیکی و در شـرایط مختلف شــبکه به کار رود در حالیکه اندازه گیری های جریان هارمونیکی بهتنهایی نمیتواند این کار را انجام دهد.
- مدل هارمونیکی ساختار استانداردی دارد و میتواند بهطور وسیعی برای مطالعات هارمونیکی در سطح سیستمی به کار رود.
 برای شرح مدل هارمونیکی یک مزرعه بادی، ابتدا باید مــــدل



شکل ۱: نمودار تکخطی توربین بادی نوع ۳ متصل به شبکه [۲، ۱۹]

هارمونیکی (حوزه فرکانس) سیستم جمعکننده (شامل ترانسفورماتور توربین، ترانسفورماتور پست و کابل)، شبکه و توربین بادی بهدست آیند که در ادامه به بررسی هر یک پرداخته میشود.

۲-۱- مدل شبکه جمع کننده

شبکه جمع کننده از سه قسمت ترانسفورماتور توربین، کابل، و ترانسفورماتور پست تشکیل می شود. برای مدل سازی کابل ها در حوزه فرکانس از مدل T فشرده شده یا Π استفاده می شود [۲۱]. مدار معادل یک کابل بر اساس مدل Π مطابق شکل ۲ است.

امپدانس سری معادل در هر فاز برحسب اهم (' Z) برابر ا ست با [۲۲]:

$$Z' = Z \frac{\sinh(\gamma L)}{\gamma L} \tag{1}$$

که در آن Z برابر $Z \times Z$ (z امپدانس سری در واحد طول)، L طول کابل و γ ثابت انتشار است [۲۲]. ادمیتانس موازی معادل برحسب زیمنس (Y) نیز برابر است با:

$$Y' = 2Y \frac{\tanh(\gamma L/2)}{\gamma L}$$
(Y)

که در آن Y برابر X imes y (y ادمیتانس موازی در واحد طول) است [۲۲]. برای بهدست آوردن ماتریس مربوط به یک کابل با مدل Π ، باید گفت رابطه بین ولتاژها و جریانهای ار سالی (با زیروند S در شکل ۲)) و دریافتی (با زیروند R در شکل ۲)) [۲۳] مطابق رابطه زیر است:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{Z'Y'}{2}\right) & Z' \\ Y'\left(1 + \frac{Z'Y'}{4}\right) & \left(1 + \frac{Z'Y'}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = [H] \times \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$
(7)

اگر N کابل باهم سری شده با شند، ابتدا باید ماتریس H در رابطه (۳) را برای هر N کابل محاسبه کرد و سپس آنها را در هم ضرب کرد و از روی ماتریس حاصل شده، R، L و C معادل آن N کابل را بهدست آورد. از بین این سه پارامتر، R نیز یک کمیت وابسته به فرکانس است.

$$\frac{R_f}{R_1} = (1-a) + a \times \left(\frac{f}{f_{nom}}\right)^b$$
(f)

که در آن R_f مقاومت در فرکانس f و R_1 مقاومت در فرکانس نامی (f_1 مقاومت در فرکانس نامی (f_{nom}) است. انتخاب ضرایب a و b (ضریب میرایی یا توان اثر پوستی) امپدانس حاصل از پویش فرکانسی را پیرامون فرکانس تشدید به شدت (تحت تأثیر قرار می دهد [۱۳]. مطالعه ای در خصوص این موضوع در



شکل ۲: مدار معادل یک کابل انتقال بر اساس [۲۲]

بخش ۲-۴ صورت خواهد گرفت.

ترانسفورماتورها با توان نامی و امپدانس داخلی خود مدل می شوند. جریان مغناطیس کنندگی تران سفورماتورها در نظر گرفته نمی شود زیرا مقدار آن در ولتاژ نامی پایین است [۲۴]. هم ترانسفورماتور پست و هم ترانسفورماتور توربین به صورت یک مدار سری با اندوکتانس L_{uf} و مقاومت R_{uf} مدل می شود [۲۲]. مقاومت معادل ترانسفورماتور نیز در ارزیابی هارمونیکی، وابسته به فرکانس است؛ مطابق رابطه (۴).

در اینجا مقاومت ترانسفورماتورها، تابعی نمایی از فرکانس است: a_i و b_i مطابق [۷] هر دو برابر ۱ انتخاب شدهاند. b_i ضریب میرایی مقاومت وابسته به فرکانس ترانسفورماتور یا توان اثر پوستی مقاومت ترانسفورماتور است.

۲-۲- مدل شبکه اصلی

جریانهای خطا به ازای ولتاژ شبکه (U_{grid}) ۱۱۰ کیلوولت، در محدوده J_{grid}) محاولت، در محدوده $I_k \leq 47/V$ ازاینرو، مطابق رابطه (۵) توان اتصال کوتاه در محدوده ازاینرو، مطابق رابطه (۵) توان اتصال کوتاه در محدوده $S_k \leq 9.6$

$$S_{k} = \sqrt{3}I_{k}U_{grid} = \frac{U_{grid}^{2}}{Z_{k}}$$
(Δ)

در [۷] تنها مقدار سطح خطا و ولتاژ شبکه ذکر شده است (به ترتیب ۱۱۰ کیلوولت و ۸۰۰ مگاولت آمپر) و اطلاعی درباره نسبت ترتیب ۱۱۰ کیلوولت و ۸۰۰ مگاولت آمپر) و اطلاعی درباره نسبت X/R شبکه بهدست نداده است. مرجع [۱۳] نیز مقدار امپدانس شبکه را در ولتاژ ۶۶ کیلوولت، <math>X/1+j./ در اینجا اگر بر اساس مقاله است؛ یعنی نسبت R_{grid}/R_{grid} معادل ۱۱۰ در نظر گرفته شود، به ازای ولتاژ شبکه [۱۳] نسبت X/R ، معادل ۱۱۰ در نظر گرفته شود، به ازای ولتاژ شبکه است. S_k میران دارد)، امپدانس شبکه بر اساس رابطه (۶) بهدست خواهد آمد.

$$Z_{k} = \frac{U_{grid}^{2}}{S_{k}} = \frac{(110 \times 10^{3})^{2}}{1716 \times 10^{6}} = 7.05 \,\Omega \tag{9}$$

با توجه به نسبت X / R و این که Z_k برابر $Z_{grid}^2 + X_{grid}^2$ است، آن گاه کرابر $X / R_{grid}^2 + X_{grid}^2$ برابر کا ۷/۰۱۵ اهم به دست آن گاه X_{grid} ماد برای پریونیت کردن این مقادیر از بیشینه Z_k معادل خواهند آمد. برای پریونیت کردن این مقادیر از بیشینه Z_k

$$Z_{k}(pu) = R_{grid}(pu) + jX_{grid}(pu)$$

= 0.604 + j0.0604 pu (Y)

مقاومت شبکه نیز با ضریب میرایی ۸/۰ وابسته به فرکانس است (۰/۸ معادل ۰/۸) [۱۳].

۲-۳- مدل توربین بادی

ارائه مدار معادل هارمونیکی توربین بادی بهصورت شکل ۳ "الف" که در [۱۹] ارائه شده است، برای ارزیابی هارمونیکها از سمت ولتاژ پایین (LV) ترانسفورماتور توربین مناسب است. در این مقاله و بهمنظور به-



شکل ۳: مدار معادل هارمونیکی توربین بادی؛ الف) منبع جریان موازی با امپدانس در سمت LV ترانسفورماتور توربین [۱۹] و ب) تنها یک منبع جریان هارمونیکی به سمت MV ترانسفورماتور توربین

دست آوردن توابع انتقال، مدار معادل انتخاب شده برای توربین بادی مطابق شکل ۳ "ب" است. درواقع تمامی توربین های بادی همراه با مبدل ها و مدار معادل ژنراتور القایی آن در این مقاله به صورت شکل ۳ "ب" مدل می شود؛ یک منبع جریان هارمونیکی ناشی از توربین بادی، که به سمت ولتاژ متوسط (MV) ترانسفورماتور توربین جریان هارمونیکی تزریق می کند. تابع انتقال از این نقطه به شبکه اصلی محاسبه می شود. این رویکرد برای مطالعه انتشار هارمونیک ها در شبکه جمع کننده مناسب است و مزیت اصلی آن این است که برای مطالعه مسیرهای انتشار هارمونیکی یک مزرعه بادی به شبکه و برعکس، صرفنظر از نوع توربین های بادی آن (نوع ۳ یا نوع ۴) قابل اعمال خواهد بود.

۲-۴- ساختار مزرعه بادی

ساختار مزرعه بادی در شکل ۴ نشان داده شده است. این مزرعه بادی شامل ۹ توربین بادی نوع ۳ هر یک به ظرفیت ۲ مگاوات است که در دو فیدر بهصورت نامتقارن توزیع شدهاند و سمت ولتاژ پایین ترانسفورماتور توربین ۶۹۰ ولت است. در هر فیدر فاصله بین توربینهای مجاور ۳۲۰ متر است. شبکه جمع کننده ۳۲ کیلوولتی، از طریق ترانسفورماتور پست (۳۰ مگاولتآمپر، امپدانس ۱۰٪ و مقدار نسبت X/X برابر ۱۲) به شبکه اصلی ۱۱۰ کیلوولتی متصل است. توربینها به کمک کابلهای زیرزمینی با مقاومت ۱۱۰ اهم بر کیلومتر در فرکانس ۵۰ هرتز، ظرفیت خازنی ۲۵/۰ میکروفاراد بر کیلومتر و اندوکتانس ۸۵ هرتز، ظرفیت کیلومتر، به هم متصل شدهاند [۷، ۱۳]. مطالعهای درباره حساسیت مقاومت کابل به ضرایب میرایی در رابطه (۴)، در نرمافزار DIgSILENT بر اساس مزرعه بادی شکل ۴ صورت گرفته است و در شکل ۵ نشان



شکل ۴: ساختار مزرعه بادی؛ علائم آبی، خط و شینهای ۳۲ کیلوولت؛ علائم قرمز شینهای ۶۹۰ ولت؛ علامت سبز، شین ۱۱۰ کیلوولت



مطالعه حساسیت برای امپدانس دیده شده از ترمینال توربیــنهای بادی ۴ و ۹ به شبکه صورت گرفته است؛ یعنی دورد ست ترین توربین موجود در هر فیـدر. مقـادیر بزرگ تر b_c ، امپـدانس بـالاتری را در فرکانسهای بالاتر نتیجه می دهد. تفاوتها در فرکانس تشـدید ۱۵۸۵ هر تز مشـخص اسـت. برای فرکانسهایی جز این فرکانس، امپدانس با تغییر پارامتر b_c چندان متأثر نمی شود. مدل سازی صورت گرفته در این مقاله، بر مبنای a_c برابر ۱ و b_c برابر ۲/۶ صورت می گیرد.

۳- انتقال هارمونيکها

مطالعه انتقال هارمونیکها در یک شبکه توسط تابع انتقال، امپدانس انتقال و ادمیتانس انتقال صورت می گیرد. فرض کنید منبع جریانهای هارمونیکی در گره A از شبکه قرار گرفته باشد. این جریانها، بهعنوان جریان "ورودی" توابع انتقال هستند. محاسبه انتشار جریان هارمونیکی حاصل در گره B مورد نظر است. این جریانها درواقع "خروجی" تابع انتقال هستند. ولتاژ و جریان مختلط در گره A و گره B در فرکانس fبه ترتیب \overline{I}_{f} و \overline{I}_{f} ، و \overline{I}_{f} آست.

۳-۱- توابع انتقال

تابع انتقال برابر نسبت ولتاژ/جریان خروجی به ولتاژ/جریان ورودی تعریف میشود. اگر این نسبت بهصورت ولتاژ خروجی (\overline{U}_{f}^{B}) به ولتاژ تعریف میشود. اگر این نسبت بهصورت ولتاژ خروجی (\overline{U}_{f}^{B}) به ولتاژ ورودی (\overline{I}_{f}^{A}) بهدست آید، نام آن تابع انتقال ولتاژ و اگر بهصورت جریان خروجی (\overline{I}_{f}^{B}) به دریان خروجی (\overline{I}_{f}^{B}) بهدست آید، نام آن تابع انتقال ولتاژ و رودی (جریان است. امپدانس انتقال بهصورت نسبت ولتاژ خروجی به جریان ورودی ورودی ورودی در وروجی به جریان است. امپدانس انتقال بهصورت نسبت ولتاژ تروجی به ولتاژ ورودی ورودی ورودی و ادمیتانس انتقال بهصورت نسبت جریان خروجی به ولتاژ ورودی تعریف شده است. سهم جریان هارمونیکی در گره B ناشی از تریق جریان هارمونیکی در گره انشی از تابع تعریف شده است. سهم جریان هارمونیکی در گره یک توربین) از تابع مریان هارمونیکی دا گره این از تابع جریان هارمونیکی دا گره ای از مایی به در این از تابع بریان هارمونیکی دا گره ای از تابع بریان انتقال جریان بهدست میآید. همچنین جریانهای هارمونیکی حاصل در هر گرهای از شبکه ناشی از اعمال ولتاژ هارمونیکی پسزمینه در شبکه، بر اساس ادمیتانس انتقال بهدست خواهد آمد.

با فرض حضور N توربین در یک مزرعه بادی، تابع انتقال برآیند، تابع انتقال همه توربینها باهم در یک گره معین (مثلاً PCC) است. تجمیع هارمونیکها از اینجا پدید میآید. دو مورد تجمیع برای زوایای فاز هارمونیکها وجود دارد: ۱) زوایای فاز یکسان ؛ ۲) زوایای فاز با توزیع یکنواخت برای منابع جریان. تابع انتقال برآیند با فرض توزیع زاویه فاز یکسان، مجموع دامنههای همه توابع انتقال است [۲۵].

$$H_{f,\text{identical}} = \sum_{i=1}^{N} \left| \vec{H}_{f,i} \right| \tag{A}$$

که در آن $\overline{H}_{f,i}$ تابع انتقال از توربین i ام به گره مورد مطالعه است. تابع انتقال برآیند با فرض توزیع زاویه فاز یکنواخت از قانون جذر مربعات پیروی میکند.

$$H_{f,\text{uniform}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left| \bar{H}_{f,i} \right|^2} \tag{9}$$

۲-۲- طبقهبندی انتشارهای هارمونیکی

به منظور مطالعه انتقال هارمونیکها به یک روش نظاممند، مرجع [۱۳] دستهبندی آنها را به دوگروه پیشنهاد می دهد: انتشار اولیه (P)، انتشار ناشی از یک منبع هارمونیکزای مورد مطالعه (برای مثال یک توربین بادی یا کل مزرعه بادی) و انتشار ثانویه (S)، انتشار ناشی از سایر مکانها. در یک مزرعه بادی، ارزیابی ولتاژها و جریانهای هارمونیکی در نقاط مختلف مورد نظر است. این موضوع باعث می شود تقسیم انتشارها به دو دسته اولیه وثانویه ناکار آمد و بسیار کلی به نظر برسد. طبقهبندی ای که در ادامه می آید دقیق تر بوده و خط و مرز روش نظام مند را برای مطالعه انتقال هارمونیکها بهتر مشخص می کند:

- P₁ : انتشار اولیه ناشی از یک توربین بادی در محل اتصال شبکه
 جمع کننده به شبکه اصلی.
 - . انتشار اولیه ناشی از یک توربین بادی به دیگر توربینها. P_2
- P₃ : انتشار اولیه برآیند مزرعه بادی؛ برابر با مجموع سهم همه توربین ها در آلودگی هارمونیکی ناشی از انتشار اولیه در محل اتصال به شبکه.
 - انتشار ثانویه ناشی از شبکه اصلی بر یک توربین بادی.
- S₂ : انتشار ثانویه ناشی از یک توربین دیگر موجود در شبکه جمع کننده بر یک توربین بادی؛ مشابه P₂.
 - S₃ : انتشار ثانویه ناشی از شبکه اصلی بر کل مزرعه بادی.

۴- انتشار اوليه

تابع انتقالی که برای بررسی انتشار اولیه جریانهای هارمونیکی مورد استفاده قرار میگیرد، تابع انتقال اولیه نام دارد. در بخشهایی که در ادامه میآید، تابع انتقال انواع انتشارهای اولیه معرفیشده در قسمت ۳-۲ بر اساس معادلهای ارائه شده در قسمت ۲ مورد بررسی قرار میگیرد.

(P1) تابع انتقال اولیه از توربینها به شبکه (P1)

مدار معادل مورد استفاده برای مطالعه این انتشار هارمونیکی در شکل ۶ نشان داده شده است. کابل بین توربین بادی مورد مطالعه در یک فیدر و محل اتصال به شبکه با برچسب "قسمت ۱" مشخص شده است. بقیه کابلهای متصل بین آن توربین و توربینهای دیگر موجود در همان فیدر با برچسب "قسمت ۲" مشخص شده است. برچسب "قسمت ۳" نشان-دهنده کابل فیدر دیگر است.

بر اساس این قاعده که جریان متناسب با عکس امپدانس در یک شاخه است، تابع انتقال جریان از یک توربین به شبکه با توجه به شکل ۶ عبارت است از:

$$H_{WT,Grid}(\omega) = \frac{Z_{13}}{Z_{13} + Z_s} \times \frac{Z_{12}}{Z_{12} + Z_1 + \frac{Z_{13} \times Z_s}{Z_{13} + Z_s}}$$
(1.)

رسم نمودار $|H_{wT,Grid}(\omega)|$ تا فرکانس ۴۰ کیلوهرتز صورت گرفته و در شکل ۷ نشان داده شده است. دو د سته تشدید در اثر این تابع انتقال به وجود می آید:

- ۱) تشدید ناشی از کابلهایی که توربین مورد مطالعه به آن متصل است: قسمت سمت راست رابطه (۱۰).
- ۲) تشدید ناشی از بقیه کابلها و ترانسفورماتور پست و امپدانس شبکه: قسمت سمت چپ رابطه (۱۰).

دسته اول منجر به بروز تشدیدهای موازی می شود؛ یعنی تشدید-



شکل ۶: مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه تابع انتقال اولیه از یک توربین به شبکه



هایی که در آنها با یک اعوجاج جریان کم در سمت منبع هارمونیکزا، اعوجاج ولتاژ زیاد در مکان دیگر حا صل می شود که به صورت پیکی با دامنه بالا خود را نشان میدهند. د سته دوم منجر به بروز تشدیدهای سری می شوند؛ یعنی تشدیدهایی که در آنها با یک اعوجاج ولتاژ کم در سمت منبع هارمونیکزا، اعوجاج جریان زیادی در مکان دیگر حاصل می شود که به صورت پیکهایی با دامنه کم خود را نشان میدهند. از آنجایی که تشدیدهای دسته دوم در فرکانسهایی بین ۲۰ تا ۵۰ کیلوهرتز اتفاق میافتند، توابع انتقال نیز تا همین محدوده فرکانسی رسم شدهاند.

همه ۹ توربین، اولین تشدید خود را در فرکانس ۱۶۷۲ هرتز با مقدار ۱۴/۷۳ نشان میدهند. این به این معنی است که در این فرکانس، سهم هر توربین در انتشار کل مزرعه بادی در محل اتصال به شبکه (جریان خروجی در شکل ۶)، ۱۴/۷۳ برابر انتشار اولیه آن توربین (جریان ورودی در شکل ۶) است. برای فرکانسهای بالای ۵ کیلوهرتز سهم یک توربین در انتشار ناشی از کل مزرعه بادی، کمتر از ۵ در صد انتشار اصلی آن توربین است. دامنه تابع انتقال در دومین فرکانس تشدید برای دورد ستترین توربین موجود در هر فیدر نسبت به سایر توربینهای موجود در آن فیدر، کمی بیشتر است.

(P2) تابع انتقال اولیه از توربین به توربین (P2)

مدار معادل مورد استفاده برای محا سبه تابع انتقال اولیه از یک توربین به سایر توربینهای همفیدر با آن توربین با مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه تابع انتقال اولیه از آن توربین به توربینهای موجود در فیدر دیگر تفاوت دارد. مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه تابع انتقال از 1 TW به 2 WT، 3 WT و 4 WT در شکل ۸ نشان داده شده است. "قسمت ۱"، کابل بین 1 TW و یکی از سه توربین دیگر در فیدر ۱ است. "قسمت ۲"، کابل بین 1 WT و محل ات صال به شبکه است. مدار معادل کابلهای موجود در فیدر ۲ نیز مطابق "قسمت ۳" است. هنگامی که محاسبه تابع انتقال از توربین 1 WT به توربینی غیر از 4" نیز وارد مدار می شود که بیانگر کابل بین توربین مورد مطالعه و دوردستترین توربین در همان فیدر خواهد بود.



تابع انتقال حاصل از مدار معادل شکل ۸ برای محاسبه انتقال از

شکل ۸: مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه تابع انتقال اولیه از توربین 1 WT به توربینهای 2 WT، 3 WT و 4 WT

توربین ۱ به توربینهای ۲، ۳ و ۴، مطابق رابطه (۱۱) است.

$$H_{WT1/WT feeder1}(\omega) = \frac{Z_{14}}{Z_{14} + Z_{WT}} \times \frac{Z_{12}}{Z_{12} + Z_1 + \frac{Z_{14} \times Z_{WT}}{Z_{14} + Z_{WT}}}$$
(11)

که در آن Z_1 امپدانس معادل بخش سری کابل "قسمت ۱"، Z_{12} ، امپدانس معادل تقسمت ۲"، ترانسفورماتور پست، امپدانس امپدانس معادل تقسمت ۲"، ترانسفورماتور پست، امپدانس معادل داخلی شبکه و خازن نیمه چپ قسمت ۱، و Z_{14} امپدانس معادل تقسمت ۲ و خازن نیمه راست تقسمت ۱، و ای امپدانس معادل ترانسفورماتور توربین مورد مطالعه از سمت ۱» است. Z_{WT} امپدانس از سمت ۸، و نمبت ۲» و خازن نیمه راست تقسمت ۲ است. آن امپدانس مور یک از ترانسفورماتورهای توربین ۶ در صد، و نسبت X/R امپدانس ۲۰ مگاولت آمپر و ولتاژ نامی ۳۲ از هم بهدست خواهد آمد.

مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه تابع انتقال از 1 WT به 5 WT ، WT ، WT ، WT و WT در شکل ۹ نشان داده شده ۱ ست. "قسمت ۱"، کابل بین 1 WT و محل اتصال به شبکه است. بقیه کابلهای موجود در فیدر ۱ "قسمت ۲" است. "قسمت ۳" معادل کابلهایی است که توربین مورد مطالعه (یعنی یکی از ۵ توربین موجود در فیدر ۲) را به محل اتصال به شبکه وصل میکند. هنگامی که محاسب به تابع انتقال از توربین 1 WT به توربینی غیر از 9 WT (دورد ستترین توربین موجود) در فیدر ۲ مد نظر با شد، "ق سمت ۴" نیز وارد مدار می شرود و نما یانگر کابل بین توربین مورد مطالعه و

در اینجا به منظور ساده کردن رابطه تابع انتقال، امپدانس معادل سـمت راسـت _I1 (شـامل Z₁3، Z₃، Z₃ و Z_WT) معادل Z_{134T} در نظر گرفته میشود و بهصورت زیر محاسبه میشود:

 $Z_{134T} = ((Z_{WT} || Z_{34}) + Z_3) || Z_{13}$ (1Y)

تابع انتقال حاصل از مدار معادل شکل ۹ برای محاسبه انتقال از توربین ۱ به توربینهای ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹، مطابق رابطه (۱۳) است.

$$H_{WT1/WT feeder2}(\omega) = \frac{Z_{34}}{Z_{34} + Z_{WT}} \times \frac{Z_{13}}{Z_{13} + Z_3 + \frac{Z_{34} \times Z_{WT}}{Z_{34} + Z_{WT}}} \times \frac{Z_{12}}{Z_{12} + Z_1 + Z_{134WT}}$$
(1\mathbf{v})

رسم نمودار $\left|H_{_{WT1/WT\,feeder\,2}}(\omega)
ight|$ و $\left|H_{_{WT1/WT\,feeder\,1}}(\omega)
ight|$ تا فرکانس





۵۰ کیلوهرتز صورت گرفته و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. فرکانس تشـدید برای همه توابع انتقال، ۱۸۰۹ هرتز با دامنه ۱/۹ اسـت. برای فرکانسهای بالای ۵ کیلوهرتز سـهم توربین 1 WT در انتشار 2 Wr ، 3 WT و WT ، کمتر از ۸/۰ درصد و سهم آن در انتشار 5 WT ، 6 WT ، WT و WT ، کمتر از ۱/۰ درصد و سهم آن در انتشار آن توربین است. دامنه تابع انتقال در اولین فرکانس تشدید برای انتشار طبقه ₂ با نسـبت ۱ به ۸، کمتر از انتشـار طبقه ₁ اسـت. این به معنای انتشار آ سانتر هارمونیکها از یک توربین به شبکه نسبت به انتشار آنها از یک توربین به توربین دیگر است.



شکل ۱۰: تابع انتقال اولیه جریان از WT 1 به هشت توربین دیگر

(P3) انتشار اولیه از مزرعه بادی به شبکه (P3)

تابع انتقال برآیند جریان (از نظر دامنه) با فرض توزیع زاویه فاز یکسان، مجموع دامنههای همه توابع انتقال است؛ تابع انتقال برآیند جریان با فرض توزیع زاویه فاز یکنواخت از قانون جذر مربعات پیروی می کند. درواقع تابع انتقال برآیند، در حالت توزیع زاویه فاز یکسان، مجموع اندازه توابع انتقال اولیه محاسبه شده از توربینها به شبکه (P₁) در قسمت ۴-۱ است و در حالت توزیع زاویه فاز یکنواخت، جذر مجموع مربعات آنها. نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

فرکانس اولین تشدید برای هر دو تابع انتقال برآیند برابر با فرکانس اولین تشدیـد تابع انتقال هر یک از توربیــنها به شبکــه است. بهازای



به ازای توزیع زاویه فاز یکسان و یکنواخت

توزیع زاویه فاز یکسان، مقدار بیشینه تابع انتقال برآیند در فرکانس تشدید برابر ۱۳۲/۴ است یعنی ۹ برابر (تعداد توربینها) مقدار بیشینه تابع انتقال یک توربین به شـبکه (۱۴/۷۳). به ازای توزیع زاویه فاز یکنواخت، مقدار بیشینه تابع انتقال برآیند در فرکانس تشدید برابر ۴۴/۱۵ است یعنی ۳ برابر (جذر تعداد توربینها) مقدار بیشینه تابع انتقال یک توربین به شبکه (۱۴/۷۳).

۵- انتشار ثانویه

تابع انتقالی که برای بررسی انتشار ثانویه جریانهای هارمونیکی مورد استفاده قرار می گیرد، تابع انتقال ثانویه نام دارد. در بخشهایی که در ادامه می آید، تابع انتقال انواع انت شارهای ثانویه معرفی شده در قسمت ۳-۲ بر اساس معادلهای ارائه شده در قسمت ۲ مورد بررسی قرار می گیرد.

S1–۱–۵ ادمیتانس انتقال ثانویه از شبکه به توربین (S1)

ادمیتانس انتقال، تأثیر انتقال اعوجاج ولتاژ هارمونیکی ناشی از شبکه را به جریان حاصلشده در ترمینال یک توربین ارزیابی میکند. هدف، بررسی تأثیر اعوجاج ولتاژ شبکه بر اعوجاج جریان هارمونیکی در ترمینال ۹ توربین بادی موجود در مزرعه بادی است.

مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه تابع انتقال از شبکه به هر یک از ۹ توربین در شکل ۱۲ نشان داده شده است. "قسمت ۱"، کابل بین محل اتصال به شبکه و توربین مورد مطالعه است. بقیه کابلهای موجود در فیدری که توربین مورد مطالعه در آن قرار گرفته است، با برچسب "قسمت ۲" است: اگر دوردست ترین توربین موجود در هر فیدر، توربین مورد مطالعه با شد، این قسمت حذف خواهد شد. "قسمت ۳" معادل کابلهای موجود در فیدر دیگر است.

با توجه به این که جریان در دو شاخه به نسبت عکس امپدانسهای آنها تقسیم می شود، جریان حاصل از اعوجاج ولتاژ شبکه در ترمینال توربین مورد مطالعه (*I*_{wr}) بهصورت زیر بهدست میآید:

$$I_{WT} = I_2 \times \frac{Z_{12}}{Z_{12} + Z_{WT}}$$
(14)

جریان I_2 خود بر اساس یک تقسیم جریان با I_1 به صورت زیر به دست میآید:

$$I_2 = I_1 \times \frac{Z_{13}}{Z_{13} + Z_1 + \frac{Z_{12}Z_{WT}}{Z_{12} + Z_{WT}}}$$
(1 Δ)



جریان I_1 خود ناشی از امپدانس کل مزرعه بادی (Z_{gT}) است.

$$I_1 = \frac{U_{grid}}{Z_{gT}} \tag{19}$$

نیز عبارت است از: Z_{gT}

$$Z_{gT} = Z_{trf+grid} + \frac{\left(\frac{Z_{WT}Z_{12}}{Z_{WT} + Z_{12}} + Z_{1}\right) \times Z_{13}}{\left(\frac{Z_{WT}Z_{12}}{Z_{WT} + Z_{12}} + Z_{1}\right) + Z_{13}}$$
(1Y)

با قرار دادن روابط (۱۵) و (۱۶) در رابطه (۱۴)، ادمیتانس انتقال مطابق رابطه (۱۸) بهدست خواهد آمد.

$$Y_{grid,WT}(\omega) = \frac{Z_{12}}{Z_{gT} \times (Z_{12} + Z_{WT})} \times \frac{Z_{13}}{Z_{13} + Z_1 + \frac{Z_{12}Z_{WT}}{Z_{12} + Z_{WT}}}$$
(1A)

که در آن $_{1}Z_{10}$ امپدانس معادل بخش سری کابل "قسمت ۱"، $_{2_{12}}Z_{13}$ ، $_{2_{13}}Z_{13}$ ، $_{13}Z_{13}$ ، $_{13}Z_{13}$, $_{13}Z_{13}Z_{13}$ امپدانس معادل "قسمت ۲" و خازن نیمه راست "قسمت ۱"، $_{2_{10}+grid}$ امپدانس معادل تقسمت ۳" و خازن نیمه چپ قسمت ۱"، $_{2_{10}+grid}Z_{10}$ معادل ترانسفورماتور و امپدانس داخلی شبکه است. Z_{WT} امپدانس معادل ترانسفورماتور و امپدانس داخلی شبکه است. Z_{WT} امپدانس معادل ترانسفورماتور و امپدانس داخلی شبکه است. Z_{WT} است و مقدار آن در بخش ۴–۲ بهدست آمد. رسم نمودار $|(\omega)|_{2_{10}}Z_{WT}$ است و مقدار آن در بخش ۴–۲ بهدست آمد. رسم نمودار $|(\omega)|_{2_{10}}Z_{WT}$ (سرمینان و مقدار آن در بخش ۴–۲ بهدست آمد. رسم نمودار $|(\omega)|_{2_{10}}Z_{WT}$ (سرمینان و مقدار آن در بخش ۴–۲ بهدست آمد. رسم نمودار $|(\omega)|_{2_{10}}Z_{WT}$ (سرمینان و مقدار آن در بخش ۴–۲ بهدست آمد. رسم نمودار $|(\omega)|_{2_{10}}Z_{WT}$ (سرمینان و مقدار آن در بخش ۴–۲ بهدست آمد. رسم نمودار $|(\omega)|_{2_{10}}Z_{WT}$ (سرمینان و مقدار آن در بخش ۴–۲ بهدست آمد. رسم نمودار $|(\omega)|_{2_{10}}Z_{WT}$ (سرمینان و مقدار آن در بخش ۴–۲ بهدست آمد. رسم نمودار $|(\omega)|_{2_{10}}Z_{WT}$ (سرمینان و مقدار آن در بخش ۴–۲ بهدست آمد. رسم مقدار از مشاب و دار نشان و محاد ادمیتانس انتقال تمامی ۴ توربین تا ۵ کیلوهرتز مشابه و رکانس جریان نسسیت آزیادی به این معنی است که در این و مرکانس جریان نسسیت آزیادی به این معنی است که در این و میرکانس جریان نسسیت آزیادی به این معنی است که در این می روبینها و کانس جریان نسسیت آزیادی به این انتقال در فرکانسهای بالاتر، انتشار هرگونه هارمونیکهای فرکانس بالا را از شبکه به توربین محدود می کند.



شکل ۱۳: ادمیتانس انتقال ثانویه از شبکه به توربینها

S2- تابع انتقال ثانویه از توربین به توربین (S2)

توابع انتقال ثانویه جریان از سایر توربینها به یک توربین مورد مطالعه، همانند تابع انتقال اولیه از یک توربین به توربین دیگر است که در بخش ۴-۲ ارائه شد. در این جا برای نمونه تنها توابع انتقال از همه توربینها به توربین ۴ بررسی میشود. برای محاسبه توابع انتقال از 5 WT 6 ،WT 7 ،WT 6 و WT 9 و WT 9 به توربین 4 WT (با توجه به مجزا بودن فیدر آنها از هم) از مدار معادل ارائه شده در شکل ۹ و برای محاسبه توابع انتقال از توربینهای 1 WT ، 2 WT و W به توربین

4 WT (با توجه به همفیدر بودن آنها) از مدار معادل ارائهشـــده در شکل ۸ استفاده می شود. نتایج مطابق شکل ۱۴ است.

همه هشت تابع انتقال، اولین تشدید خود را در فرکانس ۱۸۰۹ هرتز با دامنه ۱/۹ نشان می دهند. دامنه تابع انتقال WT 4 در دومین فرکانس تشدید، ناشی از دوردست ترین توربین موجود در فیدر با تعداد توربین بیش تر (WT 9) نسب بت به دامنه تابع انتقال ناشی از دوردست ترین توربین موجود در فیدر با تعداد توربین کم تر (WT 3) بیش تر است. این به این معنی است که توربینهای دورد ست تر تأثیر بیش تری بر آلودگی هارمونیکی توربین HT 4 دارند؛ خصوصاً توربین دوردست تر در فیدر با تعداد توربین بیش تر.



شکل ۱۴: توابع انتقال جریان ثانویه از تمامی توربینها به توربین WT4

۵-۳- ادمیتانس انتقال ثانویه از شبکه به مزرعه بادی (S3)

 I_{WF} ، (منتقال یافته به مزرعه بادی (ناشی از اعوجاج ولتاژ شبکه)، I_{WF} ، (I_{WF} و فیدر که با برچسب "قسمت ۱" و "قسمت ۲" در شکل ۱۵ نشان داده شده است، تقسیم می شود: "قسمت ۱" معادل کابل های فیدر ۱ و "قسمت ۲" معادل کابل های فیدر ۲ و اقسمت ۲" معادل کابل مای معادل اسمت ۲ معادل کابل مای معادل توریخ به معادل معادل امیدانس معادل امیدانس معادل امیدانس معادل این ایندان اینقال برآیند، برابر عکس امیدانس کل مدار است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$Y_{grid,WF}(\omega) = \frac{I_{WF}}{U_{grid}} = \frac{1}{Z_{12} + Z_{trf+grid}}$$
(19)

ادمیتانس انتقال بر آیند در شکل ۱۶ ر سم شده ا ست. بیش ترین مقدار ادمیتانس در فرکانس ۱۶۷۲ هر تز با دامنه ۰/۱۱ بهدســـت آمده



شبکه به مزرعه بادی

است. در فرکانسهای بالاتر، ادمیتانس بهسرعت کاهش مییابد.



۶- تأثیر فیلتر توربین بر انتشار هارمونیکی

توربینهای بادی امروزی در کنار مزایای خود، معایبی نیز به همراه دارند: به منظور کاهش هارمونیکهای ناشی از کلیدزنی مبدلها، به فیلترسازی هارمونیکی در محل اتصال به شبکه نیاز است. فیلتر LCL، از طرفی با خاصیت القایی در خروجی خود توانایی محدودسازی مشکلات جریان هجومی را دارد و از طرف دیگر وابستگی کمتری به پارامترهای شبکه دارد. اما در کنار این مزایا، این نوع فیلتر نسبت به نوع القایی خالص فرکانس تشدید دارد [18]. درتوربینهای بادی نوع ۳ محل قرارگیری فیلتر LCL بین مبدل سمت شبکه و محل اتصال مبدل سمت شبکه به استاتور است [۲، ۴]؛ آن گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ا ساختار کلی فیلتر LCL را نشان میدهد. مطابق این شکل، U_{o} ولتاژ ترمينال مبدل PWM (با فركانس كليدزنى ١٩٥٠ هرتز)، U_s ولتاژ استاتور، L_1 سلف مبدل سمت شبکه، R_1 مقاومت معادل L_2 ، L_1 سلف R_3 سمت اتصال به استاتور، R_2 مقاومت معادل سلف C_3 ، L_2 خازن و L_2 مقاومت میراکننده است. با صرفنظر از R_1 و R_2 ، فیلتر به صورت موازی با C_3 (به همراه R_3)، و برآیند آنها به صورت سری با C_3 است. (I_2) تابع انتقال فیلتر (H(s)) برابر نسبت جریان خروجی فیلتر (I_2)

به ولتاژ ورودی (یعنی ((۱۱،۵۶ برابر نسبت جرین حروجی قیند (۲۰ به ولتاژ ورودی (یعنی ولتاژ مبدل (U) اسبت. این نوع تابع انتقال بهعنوان تابع ادمیتانس انتقال (Y(s)) شناخته می شود [۱۵، ۱۶، ۲۶].

$$H(s) = \frac{I_2(s)}{U_o(s)} = Y(s) = \frac{1}{Z(s)}$$
(Y •)

امپدانس انتقال برابر است با:

$$Z(s) = (L_2 s \parallel (R_3 + \frac{1}{C_3 s})) + L_1 s$$

= $\frac{L_1 L_2 C_3 s^3 + (L_1 + L_2) R_3 C_3 s^2 + (L_1 + L_2) s}{L_2 C_3 s^2 + R_3 C_3 s + 1}$ (Y1)



در نتيجه:

$$H(s) = \frac{R_3 C_3 s + 1}{L_1 L_2 C_3 s^3 + (L_1 + L_2) R_3 C_3 s^2 + (L_1 + L_2) s}$$
(YY)

با صفر قرار دادن مقدار R_3 در رابطه (۲۲)، تابع انتقال فیلتر، (R_3 دو جفت قطب بر محور موهومی خواهد داشت. این قطبها سبب نو سان سیستم می شوند و در نتیجه نیاز به فیلتری دارد تا از مشکلات ناشی از تشدید اجتناب شود. مقادیر بیشتر مقاومتهای میراکننده سبب بازداری بهتر از تشدیدها می شود. بااین حال، افزایش مقدار این مقاومت تلفات توان بالاتری را در پی دارد. به صورت کلی، مقدار R_3 ، یکسوم مقدار امپدانس خازن در فرکانس تشدید تعریف میشود [16].

برای بهدست آوردن پارامترهای فیلتر از روند ارائهشده در [۱۶] استفاده شده است. مقادیر L_1 و L_1 به ترتیب ۰/۰۰۱ هانری و $\cdot/۰۰۰$ هانری و $\cdot/۰۰۷$ هانری و مقادیر R_3 و R_3 نیز ۱۰۰ میکروفاراد و $\cdot/۰۸۴۷$ اهم بهدست آمده است.

نمودار بد این تابع انتقال مطابق شـکل ۱۸ است. خط آبی رنگ، نمودار بد فیلتر LCL نصبشده سمت GSC همراه با مقاومت میراکننده است. فیلتر عملکرد قابل قبولی را برای فرکانس ۱۹۵۰ هرتز (کلیدزنی مبدل) با دامنه ۳۸/۸- دسیبل نشان میدهد و هارمونیکهای فركانس بالاتر، بیشتر تضعیف شدهاند. خطچین سیاهرنگ عملكرد فيلتر را بدون مقاومت ميراكننده نشان مي دهد. در اين حالت، پيرامون فرکانس تشـد ید فیلتر (۷۷۵ هرتز) دامنه زیادی برای تابع انتقال مشاهده می شود که به منظور اجتناب از این مقدار بالا، مقاومت میراکننده اضافه شده است. خط قرمزرنگ فیلتر L تقریبی است که در آن L برابر مجموع L_1 و L_2 با مقدار ۱/۷۳ میلی هانری است. چنین فیلتری خط آبیرنگ را در نقطهای قبل از فرکانس ۱۹۵۰ هرتز قطع می کند. در نتیجه به منظور دستیابی به تضعیف فرکانس کلیدزنی مبدل با یک فیلتر L به همان دامنه ۳۸/۸- دسی بل، باید مقدار اندوکتانس این فیلتر را به مقداری بیش از مجموع دو اندوکتانس فیلتر LCL افزایش داد. مقدار اصلاح شده این فیلتر ۷/۲ میلیهانری است که پاسخ فرکانسی آن مطابق خط سبزرنگ است.



برای بررسی تابع انتقال انتشار اولیه با حضور فیلتر، باید مدار معادل ارائه شده در بخش ۴–۱ و ۴–۲ با حضور امیدانس فیلتر ا صلاح شود. در اینجا تنها تأثیر فیلتر نصب شده در سمت ولتاژ متوسط ترانسفورماتور توربین WT9 بر انتشار اولیه به شبکه و انتشار اولیه (یا ثانویه) به توربین WT4 بررسی می شود. مدار معادل مورد استفاده برای مطالعه انتشار هارمونیکی WT 9 به شبکه در حضور فیلتر در شکل ۱۹ نشان داده شده است. امپدانس فیلتر با "قسمت ۱" و "قسمت ۲" موازی است. در نتیجه Z₁₂ به صورت زیر اصلاح می شود:

$$Z_{12new} = \frac{Z_{12} \times Z_{filter}}{Z_{12} + Z_{filter}}$$
(TT)

تابع انتقال جریان از این توربین به شبکه در این حالت عبارتند از:

$$H_{WT9,Grid}(\omega) = \frac{Z_{13}}{Z_{13} + Z_{s}} \times \frac{Z_{12new}}{Z_{12new} + Z_{1} + \frac{Z_{13} \times Z_{s}}{Z_{13} + Z_{s}}}$$
(114)

مدار معادل مورد استفاده برای مطالعه انتشار هارمونیکی WT 9 به توربین 4 WT در حضور فیلتر نیز مشابه شکل ۹ است با این تفاوت که یک امپدانس موازی با Z₁₂ نیز به آن اضافه شده که مطابق رابطه (۲۳) بهروز می شود. تابع انتقال جریان از این توربین به توربین ۴ در این حالت عبارت است از:

$$H_{WT9/WT4}(\omega) = \frac{Z_{34}}{Z_{34} + Z_{WT}} \times \frac{Z_{13}}{Z_{13} + Z_3 + \frac{Z_{34} \times Z_{WT}}{Z_{34} + Z_{WT}}} \times \frac{Z_{12}}{Z_{12} + Z_{12} + Z_{134WT}}$$
(Y Δ)

رسم نمودار $|H_{WT9/grid,WT4}(\omega)|$ تا فرکانس ۴ کیلوهرتز برای حالت با و بدون فیلتر صورت گرفته و در شکل ۲۰ نشان داده شده است. با اعمال فیلتر فرکانس تشـدید شـبکه از ۱۶۷۲ هرتز به ۱۵۱۲ هرتز می سد در حالی که فرکانس تشدید توربین ۴ از ۱۷۱۵ هرتز به ۱۴۶۶ هرتز میرسد.



شکل ۱۹: مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه تابع انتقال اولیه از یک توربین به شبکه با حضور فیلتر 15 -WT9 - grid without filter -WT9 - grid with filter -WT9 - WT4 without filter -WT9 - WT4 with filter in N انتقال 0.5 3500

فرکانس (هرتز) شکل ۲۰: تابع انتقال جریان از توربین ۹ به شبکه و به توربین ۴ در دو حالت با و بدون نصب فيلتر

2000

2500

3000

1500

500

1000

تأثیر توربین ۹ بر جابجایی فرکانسی توربین ۴ نسبت به تأثیر آن بر جابجایی فرکانسی شبکه بیش تر است. میزان انتقال با اعمال فیلتر کاهش یافته است: تأثیر توربین ۹ بر تضعیف میزان انتقال توربین ۴ نسبت به تأثير آن بر شبكه بيشتر است. با اعمال فيلتر، پيرامون فرکانس ۳۶۰۰ هرتز، دامنه تابع انتقال توربین ۹ به توربین ۴ بیشتر از دامنه تابع انتقال به شبکه است. نصب فیلتر، باعث می شود هار مونیک ها بیشتر به توربین انتشار یابند تا به شبکه. این موضوع برای فرکانسهای بالاتر از فركانس تشديد صادق است.

۷- جمع بندی نتایج

از بررسی توابع انتقال اولیه نتیجه گرفته می شود که انتشار از هر یک از توربینهای بادی در اولین فرکانس تشدید تابع انتقال آنها، با ضریب ۱۴/۷ به شبکه انتقال می یابد. فرکانس تشدید برای همه توابع انتقال اولیه از توربین به توربین، نزدیک به فرکانس کلیدزنی مبدل هاست ولی با میزان انتقال پایین. تابع انتقال برآیند برای فرکانسهای زیر ۵۰۰ هرتز به ازای توزیع زاویه فاز یکسان، با تعداد توربینها، و به ازای توزیع زاویه فاز یکنواخت، با جذر تعداد توربینها تجمیع می یابد اما برای محدوده فرکانسی ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز، انتقال تقویت شده و در فرکانس های بالاتر تضعیف می یابد. مقادیر پایین ادمیتانس انتقال ثانویه در فرکانسهای بالاتر از فرکانس کلیدزنی مبدل (۱۹۵۰ هرتز)، انتشار هرگونه هارمونیک را از شبکه به توربین محدود میکند.

حضور فیلتر LCL، تأثیر یک توربین بر جابجایی فرکانس تشدید و نیز بر تضعیف میزان انتقال جریان هارمونیکی توربین دیگر را نسبت به تأثیر آن بر شــبکه افزایش میدهد. برای فرکانسهای بالای فرکانس ت شديد توابع انتقال اوليه، ذ صب فيلتر LCL باعث تقويت دامنه انت شار جریان هارمونیکی از یک توربین به توربین دیگر می شود.

۸- نتیجهگیری

تقویت جریان هارمونیکی انتقالیافته از توربینها به شبکه در اثر تشدیدهای توابع انتقال، منجر به اثر تجمیع با ضریبی بسیار بیشتر از تعداد توربینها در محدوده فرکانسی ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز و تقویت آثار كليدزني مبدلها مي شود. ميزان پايين دامنه توابع انتقال ثانويه از شبكه به هر یک از توربینها سبب محدودیت انتشار جریانهای هارمونیکی ناشی از هارمونیکهای ولتاژ شبکه به توربینها می شود. در این مقاله اثر نصب فیلتر LCL در مبدل سمت شبکه یک توربین بادی (نوع ۳ یا ۴)، بر توابع انتقال انتشار اولیه و ثانویه نیز بررسی شد. برهم کنش امپدانس فيلتر با توابع انتقال باعث مى شود دامنه توابع انتقال اوليه از هر توربين به توربین دیگر، پیرامون ۳۶۰۰ هرتز، بیشتر از دامنه توابع انتقال اولیه از هر توربین به شبکه باشد. در این صورت سرایت جریانهای هارمونیکی انتقالی از یک توربین به توربین دیگر نگرانکننده خواهد بود. پژوهشهای بیشتر در این زمینه مستلزم در نظر گرفتن مدلهای دقیق تری از پیکربندی سیستم جمع کننده و نیز در نظر گرفتن امپدانس توربین بادی (ژنراتور القایی و مبدلهای آن) در مدل توابع انتقال است.

4000

International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon, France, 2015.

- [16] P. Zhan, W. Lin, J. Wen, M. Yao and N. Li, "Design of LCL filters for the back-to-back converter in a doubly fed induction generator," IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, D. C., USA, 2012.
- [17] H. Brantsæter, Ł. H. Kocewiak, A. R. Årdal and E. Tedesch, "Passive filter design and wind turbine modelling for system level harmonic studies," 12th Deep Sea Offshore Wind R&D Conference (EERA), Norway, Trondheim, 2015.
- [18] A. Testa, M. F. Akram, R. Burch, G. Carpinelli, G. Chang, V. Dinavahi, C. Hatziadoniu, W. M. Grady, E. Gunther, M. Halpin, P. Lehn, Y. Liu, R. Langella, M. Lowenstein, A. Medina, T. Ortmeyer, S. Ranade, P. Ribeiro, N. Watson, J. Wikston and W. Xu, "Interharmonics: theory and modeling," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2335-2348, 2007.
- [19] S. Y. Lui, C. M. Pimenta, H. A. Pereira, V. F. Mendes and G. A. Mendonca, "Aggregated DIFG wind farm harmonic propagation analysis," Brazilian Conference on Automation, Paraíba, Brazil, 2012.
- [20] Ł. H. Kocewiak, C. Álvarez, P. Muszynski, J. Cassoli and L. Shuai, "Wind turbine harmonic model and its application: overview, status and outline of the new IEC technical report," 14th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Energynautics GmbH, Brussels, Belgium, 2015.
- [21] L. H. Kocewiak, J. Hjerrild and C. L. Bak, "Wind farm structures' impact on harmonic emission and grid interaction," European Wind Energy Conference (EWEC), Warsaw, Poland, 2010.
- [22] K. Yang, Wind-Turbine Harmonic Emissions and Propagation through a Wind Farm, M.Sc. Thesis, Lulea University of Technology, Skelleftea, Sweden, 2012.
- [23] M. H. J. Bollen and S. M. Gargari, "Harmonic resonances due to transmission cables," International Conference on Innovation for Secure and Efficient Transmission Grids (CIGRE), Brussels, Belgium, 2014.
- [24] L. Petersen, S. B. Laza, V. Myagkov, F. Iov and Ł. H. Kocewiak, "Parametric variation for detailed model of external grid in offshore wind farms," 13th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power (WIW), Energynautics GmbH, Berlin, Germany, 2014.
- [25] K. Yang, On Harmonic Emission, Propagation and Aggregation in Wind Power Plants, Ph.D. Thesis, Lulea University of Technology, Skelleftea, Sweden, 2015.
- [26] A. Reznik, M. G. Simoes, A. Al-Durra and S. M. Muyeen, "Filter design and performance analysis for gridinterconnected systems," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 2, pp. 1225-1232, 2014

¹⁰ Rotor Side Converter (RSC)

- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN 21). *Renewables 2016 Global Status Report (GSR)*, REN21 Secretariat, Paris, France, 2016, http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2016/06/GSR_2 016_Full_Report.pdf.
- [2] R. Gagnon, M. Fecteau, P. Prud'Homme, E. Lemieux, G. Turmel, D. Pare and F. Duong, "Hydro-québec strategy to evaluate electrical transients following wind power plant integration in the gaspésie transmission system," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 3, no. 4, pp. 880-889, 2012.
- [3] A. Petersson, Analysis, Modeling and Control of Doublyfed Induction Generators for Wind Turbines, Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2005.
- [4] C. Larose, R. Gagnon, P. Prud'Homme, M. Fecteau and M. Asmine, "Type-III wind power plant harmonic emissions: field measurements and aggregation guidelines for adequate representation of harmonics," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 4, no. 3, pp. 797-804, 2013.
- [5] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, New York, USA, 2002.
- [6] K. Yang, M. H. J. Bollen, E. O. A. Larsson and M. Wahlberg, "Measurements of harmonic emission versus active power from wind turbines," Electric Power Systems Research, vol. 108, pp. 304-314, 2014.
- [7] K. Yang, M. H. J. Bollen and E. O. A. Larsson, "Aggregation and amplification of wind-turbine harmonic emission in a wind park," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 2, pp. 791-799, 2015.
- [8] L. Sainz, J. J. Mesas, R. Teodorescu and P. Rodriguez, "Deterministic and stochastic study of wind farm harmonic currents," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 4, pp. 1071-1080, 2010.
- [9] K. Yang, M. H. J. Bollen and M. Wahlberg, "A comparison study of harmonic emission measurements in four windparks," IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), Detroit, Michigan, USA, 2011.
- [10] S. A. Papathanassiou and M. P. Papadopoulos, "Harmonic analysis in a power system With wind generation," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 4, pp. 2006-2016, 2006.
- [11] S. T. Tentzerakis and S. A. Papathanassiou, "An investigation of the harmonic emissions of wind turbines," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 1, pp. 150-158, 2007.

ژنراتورهای القائی دوسو تغذیه بادی با استفاده از یک روش ترکیبی،» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۲، شماره ۲،

- [13] K. Yang, M. H. J. Bollen, H. Amaris and C. Alvarez, "Decompositions of harmonic propagation in wind power plant," Electric Power Systems Research, vol. 141, pp. 84-90, 2016.
- [14] K. Yang, D. Schwanz and M. H. J. Bollen, "Harmonic aggregation and amplification in a wind-park," 23rd

زيرنويسها

مراجع

⁴ Type IV

⁵ Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

⁶ Full Scale Power Converter

⁷ Point of Common Coupling (PCC)

⁸ Background Voltage Distortion

⁹ Grid Side Converter (GSC)

¹ Doubly Fed Induction Generator (DFIG)

² Type III

³ Partial Scale Power Converter