

# روشی جدید برای مطالعه اثر تجمیع انتشار جریان‌های هارمونیک در یک مزرعه بادی براساس مدل‌سازی متوسط توربین بادی نوع ۳

حامد قنواتی<sup>۱</sup>      علیرضا جلیلیان<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت- تهران- ایران

[h\\_ghanavati@elec.iust.ac.ir](mailto:h_ghanavati@elec.iust.ac.ir)

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

[jalilian@iust.ac.ir](mailto:jalilian@iust.ac.ir)

**چکیده:** ارزیابی سهم جریان هارمونیک مختلط هر توربین بادی در محل اتصال یک مزرعه بادی به شبکه (انتشار اولیه) در این مقاله ارائه شده است. بعلاوه، سهم اعوجاج ولتاژ هارمونیک پس‌زمینه شبکه بر اعوجاج جریان هارمونیک (انتشار ثانویه) هر توربین نیز ارزیابی شده است. هر دو ارزیابی بر اساس توابع انتقال اولیه و ثانویه و مدل‌سازی اجزای مزرعه بادی در حوزه فرکانس ارائه شده است. بمنظور افزایش دقت این توابع انتقال، هنگام مطالعه اثر تجمیع انتشارهای جریان هارمونیک مختلط، امیدانس توربین بادی نیز باید در توابع انتقال گنجانده شود. بنابراین، مدل جدیدی از توابع انتقال انتشار اولیه و ثانویه برای یک توربین بادی نوع ۳ بمنظور مطالعه اثر تجمیع جریان‌های هارمونیک در یک مزرعه بادی پیشنهاد شده است. این مدل مبتنی بر مدل‌سازی متوسط مبدل‌های پشت-به-پشت یک ژنراتور القایی دوسو-تغذیه، برای استخراج امیدانس برآیند یک توربین بادی در محدوده کاری خطی آن است. با اعمال این امیدانس به مدل توابع انتقال، اگر توربین‌ها جریان را با دامنه و زاویه فاز یکسان منتشر کنند، انتشار اولیه برآیند با مقداری کمتر از تعداد توربین‌ها، و اگر توربین‌ها جریان را با دامنه یکسان و توزیع یکنواخت زاویه فاز منتشر کنند، انتشار اولیه برآیند با مقداری کمتر از جذر تعداد توربین‌ها تجمیع یافته و از قانون جذر مجموع مربعات پیروی نخواهد کرد.

**کلمات کلیدی:** انتشار اولیه و ثانویه، تابع انتقال، تجمیع هارمونیک‌ها، تشدید، حوزه فرکانس، ژنراتور القایی دوسو-تغذیه، مدل‌سازی متوسط

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۰۳/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا جلیلیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - میدان رسالت - خیابان هنگام - دانشگاه علم و صنعت - دانشکده مهندسی برق

مجموعه توربین بادی (شامل مبدل‌ها، ژنراتور و فیلتر LCL) را در نظر نگرفته‌اند و تکثیر جریان‌های هارمونیک را از سمت ولتاژ-متوسط<sup>۱</sup> ترانسفورماتور توربین مورد بررسی قرار داده‌اند. تمامی مطالعات پیشین صورت‌گرفته در [۲-۵] پیرامون مدل‌سازی هارمونیک یک مزرعه بادی، توربین‌های بادی را تنها بصورت یک منبع جریان هارمونیک‌زا فرض کرده و از امیدانس داخلی مجموعه‌ی توربین بادی صرف نظر کرده‌اند. افزودن امیدانس داخلی توربین بادی بصورت موازی با منبع جریان هارمونیک‌زا (در اینجا، توربین‌های بادی)، فرکانس‌های تشدید جدیدی را در توابع انتقال یک توربین بادی به شبکه، یک توربین بادی به توربین بادی دیگر، و شبکه به توربین بادی بوجود می‌آورد.

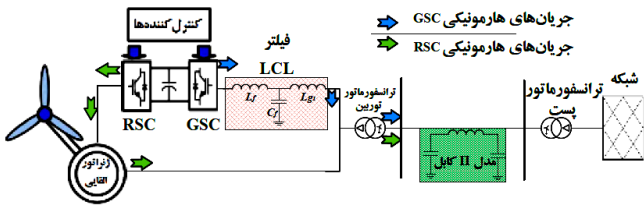
اعمال امیدانس مجموعه توربین بادی به مدل توابع انتقال، رویکرد دقیق‌تری را برای بررسی اثر تجمیع در اختیار قرار می‌دهد. اگر  $N$  توربین در یک مزرعه بادی وجود داشته باشد، تابع انتقال برآیند (هم برای ولتاژ و هم برای جریان) تابع انتقال همه  $N$  توربین در یک گره معین (مثلاً PCC) است [۵]. تجمیع هارمونیک‌ها از اینجا پدید می‌آید. دو مورد تجمیع برای زوایای فاز هارمونیک‌ها وجود دارد: (۱) زوایای فاز یکسان برای همه منابع منتشرکننده جریان؛ (۲) زوایای فاز با توزیع یکنواخت<sup>۱۱</sup> برای منابع منتشرکننده جریان. نتایج مطالعات [۲] نشان می‌دهند که به ازای زوایای فاز با توزیع یکسان<sup>۱۱</sup>، انتشار جریان هارمونیک برآیند در PCC با تعداد توربین‌ها تجمیع می‌یابد (و از قانون جمع جبری پیروی می‌کند) و به ازای توزیع یکنواخت زاویه فاز، با جذر تعداد توربین‌ها تجمیع می‌یابد (و از قانون ریشه دوم پیروی می‌کند). در این مقاله این نتایج با ارائه مدل جدیدی از توابع انتقال مورد بازنگری قرار می‌گیرند. از این رو، در این مقاله روشی مبتنی بر مدل‌سازی متوسط<sup>۱۲</sup> مبدل‌های یک توربین بادی نوع ۳ بمنظور استخراج تابع انتقال امیدانس توربین بادی لحاظ شده است و سپس امیدانس حاصل به مدل توابع انتقال استخراجی انتشار اولیه و ثانویه اعمال شده است. آنگاه طیف‌های جریانی‌ای که از سمت MV ترانسفورماتور توربین یک توربین بادی نوع ۳، شبیه‌سازی شده در محیط MATLAB، در شرایط وزش باد مختلف پایش شده است، بعنوان طیف‌های ورودی به این توابع انتقال جدید اعمال شده و اثر تجمیع در دو حالت ذکر شده بررسی شده است. روش بررسی اثر تجمیع فقط در مرجع [۲] ذکر شده است. در مقاله حاضر، روش این مرجع بر اساس مدل‌سازی متوسط به‌روز شده است و نتایج در دو حالت با مدل‌سازی متوسط و بدون مدل‌سازی متوسط ارائه شده است. استفاده از روش مدل‌سازی متوسط برای استخراج امیدانس یک توربین بادی و سپس اعمال این امیدانس در مدل‌های پیشین توابع انتقال انتشار اولیه و ثانویه برای به‌روزرسانی آنها در هیچ مرجع دیگری پیشنهاد نشده است. تأثیر مدل متوسط توربین بادی برای استخراج امیدانس توربین بادی و اعمال آن در مدل توابع انتقال برای انجام مطالعاتی بمنظور تعیین دقیق سطوح اتصال کوتاه کمینه، ارزیابی میزان هم‌بستگی ولتاژها و جریان‌های هارمونیک، و تعیین رفتار گروه‌های هارمونیک و

برهم‌کنش هارمونیک مزارع بادی با شبکه بالادستی، انتشار هارمونیک‌ها در آن و تقویت این انتشارها بواسطه تشدیدهای موجود در کابل‌های انتقال زیرزمینی، می‌تواند به افزایش مشکلات کیفیت توان منجر شود [۱]. جریان‌های هارمونیک ناشی از توربین‌های بادی موجود در مزارع بادی (انتشار اولیه<sup>۱</sup>)، پس از تجمیع، در برخی از فرکانس‌ها با دامنه بیشتری به شبکه منتقل می‌شوند [۲]. از طرفی شبکه نیز می‌تواند بعنوان یک منبع هارمونیک‌زای ولتاژ پس‌زمینه<sup>۲</sup> در نظر گرفته شود که بصورت مجزا سبب انتشار جریان هارمونیک در محل اتصال مشترک به شبکه<sup>۳</sup> می‌شود (انتشار ثانویه<sup>۴</sup>) [۳]. اعوجاج جریان هارمونیک برآیند در PCC ترکیبی از این دو نوع انتشار است [۳،۲].

اگرچه، همانطور که انتظار می‌رود، بخش عمده اعوجاج جریان هارمونیک در PCC ناشی از انتشار ثانویه است [۳]، اندازه‌گیری جریان در این محل، بخودی خود هیچ اطلاعاتی را درباره انتشار از توربین‌های مجزا (سهم هر توربین در اعوجاج جریان هارمونیک برآیند در PCC) در اختیار نمی‌گذارد؛ در واقع روشی که این دو نوع انتشار را از هم تفکیک کند، کمتر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۴]. روشی که برای تفکیک این دو نوع انتشار بکار می‌رود، مبتنی بر مفهوم تابع انتقال<sup>۵</sup> است. این توابع انتقال می‌توانند اطلاعاتی را درباره سطوح هارمونیک بدون داشتن دانش دقیقی از منابع هارمونیک‌زا در اختیار قرار دهند [۵]. از این رو، و بمنظور مطالعه انتقال هارمونیک‌ها به یک روش نظام‌مند، نویسندگان [۵،۳] دسته‌بندی آنها را به دو گروه پیشنهاد می‌دهند: انتشار اولیه و انتشار ثانویه. انتشار اولیه، انتشار ناشی از یک منبع هارمونیک‌زای مورد مطالعه است؛ برای مثال انتشار از یک توربین بادی به PCC، یا از یک توربین بادی به توربین بادی دیگر. انتشار ثانویه، انتشار ناشی از سایر مکان‌هاست؛ برای مثال انتشار ناشی از شبکه بر هر یک از توربین‌ها یا بر PCC.

ترکیب انتشار اولیه و ثانویه در PCC، خود منجر به اثر تجمیعی<sup>۶</sup> می‌شود که با اثر تجمیع ناشی از توربین‌های بادی مجزا (یعنی تجمیع برآیند انتشارهای اولیه) تفاوت دارد. چنین اثر تجمیعی در بسیاری از مؤلفه‌های فرکانسی و بخصوص در فرکانس تشدید توابع انتقال، منجر به افزایش سطوح جریان هارمونیک انتقالی به PCC (چه از شبکه و چه از مزرعه بادی) خواهد شد. در این فرکانس‌ها بیشترین تأثیر بر شبکه و تأسیسات مجاور رخ خواهد داد؛ بخصوص اگر این مؤلفه‌های فرکانسی نزدیک به فرکانس کلیدزنی مبدل نیز باشند. از طرفی مطالعات صورت‌گرفته در [۶،۷] عمدتاً به بررسی رابطه سطح انتشار جریان هارمونیک یک توربین بادی نوع ۳ (مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو-تغذیه<sup>۷</sup>) و نوع ۴ (مبتنی بر ژنراتور سنکرون آهنربا-دائم<sup>۸</sup>) با توان اکتیو خروجی توربین پرداخته‌اند، و بررسی‌های صورت‌گرفته در [۵،۳،۲] پیرامون اثر تجمیع مبتنی بر مفهوم تابع انتقال، امیدانس

تولیدی توسط GSC از طریق این عناصر القایی به شبکه انتشار می- یابند. هارمونیک‌های تولیدی توسط مبدل سمت روتور<sup>۱۴</sup> نیز از روتور به استاتور القا شده و سپس از آنجا به شبکه انتشار می‌یابند؛ شکل (۲).



شکل (۲): نمودار تک‌خطی توربین بادی نوع ۳ متصل به شبکه [۱]

## ۲-۱- مدل‌سازی مبدل سمت شبکه

GSC که مسئول کنترل ولتاژ خازن رابط DC و توان راکتیو عبوری از آن به شبکه است [۱۰]، با یک کنترل‌کننده تناسبی-تشدیدی<sup>۱۵</sup> مدل می‌شود [۱۱]. این کنترل‌کننده، جریان خروجی فیلتر LCL، یعنی  $i_{gl}$ ، و نیز بهره تناسبی حلقه داخلی برای کنترل جریان خازن فیلتر، یعنی  $i_{cf}$ ، را کنترل می‌کند [۱۱]؛ مطابق شکل (۳). تابع انتقال (تابع تبدیل) برای کنترل‌کننده PR بر اساس [۱۲، ۱۱] عبارتست از:

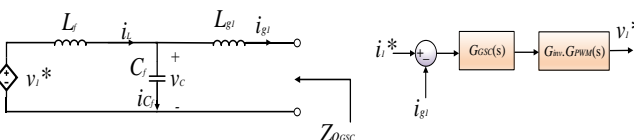
$$G_{GSC}(s) = k_p + k_i \frac{s}{s^2 + \omega_o^2} \quad (1)$$

که در آن  $k_p$  بهره تناسبی و  $k_i$  بهره انتگرالی است و مقادیر آنها مطابق [۹] بترتیب برابر ۱ و ۲۰۰۰ است.  $\omega_o = 2\pi f_o$  سرعت زاویه-ای، و  $f_o$  فرکانس سیستم قدرت برابر ۵۰ هرتز است.

تابع انتقال اینورتر منبع ولتاژ PWM بر اساس [۱۳] بصورت تأخیری با ثابت زمانی  $(T_d)$  برابر دوره تناوب نمونه‌برداری  $(T_s = 1/f_s)$  مدل می‌شود (فرکانس نمونه‌برداری،  $f_s$ ، برابر فرکانس سیستم قدرت است):

$$G_{PWM}(s) = e^{-T_d s} = e^{-1.5T_s s} = \frac{1 - 0.75T_s s + 0.1875T_s^2 s^2}{1 + 0.75T_s s + 0.1875T_s^2 s^2} \quad (2)$$

بمنظور تولید ولتاژ  $v_1^*$  تابع تبدیل فوق باید در  $G_{inv}$  (نسبت ولتاژ رابط DC به دامنه شکل موج حامل) نیز ضرب شود. این مقدار در [۹] برابر ۲۵۰ ذکر شده است.



شکل (۳): مدل تک‌فاز کنترل‌کننده GSC [۱۱]

## ۲-۲- تابع انتقال مبدل سمت روتور

RSC نیز که مسئول کنترل توان راکتیو و راکتیو عبوری از ماشین به شبکه است، در اینجا از روش کنترل برداری یا میدانی استفاده می‌کند [۱۰] که با یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی<sup>۱۶</sup> مدل می‌شود [۹]. در این کنترل‌کننده، حلقه داخلی، کنترل جریان و حلقه خارجی، کنترل

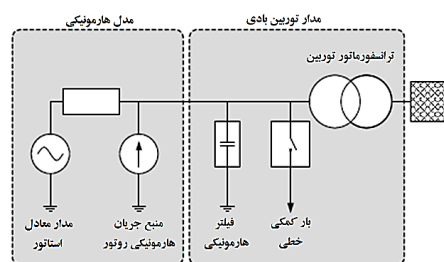
میان‌هارمونیک با افزایش تولید توان ضروری است. در نهایت باید گفت سطوح جدید بدست‌آمده برای ضریب تجمع، هنگام انتقال به شبکه بالادستی و ورود این جریان‌های هارمونیک به شبکه‌ی توزیع، و ترکیب آنها با هارمونیک‌های شبکه‌ی توزیع خود را نشان می‌دهد.

در این راستا در بخش ۲ مدل‌سازی متوسط توربین بادی نوع ۳ معرفی شده است. در بخش ۳ استخراج توابع انتقال هارمونیک در حضور امپدانس مجموعه توربین بادی بررسی می‌شود و در بخش ۴ مدل‌های بدست‌آمده در بخش قبل برای معرفی ضریب تجمع ارزیابی شده است. در بخش ۵ نیز نتایج و پیشنهادها ارائه شده است.

## ۲- مدل‌سازی متوسط توربین بادی نوع ۳

بعلت استفاده گسترده از ابزارهای الکترونیک قدرت و کنترل‌کننده‌های بازخورد در نیروگاه‌های بادی، امپدانس تونن بصورت بالقوه نه تنها شامل اجزای غیر فعال توربین بادی (برای مثال سیم‌پیچ سری، فیلتر هارمونیک موازی، سیم‌پیچ‌های ژنراتور، ترانسفورماتور و...) بلکه شامل امپدانس داخلی مبدل سمت شبکه<sup>۱۳</sup>، که توسط طرح کنترلی و نقاط کاری تعریف شده است، نیز است [۸]. ریشه اصلی مشکلات تشدید/برهم‌کنشی بین مبدل و شبکه، تشدید/بودن امپدانس (محاسبه‌شده از دید شبکه) بین خروجی اینورتر و شبکه در PCC است. بسته به طراحی اینورتر و پارامترهای شبکه، تشدیدهای هارمونیک می‌توانند در محدوده پهنای باند کنترل اینورتر نیز ظاهر شوند. این، همان محدوده فرکانسی مورد نظر است که در آن تأثیر اعوجاج هارمونیک اینورترها مطالعه می‌شود.

مبدل منبع ولتاژ مورد استفاده در DFIG ممکن است امپدانس هارمونیک بسیار پایینی داشته باشد و بعلت وابسته به فرکانس بودنش، دقیقاً نمی‌تواند با یک منبع جریان ثابت بیان شود. از این رو، نویسندگان [۸] یک معادل تونن (یا نورتون) پیشنهاد داده‌اند که بموجب آن وابستگی فرکانسی امپدانس موازی (یا سری) معادل می-تواند بدقت مدل شود. بعلاوه فیلترهای هارمونیک فرکانس بالای مورد استفاده در DFIG نیز باید در نظر گرفته شوند چرا که تشدیدهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند که می‌توانند بمنظور حفظ سادگی، در قالب یک امپدانس تونن/نورتون مدل‌سازی شوند. مثالی از ارائه هارمونیک DFIG در شکل (۱) رسم شده است [۸].



شکل (۱): ساختار مدل هارمونیک DFIG [۸]

مدل‌سازی DFIG مطابق [۹] به این صورت است: مبدل سمت شبکه از طریق یک فیلتر LCL به شبکه متصل است. هارمونیک‌های

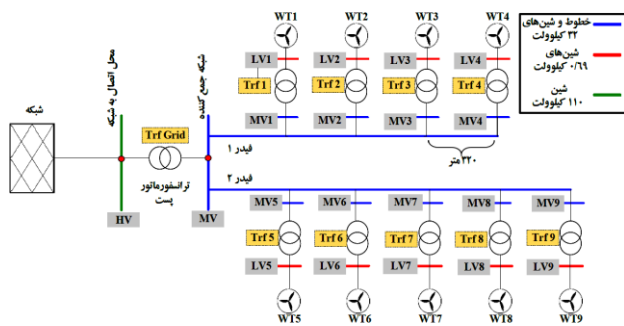
در (۴) و (۵)،  $Z_{L_f} = sL_f$  امپدانس سلف فیلتر LCL سمت GSC،  $Z_{L_{g1}} = sL_{g1}$  امپدانس سلف فیلتر LCL سمت شبکه،  $Z_{C_f} = 1/(sC_f)$  امپدانس خازن فیلتر LCL،  $Z_s = R_s + sL_s$  امپدانس استاتور،  $Z_r = (R_r / \zeta) + sL_r$  امپدانس روتور،  $Z_{L_m} = sL_m$  امپدانس مغناطیس‌کنندگی، و  $Z_{trf} = R_{trf} + sL_{trf}$  امپدانس ترانسفورماتور توربین است.

### ۳- انتقال هارمونیک‌ها

بمنظور استفاده از رویکرد نظام‌مند ارائه‌شده در [۵،۳]، نیاز است تا پس از معرفی یک مزرعه بادی نمونه، اجزای آن در حوزه فرکانس<sup>۱۷</sup>، مدل‌سازی هارمونیکی شوند و توابع انتقال بر اساس نظریه مدار<sup>۱۸</sup> استخراج شوند.

### ۳-۱- مزرعه بادی مورد مطالعه

مزرعه بادی مطابق شکل (۶) شامل ۹ توربین بادی نوع ۳ هر یک به ظرفیت ۲ مگاوات است که در دو فیدر بصورت نامتقارن توزیع شده‌اند. پارامترهای شبکه، ترانسفورماتور پست، و ترانسفورماتور توربین به‌همراه مشخصات کابل‌ها در جدول (۱) پیوست داده شده است. مقادیر پارامترهای روتور و استاتور نیز بر اساس [۳] در جدول (۲) پیوست داده شده است.



شکل (۶): مزرعه بادی مورد مطالعه بر اساس [۳]

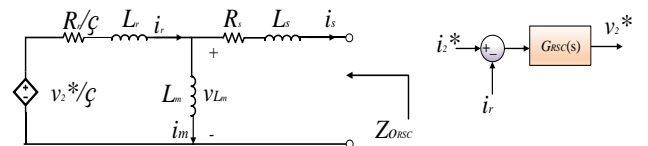
### ۳-۲- تابع انتقال انتشار اولیه

این تابع انتقال برای تعیین سهم هر یک از توربین‌ها در آلودگی هارمونیکی حاصل‌شده در PCC، بصورت نسبت جریان هارمونیکی در یک گره خروجی (در اینجا PCC) به جریان یک منبع هارمونیکی‌زا (در اینجا توربین بادی) تعریف می‌شود. مدار معادل مورد استفاده برای مطالعه تابع انتقال اولیه از یک توربین (در اینجا توربین ۱ از شکل (۶)) به شبکه مطابق شکل (۷) است. کابل بین توربین بادی مورد مطالعه در یک فیدر و محل اتصال به شبکه با برجسب "قسمت ۱"، بقیه کابل‌های متصل بین آن توربین

توان را بر عهده دارند. مدل RSC در DFIG مطابق شکل (۴) است. در شکل (۴)،  $\zeta$  نشان‌گر لغزش است. تابع انتقال کنترل‌کننده PI عبارتست از:

$$G_{RSC}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (3)$$

که در آن مقادیر  $k_p$  و  $k_i$  بترتیب برابر ۱،۸۴۷۵ و ۲۱۱۳۰ است [9].



شکل (۴): مدل تک‌فاز کنترل‌کننده RSC [۹]

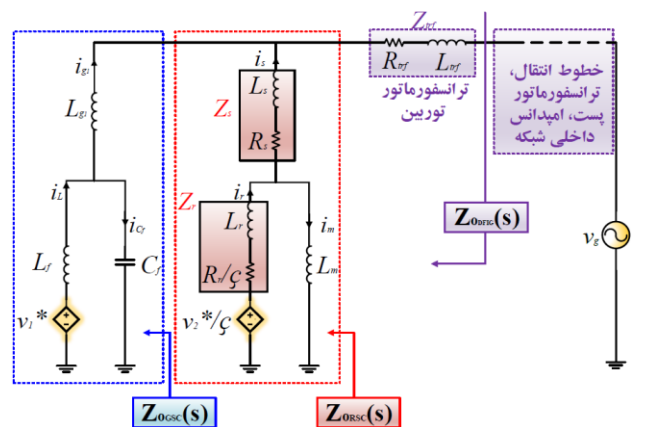
### ۳-۲- مدل‌سازی مبدل پست-به-پشت

با توجه به اینکه هر دو مبدل با هم موازی هستند، مدل مبدل پست-به-پشت برای مدل‌سازی DFIG بصورت شکل (۵) است. امپدانس معادل قسمت GSC ( $Z_{OGSC}(s)$ ) مطابق شکل (۵) عبارتست از:

$$\begin{aligned} Z_{OGSC}(s) &= Z_{L_{g1}}(s) + \frac{V_c}{-i_{g1}} \Big|_{i_1^*=0} \\ &= Z_{L_{g1}}(s) + (Z_{C_f}(s) \parallel (Z_{L_f}(s) + \frac{V_2^*}{-i_L} \Big|_{GSC \text{ Control Block}})) \\ &= Z_{L_{g1}}(s) + (Z_{C_f}(s) \parallel (Z_{L_f}(s) + G_{GSC}(s) \cdot G_{inv} \cdot G_{PWM}(s))) \end{aligned} \quad (4)$$

امپدانس معادل قسمت RSC ( $Z_{ORSC}(s)$ ) مطابق شکل (۵) عبارتست از:

$$\begin{aligned} Z_{ORSC}(s) &= Z_s(s) + \frac{V_{L_m}}{-i_s} \Big|_{i_2^*=0} \\ &= Z_s(s) + (Z_{L_m}(s) \parallel (Z_r(s) + \frac{V_2^* / \zeta}{-i_r} \Big|_{RSC \text{ Control Block}})) \\ &= Z_s(s) + (Z_{L_m}(s) \parallel (Z_r(s) + G_{RSC}(s))) \end{aligned} \quad (5)$$



شکل (۵): امپدانس خروجی معادل برای DFIG

در نتیجه امپدانس معادل DFIG ( $Z_{ODFIG}(s)$ ) عبارتست از:

$$Z_{ODFIG}(s) = Z_{trf}(s) + (Z_{OGSC}(s) \parallel Z_{ORSC}(s)) \quad (6)$$

موجود در هر فیدر باشد، این قسمت حذف خواهد شد.  $Z_1$  امپدانس معادل بخش سری کابل "قسمت ۱"،  $Z_{12}$  امپدانس معادل "قسمت ۲" و خازن نیمه راست "قسمت ۱"،  $Z_{13}$  امپدانس معادل "قسمت ۳" و خازن نیمه چپ "قسمت ۱"،  $Z_{tff+grid}$  امپدانس معادل ترانسفورماتور پست و امپدانس داخلی شبکه است. ادمیتانس انتقال بصورت نسبت جریان خروجی به ولتاژ ورودی برابر است با:

$$Y_{Grid,WT4}(\omega) = \frac{Z_{12}}{Z_{gT} \times (Z_{12} + Z_{tffur} + Z_{oDFIG})} \times \frac{Z_{13}}{Z_{13} + Z_1 + \frac{Z_{12} \times (Z_{tffur} + Z_{oDFIG})}{Z_{12} + Z_{tffur} + Z_{oDFIG}}} \quad (8)$$

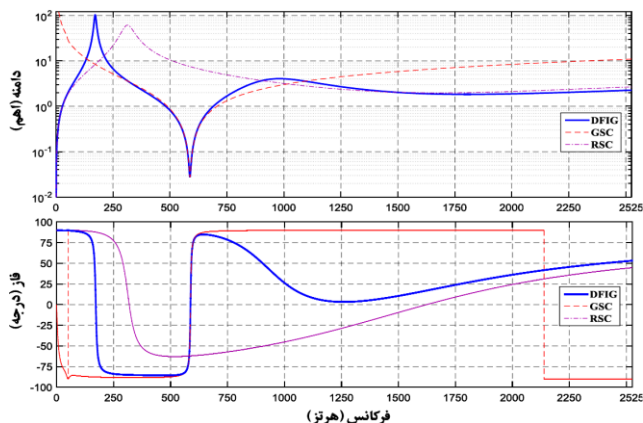
که در آن  $Z_{gT}$  امپدانس کل مزرعه بادی بوده و برابرست با:

$$Z_{gT} = Z_{tff+grid} + \left( \frac{(Z_{tffur} + Z_{oDFIG}) \times Z_{12}}{Z_{tffur} + Z_{oDFIG} + Z_{12}} + Z_1 \right) \times Z_{13} \quad (9)$$

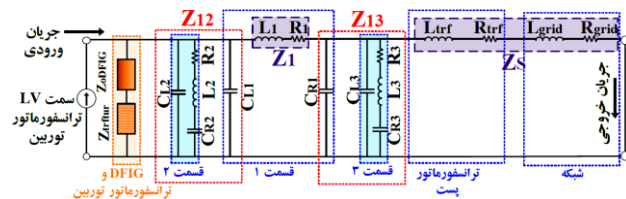
#### ۴- ارزیابی بکارگیری مدل

جدول (۳) پیوست، مقادیر پارامترهای مورد نیاز فیلتر LCL را بر اساس [14] برای شبیه‌سازی مبدل‌ها نشان می‌دهد. روند طراحی فیلتر در [15] بطور کامل ذکر شده است. بر اساس جدول (۳) و با توجه به (۶) امپدانس خروجی DFIG بهمراه زاویه فاز آن در شکل (۹) نشان داده شده است.

برهم‌کنش بین دو مبدل منجر به بوجود آمدن فرکانس‌های تشدید جدیدی در ۱۷۲ و ۹۹۵ هرتز با دامنه‌های ۱۰۴ و ۴ اهم در امپدانس خروجی DFIG شده است. این در حالیست که فرکانس تشدید مبدل RSC، ۳۱۳ هرتز با دامنه ۶۱ اهم بوده و مبدل GSC تشدید خاصی را نشان نمی‌دهد.



شکل (۹): دامنه و زاویه فاز امپدانس خروجی DFIG, GSC و RSC



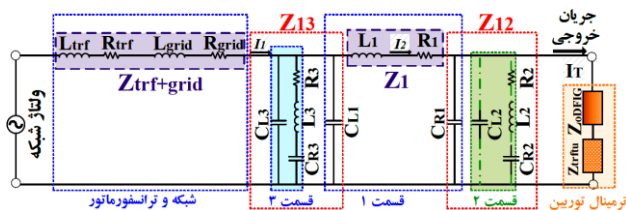
شکل (۷): مدار معادل تابع انتقال اولیه از توربین ۱ به شبکه

و توربین‌های دیگر موجود در همان فیدر با برچسب "قسمت ۲"، و کابل فیدر دیگر با برچسب "قسمت ۳" مشخص شده است.  $Z_s$  امپدانس معادل ترانسفورماتور پست و شبکه است و  $Z_1$  امپدانس معادل بخش سری کابل "قسمت ۱". هر کابل مطابق شکل دو خازن دارد: خازن نیمه چپ ( $C_L$ ) و خازن نیمه راست ( $C_R$ ) که با هم برابرند. مورد مطالعه و شبکه،  $C_{R1}/C_{L1}$  خازن نیمه چپ/راست کابل معادل بین توربین مورد مطالعه و دیگر توربین‌های موجود در همان فیدر، و  $C_{R3}/C_{L3}$  خازن نیمه چپ/راست کابل معادل فیدر دیگر است.  $Z_{12}$  امپدانس معادل "قسمت ۲" موازی با خازن نیمه چپ "قسمت ۱" است و  $Z_{13}$  امپدانس معادل "قسمت ۳" موازی با خازن نیمه راست "قسمت ۱".  $Z_{tffur}$  نیز امپدانس معادل ترانسفورماتور توربین از سمت MV آن است. تابع انتقال بصورت نسبت جریان خروجی به جریان ورودی عبارتست از:

$$H_{WT,Grid}(\omega) = \frac{Z_{13}}{Z_{13} + Z_s} \times \frac{Z_{12} \parallel (Z_{oDFIG} + Z_{tffur})}{(Z_{12} \parallel (Z_{oDFIG} + Z_{tffur})) + Z_1 + \frac{Z_{13} \times Z_s}{Z_{13} + Z_s}} \quad (10)$$

#### ۳-۳- تابع انتقال انتشار ثانویه

ادمیتانس انتقال، تأثیر انتقال اعوجاج ولتاژ هارمونیک ناشی از شبکه را به جریان حاصل شده از این اعوجاج در ترمینال یک توربین ارزیابی می‌کند. مدار معادل مورد استفاده برای محاسبه تابع انتقال از شبکه به توربین ۴ در شکل (۸) نشان داده شده است. "قسمت ۱" و "قسمت ۳" مانند بخش ۲-۳ تعریف می‌شود. بقیه کابل‌های موجود در فیدری که توربین مورد مطالعه در آن قرار گرفته است، با برچسب "قسمت ۲" مشخص شده است: اگر توربین مورد مطالعه، دور دست‌ترین توربین

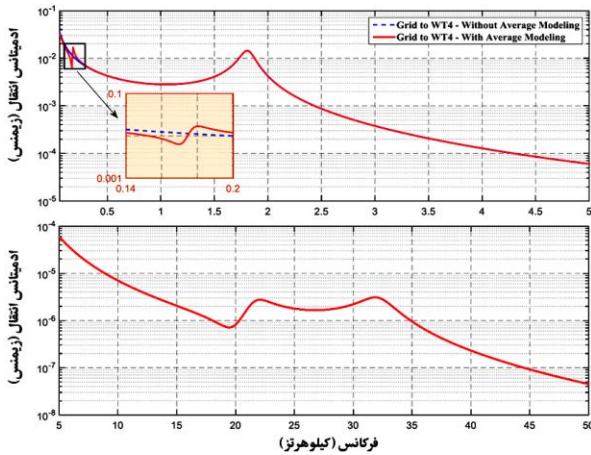


شکل (۸): مدار معادل برای محاسبه ادمیتانس انتقال ثانویه

از شبکه به توربین ۴

#### ۴-۱- انتشار اولیه از توربین به شبکه

رسم نمودار  $|H_{WT, Grid}(\omega)|$  در دو حالت با بکارگیری مدل متوسط و بدون بکارگیری مدل متوسط تا فرکانس ۵۰ کیلوهرتز بر اساس (۷) در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در حالت بکارگیری مدل متوسط در تابع انتقال، اولین فرکانس تشدید در ۱۷۲ هرتز اتفاق می‌افتد که مطابق با اولین فرکانس تشدید DFIG است. در فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز میزان انتقال برای حالت بدون بکارگیری مدل متوسط مقدار واحد است در حالیکه با بکارگیری مدل متوسط این مقدار حدود ۰,۸۵ است. بیشترین میزان تابع انتقال برای انتشار اولیه در فرکانس ۱۶۷۲ هرتز با مقدار ۱۴,۷۳ است. این در حالیست که با بکارگیری مدل متوسط DFIG این میزان به ۱۸۱۰ هرتز با مقدار ۱۱,۲۳ می‌رسد؛ یعنی افزایش فرکانس تشدید و کاهش میزان انتقال. در فرکانس‌های بالاتر از ۵ کیلوهرتز، رفتار هر دو تابع انتقال یکسان است.



شکل (۱۱): ادمیتانس انتقال ثانویه از شبکه به توربین ۴ با بکارگیری و بدون بکارگیری مدل سازی متوسط

#### ۴-۳- ضریب تجمیع: مدل یکسان و یکنواخت

بمنظور اعمال زوایای فاز در مدل توابع انتقال، نویسندگان [۲] دو نوع توزیع زاویه فاز را پیشنهاد می‌دهند: الف) توزیع "یکسان" زوایای فاز که در آن توربین‌ها جریان را با دامنه و زاویه فاز یکسان منتشر می‌کنند؛ ب) توزیع "یکنواخت" زوایای فاز که در آن توربین‌ها جریان را با دامنه یکسان ولی با زوایای فازی که توزیع یکنواختی را در بازه  $[0, 2\pi)$  نشان می‌دهد منتشر می‌کنند. ضریب تجمیع<sup>۱۹</sup> در [۲] بصورت "نسبت انتشار از مزرعه بادی به شبکه و ۱۰ برابر انتشار از یک توربین بادی" برای یک مزرعه بادی ۱۰ توربینه تعریف شده است. در این صورت برای مدل یکسان، تابع انتقال برآیند ۱۰ توربین از قانون جمع جبری<sup>۲۰</sup> پیروی می‌کند [۲] و متناسب با تعداد توربین‌هاست:

$$T_{identical}(\omega) = \left| \sum_{n=1}^N H_{T_n}(\omega) \right| \quad (10)$$

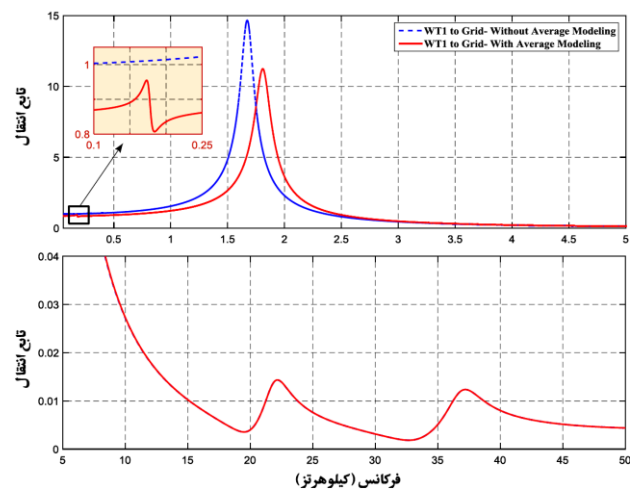
و برای مدل یکنواخت نیز تابع انتقال برآیند از قانون ریشه دوم<sup>۲۱</sup> پیروی می‌کند [۳] و متناسب با جذر تعداد توربین‌هاست:

$$T_{uniform}(\omega) = \sqrt{\sum_{n=1}^N |H_{T_n}(\omega)|^2} \quad (11)$$

در (۱۰) و (۱۱)،  $N$  تعداد توربین‌ها و  $H_{T_n}(\omega)$  تابع انتقال اولیه

هر یک از توربین‌ها به شبکه است.

برای مطالعه اثر تجمیع، ۱۰ طیف متفاوت از یک توربین بادی نوع ۳ شبیه‌سازی شده در محیط MATLAB به ازای نقاط کاری مختلف توربین بادی استخراج شده است و به مدل توابع انتقال انتشار اولیه اعمال شده است. با ضرب مؤلفه-به-مؤلفه این طیف‌ها در توابع انتقال هر توربین، سهم آن توربین در آلودگی هارمونیک برآیند در PCC (در هر مؤلفه فرکانسی بصورت مجزا) بدست می‌آید. لازم به ذکر است که در مدل "تصادفی"، توربین‌ها جریان را با دامنه یکسان ولی با زوایای فازی که توزیع خاصی را نشان نمی‌دهند (توزیعی غیر یکنواخت دارند) منتشر می‌کنند. نتایج در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): تابع انتقال اولیه از توربین ۱ به شبکه با بکارگیری و بدون بکارگیری مدل سازی متوسط

#### ۴-۲- انتشار ثانویه از شبکه به توربین

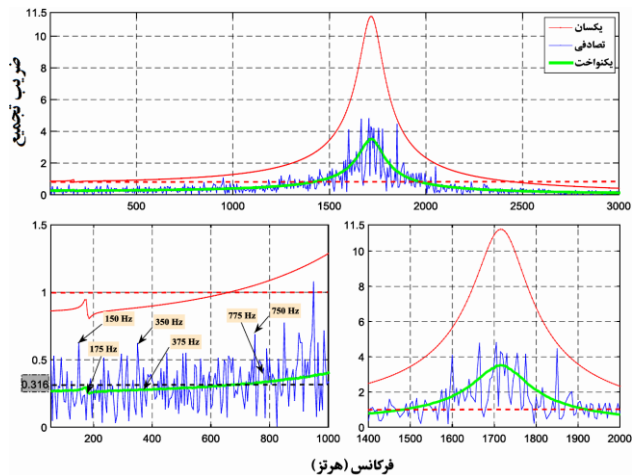
شکل (۱۱) نمودار  $|Y_{Grid, WT4}(\omega)|$  را در دو حالت با بکارگیری مدل متوسط و بدون بکارگیری مدل متوسط در مبنای لگاریتم ۱۰ تا فرکانس ۵۰ کیلوهرتز بر اساس (۸) و (۹) نشان می‌دهد. این بار نیز در حالت بکارگیری مدل متوسط در تابع انتقال، اولین فرکانس تشدید پیرامون ۱۷۲ هرتز اتفاق می‌افتد که مطابق با اولین فرکانس تشدید DFIG است. بیشترین مقدار ادمیتانس انتقال در حالت بدون بکارگیری مدل متوسط، با مقدار ۰,۰۱۴۵ زمینس در فرکانس ۱۸۰۹ هرتز اتفاق می‌افتد. در این نوع انتشار، مدل سازی متوسط مبدل، بیشترین میزان تابع انتقال و فرکانس تشدید را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به اینکه مدل‌های پیشین ارائه شده از مزرعه بادی برای مطالعه اثر تجمیع هارمونیک‌ها، در بردارنده مدل مبدل‌های ژنراتور القایی دوسو-تغذیه نیست، رویکردی مبتنی بر مدل‌سازی متوسط مبدل‌های این ژنراتور اتخاذ شده و امیدانس حاصل از آن به مدل پیشین توابع انتقال اضافه شد. با اعمال امیدانس مبدل‌ها، از بیشترین مقدار تابع انتقال کاسته شده و فرکانسی که بیشترین مقدار تابع انتقال در آن رخ می‌دهد نیز افزایش می‌یابد. اعمال مدل متوسط مبدل‌ها در فرکانس‌های بالاتر از ۵۰۰ هرتز، بر میزان انتقال ثانویه از شبکه به توربین‌ها بی‌تأثیر بوده ولی انتقال اولیه را بشدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

فرکانس تشدید امیدانس ژنراتور در هر دو نوع توزیع یکسان و یکنواخت در فرکانس ۱۷۲ هرتز مشهود است. با افزایش فرکانس تشدید، محدوده فرکانسی ناحیه تقویت انتشار نیز جابجا شده و به فرکانس‌های بالاتر منتقل می‌شود. تقویت انتشار این بار از حدود ۱,۴۵ تا ۱,۹۵ کیلوهرتز اتفاق می‌افتد که به فرکانس کلیدزنی مبدل‌ها (۱۹۵۰ هرتز) نزدیک است. منحنی مربوط به زاویه فاز با توزیع "یکنواخت" اکنون با مقداری کمتر از عکس جذر تعداد توربین‌ها، یعنی  $1/\sqrt{10}$  بجای  $1/\sqrt{10}$ ، تجمیع می‌یابد. تا فرکانس ۶۵۰ هرتز، انتشار کل مزرعه بادی، از ۱۰ برابر انتشار یک توربین برای توزیع "یکسان" کمتر است. این موضوع نشان‌دهنده عدم تبعیت توزیع "یکسان" از قانون جمع جبری و توزیع "یکنواخت" از قانون ریشه دوم است.

مزیت اصلی مدل‌سازی پیشنهادی مبتنی بر روش مدل‌سازی متوسط، سادگی پیاده‌سازی آن است. با این حال، دقت آن هنگامی که مبدل در محدوده غیر خطی عملیاتی PWM کار می‌کند، کاهش می‌یابد. اگرچه این موضوع تأثیر زیادی بر مطالعه تشدید ندارد چرا که فرکانس کلیدزنی بالاست. از این رو مدل‌سازی مبدل‌ها بر اساس روش‌های سیگنال کوچکی چون فضای حالت هارمونیک<sup>۲۲</sup> که نواحی کار غیر خطی مبدل‌ها را نیز دربرمی‌گیرد، پیشنهاد می‌شود. استخراج مدل ریاضی نسبت ضریب تجمیع با تعداد توربین‌ها در حالت بکارگیری مدل‌سازی متوسط و نیز در نظر گرفتن پارامترهای واقعی سیستم جمع‌کننده مزارع بادی ایران در مدل توابع انتقال و مقایسه با نتایج بدست‌آمده در این مقاله گام‌های دیگری برای پیشبرد این مقاله هستند.



شکل (۱۲): ضریب تجمیع در سه حالت توزیع زاویه فاز "یکسان"، "یکنواخت" و "تصادفی" با بکارگیری مدل‌سازی متوسط

با اعمال روش مدل‌سازی متوسط، منحنی مربوط به زاویه فاز با توزیع "یکسان" که مطابق [۲] تا حدود فرکانس ۲۰۰ هرتز از مقدار واحد (خط چین قرمز، مقدار واحد را برای ضریب تجمیع علامت‌گذاری می‌کند: مقادیر زیر این خط، تضعیف و بالای آن تقویت را نشان می‌دهند) شروع می‌شود، اکنون تا حدود فرکانس ۶۵۰ هرتز زیر مرز واحد قرار دارد (قسمت پایین سمت چپ شکل (۱۲))؛ یعنی تا فرکانس ۶۵۰ هرتز، انتشار کل مزرعه بادی، از ۱۰ برابر انتشار یک توربین کمتر است.

این موضوع در مورد منحنی مربوط به زاویه فاز با توزیع "یکنواخت" نیز صادق است: منحنی سبزرنگ که مطابق [۲] تا فرکانس ۲۰۰ هرتز با ضریب  $0,316 (1/\sqrt{10})$  که همان عکس جذر تعداد توربین‌هاست) تجمیع پیدا می‌کند، اکنون با مقداری کمتر از آن تجمیع می‌یابد. این مقدار حدود  $0,27 (1/\sqrt{14})$  است. همچنین تشدید امیدانس DFIG در فرکانس ۱۷۲ هرتز در هر دو توزیع یکسان و یکنواخت مشهود است. بیشترین میزان ضریب تجمیع در فرکانس ۱۷۱۵ هرتز و با مقادیر ۱۱,۲۵ برای منحنی مربوط به زاویه فاز با توزیع "یکسان" و ۳,۵۳ برای منحنی مربوط به زاویه فاز با توزیع "یکنواخت" بدست آمده است. با افزایش فرکانس تشدید، محدوده فرکانسی ناحیه تقویت انتشار نیز جابجا شده و به فرکانس‌های بالاتر منتقل می‌شود. تقویت انتشار این بار از حدود ۱,۴۵ تا ۱,۹۵ کیلوهرتز اتفاق می‌افتد (قسمت پایین سمت راست شکل (۱۲)). این، بعلاوه ترکیب توابع انتقال مجزا با مقادیر زیاد و حذف محدود برای این مرتبه‌های هارمونیک است. ضریب تجمیع محاسبه شده از الگوی تصادفی، جایی بین نتایج منحنی مربوط به زاویه فاز با توزیع "یکسان" (خط قرمز پیوسته) و منحنی مربوط به زاویه فاز با توزیع "یکنواخت" (خط سبز پیوسته) است.

در این بخش، فهرست جداول مورد ارجاع در متن آورده شده است.

## مراجع

- [1] Larose, C., Gagnon, R., Prud'Homme, P., Fecteau, M., Asmine, M., "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.
- [2] Yang, K., Bollen, M. H. J., Larsson, E. A., "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.
- [3] Yang, K., Bollen, M. H. J., Amaris, H., Alvarez, C., "Decompositions of Harmonic Propagation in Wind Power Plant", Electric Power Systems Research, Vol. 141, pp. 84-90, 2016.
- [4] Yang, K., Wind-Turbine Harmonic Emissions and Propagation through a Wind Farm, Licentiate Dissertation, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Lulea University of Technology, Skelleftea, Sweden, 2012.
- [5] Yang, K., On Harmonic Emission, Propagation and Aggregation in Wind Power Plants, Ph. D. Dissertation, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Lulea University of Technology, Skelleftea, Sweden, 2015.
- [6] Yang, K., Bollen, M. H. J., Larsson, E. A., Wahlberg, M., "Measurements of Harmonic Emission Versus Active Power from Wind Turbines", Electric Power Systems Research, pp. 304-314, 2014
- [7] Yang, K., Bollen, M. H. J., "Interharmonic Currents from a Type-IV Wind Energy Conversion System", Electric Power Systems Research, Vol. 143, pp. 357-364, 2017.
- [8] Kocewiak, Ł. H., Álvarez, C., Muszynski, P., Cassoli, J., Shuai, L., "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.
- [9] Lui, S. Y., Pimenta, C. M., Pereira, H. A., Mendes, V. F., Mendonca, G. A., "Aggregated DFIG Wind Farm Harmonic Propagation Analysis", Brazilian Conference on Automation, Paraíba, Brazil, 2012.
- [10] Ghassem Zadeh, S., Hosseini, S. H., Gharehpetian, G. B., "Modeling of Wind Energy Conversion System Including DFIG for Distributed Generation Studies", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers (JIAEEE), Vol. 7, No. 2, pp. 51-64, 2010.
- [11] Wang, F., Duarte, J. L., Hendrix, M. A. M., Ribeiro, P. F. "Modeling and Analysis of Grid Harmonic Distortion Impact of Aggregated DG Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 3, pp. 786-797, 2011.
- [12] Ebrahimzadeh, E., Blaabjerg, F., Wang, X., Bak, C. L., "Efficient Approach for Harmonic Resonance Identification of Large Wind Power Plants", 7th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Vancouver, Canada, 2016.
- [13] Zhang, S., Jiang, S., Lu, X., Ge, B., Peng, F. Z., "Resonance Issues and Damping Techniques for Grid-Connected Inverters with Long Transmission Cable", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 1, pp. 110-120, 2014.
- [14] Reznik, A., Simoes, M. G., Al-Durra, A., Muyeen, S. M., "Filter Design and Performance Analysis for Grid-

جدول (۱): پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی مزرعه بادی [۲]

پارامتر	مقدار	
شبکه اصلی	ولتاژ $(V_{HV})$	۱۱۰ کیلوولت
	سطح خطا $(S_g)$	۱۷۱۶ مگاولت آمپر
	مدل	منبع ولتاژ
	امپدانس داخلی $(R_{grid} + jX_{grid})$	۰.۶۰۴ + j 0.۰۶۰۴ پریونیت
ترانسفورماتور پست	ضریب میرایی $(b_g)$	۰.۸
	توان نامی $(S_{rf,grid})$	۳۰ مگاولت آمپر
	ولتاژ سمت HV $(V_{HV})$	۱۱۰ کیلوولت
	ولتاژ سمت MV $(V_{MV})$	۳۲ کیلوولت
	امپدانس $(Z_{rf,grid})$	٪ ۱۰
کابل ها	نسبت X/R	۱۲
	ضریب میرایی $(b_r)$	۱
	فاصله بین توربین های مجاور $(l)$	۲۲۰ متر
	مقاومت $(r)$	۰.۱۳ اهم بر کیلومتر
	ظرفیت خازنی $(c)$	۰.۲۵ میکروفاراد بر کیلومتر
ترانسفورماتور توربین	ظرفیت القایی (اندوکتانس؛ $L$ )	۰.۳۵۶ میلی هانری بر کیلومتر
	مدل	$\Pi$
	ضریب میرایی $(b_c)$	۰.۶
	توان نامی $(S_{rf,turbine})$	۲.۵ مگاولت آمپر
	ولتاژ سمت MV $(V_{MV})$	۳۲ کیلوولت
ترانسفورماتور توربین	ولتاژ سمت LV $(V_{LV})$	۶۹۰ ولت
	امپدانس $(Z_{rf,turbine})$	٪ ۶
	نسبت X/R	۸.۳۴
	ضریب میرایی $(b_t)$	۱

جدول (۲): مقادیر پارامترهای روتور و استاتور بر اساس [3]

پارامتر	مقدار	
روتور	مقاومت $(R_r)$	۰.۰۲۸۹ پریونیت
	راکتانس $(X_r)$	۰.۰۸۵ پریونیت
	لغزش $(s)$	۰.۷
استاتور	مقاومت $(R_s)$	۰.۱۰۵ پریونیت
	راکتانس $(X_s)$	۰.۱۷۹ پریونیت
	راکتانس مغناطیسی کنندگی $(L_m)$	۷/۰۸۹ پریونیت
	ضریب میرایی $(b_s)$	۰/۸

جدول (۳): پارامترهای مورد نیاز فیلتر LCL

برای مدل سازی مبدل ها [14]

پارامتر	مقدار	
فیلتر LCL	سلف سمت مبدل GSC $(L_f)$	۱ میلی هانری
	خازن $(C_f)$	۱۰۰ میکروفاراد
	سلف سمت شبکه $(L_g)$	۰.۷۳ میلی هانری
	فرکانس کلیدزنی مبدل	۱۹۵۰ هرتز
	ظرفیت خازن رابط DC	۲۰۰۰ میکروفاراد
ولتاژ رابط DC	۱۲۰۰ ولت	



Interconnected Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, No. 2, pp. 1225-1232, 2014.  
[۱۵] موحدی تبار، علی، منفرد، محمد، "طراحی کنترل کننده دو حلقه‌ای برای فیلتر فعال تک‌فاز موازی بدون سنسور با خروجی LCL با در نظر گرفتن تأخیر محاسبات و مدولاسیون"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال چهاردهم، شماره اول، صفحات ۱۳۸-۱۲۷، ۱۳۹۶.

## زیر نویس‌ها

- <sup>1</sup> Primary Emission
- <sup>2</sup> Background Voltage
- <sup>3</sup> Point of Common Coupling (PCC)
- <sup>4</sup> Secondary Emission
- <sup>5</sup> Transfer Function
- <sup>6</sup> Aggregation Effect
- <sup>7</sup> Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)
- <sup>8</sup> Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)
- <sup>9</sup> Medium-Voltage (MV)
- <sup>10</sup> Uniform Distribution
- <sup>11</sup> Identical Distribution
- <sup>12</sup> Average Modeling
- <sup>13</sup> Grid Side Converter (GSC)
- <sup>14</sup> Rotor Side Converter (RSC)
- <sup>15</sup> Proportional Resonant (PR)
- <sup>16</sup> Proportional Integral (PI)
- <sup>17</sup> Frequency Domain
- <sup>18</sup> Circuit Theory
- <sup>19</sup> Aggregation Factor
- <sup>20</sup> Algebraic Summation Rule
- <sup>21</sup> Square Root Rule
- <sup>22</sup> Harmonic State Space (HSS)