

کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوگانه برای توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی در حالت مستقل از شبکه

معراج نوروزی^{۱*}، شاهرخ فرهنگی^۲، حسین ایمان عینی^۳

^۱ کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران، m.noroozi@ut.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران، farhangi@ut.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران، imaneini@ut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG) برای توربین بادی سرعت متغیر جهت تغذیه بار محلی در حالت مستقل از شبکه، مورد تحلیل و شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. در این مقاله، منظور از توربین بادی مستقل از شبکه، تغذیه بار به‌نهایی، بدون وجود عناصر ذخیره کننده انرژی و بدون حضور دیگر منابع تولید پراکنده است. تعداد زیادی از توربین‌های بادی نصب شده در ایران، از نوع ۶۶۰ کیلوواتی می‌باشند و از طرفی تاکنون در مراجع داخل، مطالعه بر روی توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی با استفاده از DFIG و در حالت مستقل از شبکه صورت نگرفته است، بنابراین با توجه به مزایای استفاده از DFIG در توربین بادی، ضرورت این نوع پژوهش احساس می‌شود. در همین راستا، مطالعه موردی روی توربین بادی ۶۶۰ کیلووات شرکت وستاس و با هدف طراحی ساختار کنترلی مطلوب به منظور استفاده از DFIG در حالت مستقل از شبکه انجام می‌شود. دو روش کنترل مستقیم ولتاژ و غیرمستقیم ولتاژ استاتور بر پایه کنترل برداری نیز بررسی می‌شوند. در انتها برای صحبت‌سنگی، دو سناریو جهت شبیه‌سازی مذکور نظر است که نتایج آن به‌طور مفصل، مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: ژنراتور القایی تغذیه دوگانه، مستقل از شبکه، بار محلی، توربین بادی ۶۶۰ کیلووات، کنترل برداری.

۱. مقدمه

بار محلی خود را به خوبی تأمین کند، برقراری پایداری در این سیستم پیچیده‌تر خواهد بود. به طور کلی، موارد زیر از یک توربین بادی در حالت مستقل از شبکه انتظار می‌رود:

- تنظیم و ثبت دامنه ولتاژ استاتور بر روی یک مقدار ثابت
- تنظیم و ثبت فرکانس استاتور بر روی یک مقدار ثابت
- تا حد امکان مقدار توان مورد نیاز بار به خوبی پاسخ داده شود.
- پس از بررسی مراجع مختلف برای حالت مستقل از شبکه، می‌توان بیان کرد در بیشتر مراجع از روش کنترل برداری در ژنراتور القایی تغذیه دوگانه استفاده کرده‌اند. در همین راستا مراجع [۶ و ۷] که تا سال ۲۰۱۴، حدود ۵۰۰ مرتبه، توسط مقالات دیگر ارجاع داده شده‌اند، از قوی‌ترین مراجع در زمینه کنترل توربین بادی در حالت مستقل و همچنین متصل به شبکه‌اند، در این مقاله‌ها به صورت پایه‌ای این موضوع بررسی شده است. در مراجع دیگر نیز مشاهده می‌شود که به طریقی، از روش کنترلی ارائه شده در این مقاله‌ها الگوبرداری شده است. از طرف دیگر، اساس روش کنترلی در این مقاله‌ها نیز براساس مفاهیم ذکر شده در مرجع [۸] است. تاکنون تعبیرهایی برای توربین بادی مستقل از شبکه، در مراجع مختلف پیان شده است که در زیر چند نمونه ذکر شده است:

۱. عملکرد توربین بادی در ریزشبکه^۵ که در سال‌های اخیر، مقالات مختلفی در این زمینه ارائه شده است. سیستم‌های کنترلی برای عملکرد در حالت ریزشبکه، متفاوت و متنوع‌اند. در این حالات، توربین بادی به همراه دیگر منابع تولید پراکنده، به صورت اشتراکی عمل می‌کند و حتی در برخی از مقالات، از توربین بادی برای بهبود پایداری سیستم ریزشبکه و براساس روش دروب کنترل^۶ استفاده می‌شود [۹]. این روش برای کنترل یک توربین بادی مفید به نظر نمی‌رسد و استفاده از آن در ریزشبکه یک روش مفید است.

۲. عملکرد در مزارع بادی که خود نوعی ریزشبکه محسوب می‌شود. در این حالت نیز ارتباط بین توربین‌های بادی و نحوه کنترل کل مزرعه بادی مدنظر است، برای مثال در مرجع [۱۰]، روش نوینی جهت حفظ پایداری مزرعه بادی در حالت جزیره‌ای ارائه می‌کند که به موجب آن، هر توربین بادی (DFIG) به طور مستقل از دیگر توربین‌ها، ولتاژ استاتور خود را روی مقدار ثابت کنترل می‌کند و تمام واحدهای بادی در یک فرکانس مشترک سنتکرون می‌شوند. این حالت نیز براساس رابطه توان-فرکانس و توسط روش دروب کنترل تنظیم شده و بار کل به واسطه این فرکانس مشترک، بین واحدها تقسیم می‌شود.

ساختر ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG) به علت داشتن قابلیت‌های منحصر به فردی که از نظر کنترلی و سیستمی دارد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا بخش عظیمی از مقالات در زمینه کاربرد توربین بادی متصل به شبکه مطرح شده‌اند، اما جهت استفاده کامل از ظرفیت یک توربین بادی، کنترل در حالت مستقل از شبکه نیز اهمیت پیدا می‌کند، زیرا عملکرد کنترلی در این شرایط بسیار حساس است [۱]. به طور کلی در ساختار DFIG متصل به شبکه، استاتور مستقیماً به شبکه وصل می‌گردد و روتور به واسطه مبدل پشت به پشت از شبکه تغذیه می‌شود، در نهایت با کنترل مناسب بر روی مبدل پشت به پشت^۲، به اهداف کنترلی مورد نظر می‌توان دست یافت. ساختار پشت به پشت از مبدل‌های سمت بار (LSC)^۳ و مبدل سمت روتور (RSC)^۴ تشکیل شده است. استقلال از شبکه اصلی می‌تواند علل مختلفی از قبیل عدم امکان حضور شبکه اصلی، مسائل جغرافیایی، مسائل اقتصادی و مسائل سیاسی داشته باشد [۲]. در برخی از موارد نیز ممکن است قابلیت عملکرد در هر دو حالت متصل به شبکه و مستقل از شبکه مورد نیاز باشد. برای مثال در بازه‌ای از زمان، به دلیل وقوع خطای خاصی، توربین بادی از شبکه اصلی منفصل گردد که در این حالت توربین بادی باید بتواند به طور مستقل از شبکه، تقاضای مورد نیاز بار را تا حد ممکن پاسخ‌گو باشد. بنابراین عملکرد مناسب در حالت مستقل از شبکه بسیار حائز اهمیت است. ژنراتور القایی تغذیه دوگانه علاوه بر کاربرد در توربین‌های بادی سرعت متغیر، دارای کاربردهای متعددی است. تاکنون در مراجع مختلف کاربردهای متنوعی از کنترل یک DFIG ذکر شده است. برای نمونه در مرجع [۳]، به کاربرد ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در ریزشبکه‌ها اشاره شده است. در مرجع [۴]، استفاده از چند DFIG در توربین‌های بادی به صورت موازی، به منظور تغذیه بار محلی سه فاز به عنوان یک سیستم مستقل از شبکه، مطرح شده است. همچنین در مرجع [۵]، به استفاده از DFIG در کنترل هوایپما به منظور افزایش قابلیت اطمینان اشاره کرده است. از ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در ساختار ژنراتورهای برق آبی کوچک نیز می‌توان استفاده نمود [۵]. در این مقاله، کنترل روی عملکرد و رفتار یک توربین بادی به تهایی، بدون وجود منابع ذخیره کننده انرژی و بدون حضور دیگر منابع تولید پراکنده مدنظر است. بنابراین از آنجاکه سیستم مورد نظر باید به تهایی

-
1. Doubly fed induction generator
 2. Back to Back Converter
 3. Load Side Converter
 4. Rotor Side Converter

کترلی برای دستیابی به عملکرد مطلوب درباره توربین بادی ۶۶۰ کیلووات مورد نظر پرداخته می‌شود. سپس به منظور اعتباربخشی به طراحی‌ها، شبیه‌سازی‌های مختلفی روی توربین مورد مطالعه انجام می‌گیرد که در نهایت، براساس استانداردهای موجود، میزان دقیق در عملکرد کترلی سیستم تحت مطالعه، مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند.

۲. بررسی توربین بادی ۶۶۰ کیلووات

براساس پایگاه اینترنتی سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، حدود ۷۸٪ از توربین‌های بادی نصب شده در کشور ایران تا پایان سال ۹۱، از نوع توربین‌های ۶۶۰ کیلوواتی است، از طرف دیگر طبق اعلام این سازمان، تعداد زیادی از پروژه‌های انجام شده و در دست انجام، مربوط به توربین‌های ۶۶۰ کیلوواتی است [۱۹]. به همین دلیل، مطالعات و شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله، براساس توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی صورت گرفته است. شایان ذکر است تاکنون در مراجع داخل کشور، مطالعه و بررسی برای توربین بادی مستقل از شبکه بر روی توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی با استفاده از DFIG صورت نگرفته است و با توجه به مزایای استفاده از DFIG در توربین بادی، ضرورت این نوع پژوهش‌ها احساس می‌شود. بنابراین برای بررسی دقیق‌تر مدل توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی، از اطلاعات اخذ شده مربوط به شرکت وستاس برای توربین بادی V47-660 kW استفاده شده است [۲۰]. برخی از این اطلاعات در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): اطلاعات توربین بادی ۶۶۰ کیلووات شرکت وستاس (Vestas V47-660 kW)

47m	قطر پره‌ها
۱۷۳۵ m ²	مساحت جاروب شده توسط پره‌ها
55 m	ارتفاع برج
28.5 rpm	سرعت نامی دورانی پره‌ها
3	تعداد پره‌ها
Pitch Control/OptiSlip	روش تنظیم توان
4 m.s ⁻¹	سرعت شروع
15 m.s ⁻¹	سرعت نامی (۶۶۰ کیلووات)
25 m.s ⁻¹	سرعت قطع
660 kW	توان نامی خروجی ژنراتور
50 Hz	فرکانس نامی ژنراتور

به علت آنکه رابطه ضریب توان^۱ (Cp) برای توربین ۶۶۰ کیلووات در مراجع به صورت دقیق بیان نشده است، برای منحنی توان و منحنی

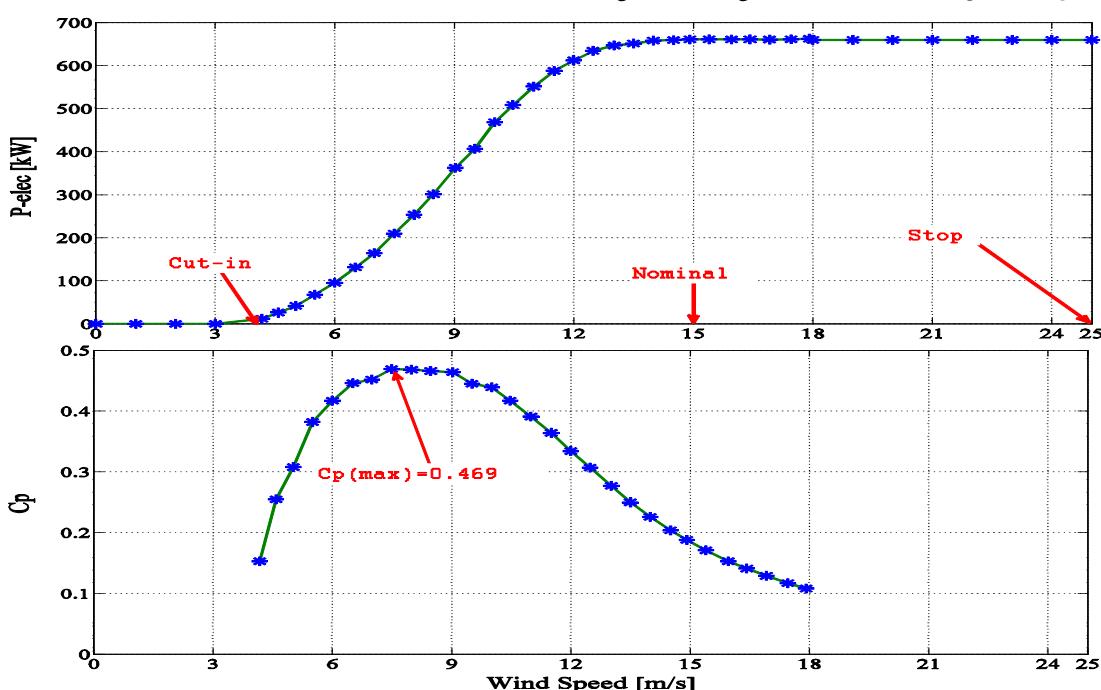
۳. عملکرد توربین بادی به کمک یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی^۲ جانبی در حالت مستقل از شبکه. در این حالت عموماً به مبدل‌ها و ادوات کترلی جانبی نیاز است که عمل شارژ و دشارژ منبع ذخیره‌کننده انرژی را بر عهده دارد و از طرف دیگر به لحاظ اقتصادی نیز فقط تا محدوده توانی خاصی استفاده از آن‌ها قابل توجیه است. از جمله منابع ذخیره‌کننده انرژی می‌توان به باتری‌ها [۱۱]، خازن‌ها و ابرخازن‌ها، استفاده از هوای فشرده، انرژی شیمیایی در پیل سوختی، انرژی جنبشی در فلای ویل، انرژی مغناطیسی در سلف و... اشاره کرد [۱۲]. هرچند استفاده از سیستم انرژی ذخیره‌ساز انرژی جانبی، مزایایی به همراه دارد و بازده و پایداری سیستم را افزایش می‌دهد، نیاز به ادوات جانبی و محدودیت اقتصادی آن‌ها، از جمله معایب این سیستم‌ها محسوب می‌شود. برای مثال استفاده از باتری، برای همه توربین‌های بادی درون یک مزرعه بادی، مقرنون به صرفه به نظر نمی‌رسد. با توجه به تعبیرهای مختلف مذکور، در این مقاله کترل عملکرد و رفتار یک توربین بادی به تنهایی و بدون منابع ذخیره‌کننده انرژی مدد نظر است. در این حالت، نقش کترل کننده‌ها بیشتر حائز اهمیت است و از آنجاکه سیستم مورد نظر به تنهایی باید باز محلی خود را به خوبی تأمین کند و ادوات جانبی نیز در سیستم وجود ندارد، کترل و برقراری پایداری در این نوع سیستم، پیچیده‌تر خواهد بود. توانایی تأمین بارهای نامتعادل و غیرخطی در توربین بادی مستقل از شبکه مهم است، در مرجع [۱۳]، به خاصیت استفاده از فیلتر فعال در کترل DFIG در حالت مستقل از شبکه مطرح شده است. این مفهوم برای بارهای غیرخطی کاربردی است و به توربین بادی توانایی تعزیزی این نوع بارهای محلی را می‌دهد. در مواجهه با بارهای نامتعادل، با جبران‌سازی مؤلفه توالي منفی اثر بار نامتعادل را از بین می‌برند [۱۴]، در مرجع [۱۵] نیز به کترل در حالت مستقل از شبکه برای بارهای نامتعادل اشاره شده است. در مرجع [۱۶] از روش کترلی پیش‌بین برای حلقه‌های کترلی DFIG در حالت مستقل از شبکه استفاده شده است. در برخی از کاربردها، کترل در حالت مستقل از شبکه بدون استفاده از سنسور سرعت، مد نظر است که براساس مدل ماشین، سرعت تخمین زده می‌شود. در مراجع [۱۷ و ۱۸] به کاربرد بدون سنسور اشاره شده است. روند ارائه مطالب در این مقاله، به این صورت است که ابتدا مطالعه موردنی روی توربین بادی ۶۶۰ کیلووات مورد نظر انجام می‌گیرد و سپس ساختار ژنراتور تغذیه دوگانه و روابط حاکم بر توربین بادی در حالت مستقل از شبکه، به همراه اصول کترلی مبدل‌های آن مطرح می‌شود. در ادامه به طراحی ساختار

کنترل ژنراتور الکتری تغذیه دوگانه برای توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی...

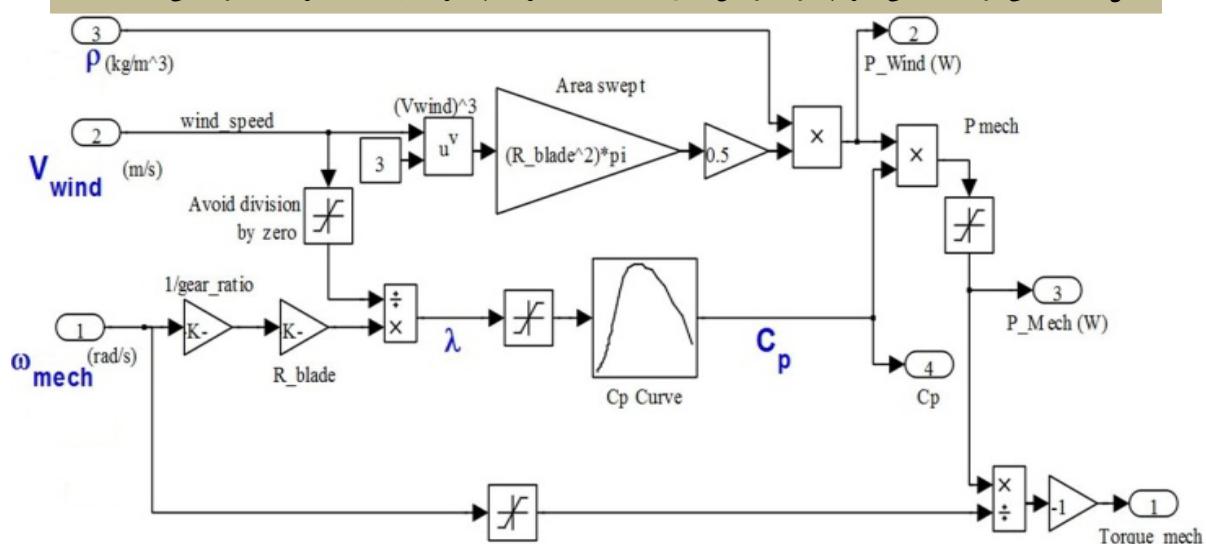
۲۷

نمایش داده شده، شایان ذکر است این منحنی ها برای توربین ۶۶۰ کیلوواتی، اولین بار در این مقاله استخراج شده اند. با توجه به شکل (۳) مشاهده می شود به ازای یک سرعت باد ثابت با تغییر سرعت روتور، توان مکانیکی دریافت شده از باد نیز تغییر می کند، از این خاصیت برای حالت توربین بادی متصل به شبکه با عنوان ریدیابی بیشینه توان (MPPT) استفاده می شود. در واقع فرمان سرعت چرخش روتور توربین طوری صادر می شود که به ازای سرعت باد مشخص، همواره بیشترین توان مکانیکی قابل دریافت از توربین استحصال گردد. مکان هندسی نقاط بیشینه توان همان قله های منحنی ها در شکل (۴) هستند.

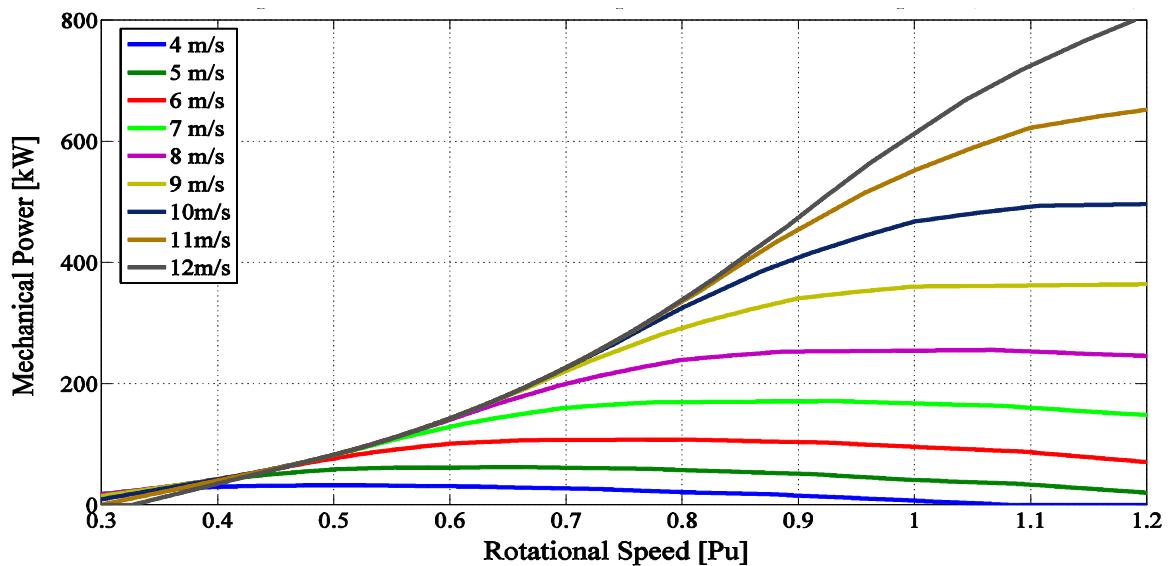
ضریب توان این توربین از اندازه گیری انجام شده در آزمایش سال ۱۹۹۷ توسط شرکت وستاس کمک گرفته شده است که در شکل (۱) آمده است [۲۰]. برای بررسی دقیق تر، مدل توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink شبیه سازی شد. این شبیه سازی طبق معادلات توان مکانیکی و براساس منحنی ضریب توان اندازه گیری شده در آزمایش سال ۱۹۹۷ که در شکل (۱) مطرح شد، صورت پذیرفته و برای سرعت های مختلف تعیین یافته است. اجزای داخلی بلوک مدل توربین بادی ۶۶۰ کیلووات در شکل (۲) آمده است. براساس بلوک شبیه سازی شده، به ازای سرعت های مختلف باد در ورودی و به ازای سرعت های روتور متفاوت منحنی توان مکانیکی توربین و منحنی ضریب توان در شکل (۳) و شکل (۴)



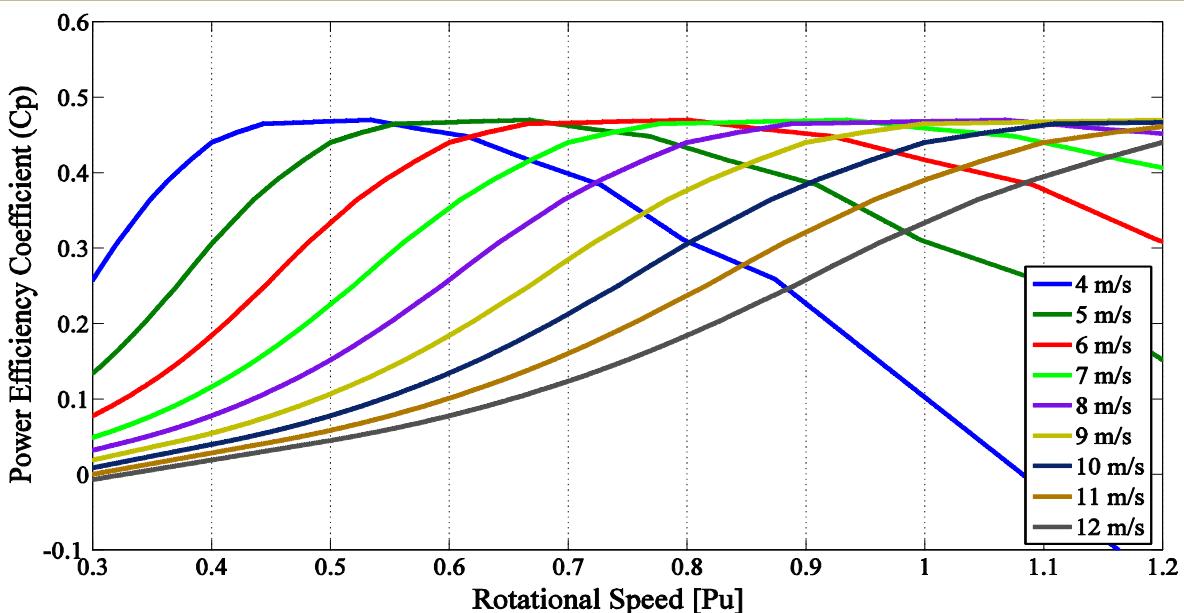
شکل (۱): منحنی توان و منحنی ضریب توان توربین بادی V47-660 kW بر حسب سرعت باد و در سرعت روتور نامی (28.5 rpm)



شکل (۲): اجزای داخلی بلوک توربین بادی ۶۶۰ کیلو وات



شکل (۳): منحنی توان مکانیکی توربین V47-660 kW بر حسب سرعت روتور برای سرعت‌های مختلف باد



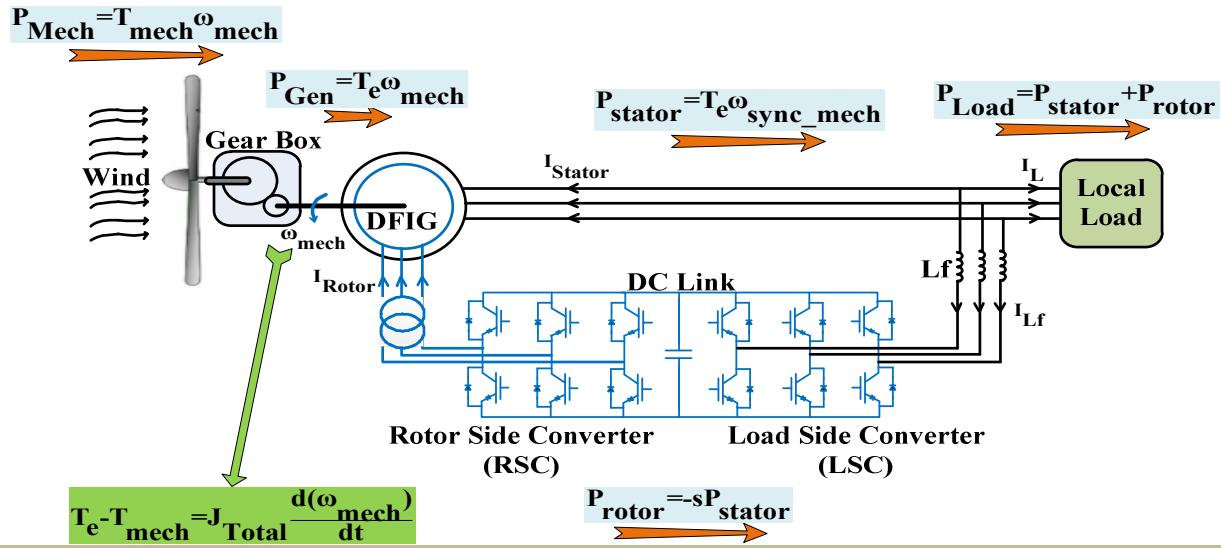
شکل (۴): منحنی ضریب توان توربین بر حسب سرعت روتور برای سرعت‌های مختلف باد

۳. سیلان توان در ژنراتور القایی تغذیه دوگانه

ساختار کلی سیستم مستقل از شبکه در شکل (۵) نمایش داده شده است. یک مدل پشت به پشت شامل دو مدل از نوع تغذیه ولتاژ با سوئیچ‌های IGBT در این ساختار استفاده می‌شود که به مدل‌های سمت بار (LSC) و مدل سمت روتور (RSC) معروف‌اند. توان الکترومغناطیسی تولیدی ژنراتور (P_{Gen}) برابر با مجموع توان

استاتور و توان روتور بوده و مطابق روابط (۱) محاسبه می‌شود [۲۱]. در شکل (۵) نحوه سیلان توان برای DFIG در حالت مستقل از شبکه نیز نمایش داده شده است [۲۲].

$$\begin{aligned} P_{Gen} &= P_{stator} + P_{rotor} = 3\omega_{rotor_el} \operatorname{Im}[\lambda_m I_r^*] = T_e \omega_{mech} \\ P_{stator} &= P_{Gen} / (1-s), P_{rotor} = -sP_{Gen} / (1-s) = -sP_{stator} \end{aligned} \quad (1)$$



شکل (۵): سیلان توان برای DFIG در حالت مستقل از شبکه

با توجه به مدار معادل، برای بردار ولتاژ استاتور و بردار شار استاتور در حوزه زمان مجموعه روابط (۲) در دستگاه ساکن استاتور برقرار است.

$$L_s = (1 + \sigma_s)L_o, L_r = (1 + \sigma_r)L_o$$

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + L_o \frac{d}{dt} ((1 + \sigma_s) \bar{I}_s + \bar{I}_r e^{j\epsilon}) \approx L_o \frac{d \bar{I}_{ms}}{dt} \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}_s = L_s \bar{I}_s + L_o (\bar{I}_r e^{j\epsilon}) = L_o [(1 + \sigma_s) \bar{I}_s + \bar{I}_r e^{j\epsilon}] = L_o \bar{I}_{ms}$$

بنابراین ولتاژ استاتور با جریان مغناطیس کنندگی استاتور ارتباط مستقیم دارد. در معادله ولتاژ استاتور با جایگذاری جریان استاتور بر حسب جریان مغناطیس کنندگی استاتور رابطه مهم (۳) حاصل می شود. این رابطه در دستگاه گردان شار استاتور به دست آمده است.

[۸]

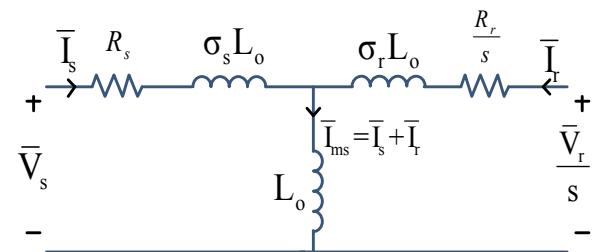
$$\text{Real Part} \Rightarrow T_s \frac{d |\bar{I}_{ms}|}{dt} + |\bar{I}_{ms}| = \frac{(1 + \sigma_s)}{R_s} V_{sd} + I_{dr} \quad (3)$$

$$\text{Imaginary Part} \Rightarrow T_s \omega_{ms} |\bar{I}_{ms}| = \frac{(1 + \sigma_s)}{R_s} V_{sq} + I_{qr}$$

در نتیجه می توان بیان کرد مؤلفه I_{dr} ، با تأخیری به اندازه ثابت زمانی استاتور ($T_s = L_s / R_s$)، جریان مغناطیس کنندگی استاتور را می سازد [۷]. طبق رابطه (۲) جریان مغناطیس کنندگی استاتور نیز به طور مستقیم، با دامنه شار استاتور ارتباط دارد. در نتیجه کنترل دامنه شار استاتور توسط I_{dr} انجام می پذیرد. از طرف دیگر، گشتاور الکترو مغناطیسی ژنراتور القایی با تعداد جفت قطب P پس

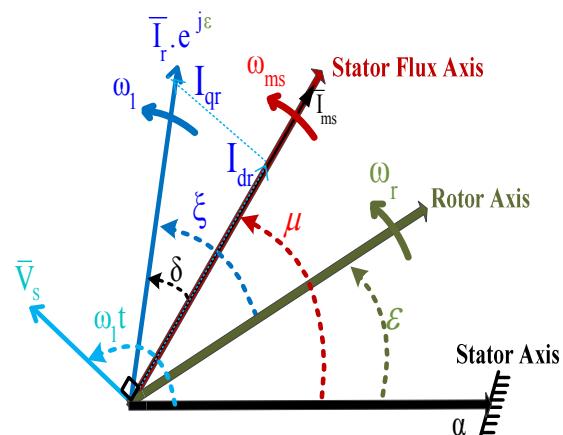
۴. کنترل برداری در ژنراتور القایی تغذیه دوگانه

در شکل (۶) مدار معادل بر فاز DFIG نمایش داده شده است [۸].



شکل (۶): مدار معادل بر فاز ژنراتور القایی تغذیه دوگانه

دستگاه های مختلف دوران و ساکن و نحوه ارتباط بین این دستگاه ها در شکل (۷) نمایش داده شده است [۸].



شکل (۷): نمایش دوران دستگاه های مختلف به همراه نمایش بردار جریان روتور در دستگاه ساکن

منطبق می شود.

$$\bar{\lambda}_s = \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} = L_o \bar{I}_{ms} \rightarrow \lambda_{qs} = 0 \rightarrow I_{qs} = -\frac{L_s}{L_o} I_{ds} \quad (6)$$

به همین منظور باید همواره مقدار مرتع مولفه قائم جریان روتور برابر با $I_{qs}^* = -(L_s/L_o) I_{ds}$ باشد و تنها در این شرایط است که کنترل قاب گردان به درستی اعمال می شود.

شایان ذکر است در کاربرد توربین بادی متصل به شبکه، برای استحصال بیشترین توان ممکن از انرژی باد، مقدار توان مرتع در سیستم کنترلی توربین، همواره روی نقطه بهینه تنظیم می شود. این عمل به ردیابی ماکزیمم توان یا MPPT معروف است. در واقع براساس نقطه بهینه توان و به کمک یک کنترل کننده PI، مقدار مرتع I_{qs}^* محاسبه می شود. در نتیجه در کاربرد متصل به شبکه، تنظیم مؤلفه I_{qs}^* به منظور ردیابی توان ماکزیمم استفاده می شود. اما همان طور که در رابطه (۶) بیان شد، در کاربرد مستقل از شبکه، مؤلفه I_{qs}^* فقط وابسته به مؤلفه I_{ds} است و قابل تغییر نخواهد بود، در نتیجه برخلاف حالت متصل به شبکه، دیگر ردیابی ماکزیمم توان امکان پذیر نخواهد بود. در حالت مستقل از شبکه، دو روش مستقیم و غیرمستقیم برای کنترل ولتاژ استاتور قابل بیان است [۲۳].

۱.۵. کنترل ولتاژ به روش مستقیم

در این روش با نمونه گیری از ولتاژ استاتور و به کمک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی،^۷ مقدار مرتع مؤلفه I_{dr}^* تولید می شود، در نتیجه ولتاژ استاتور به طور مستقیم کنترل می گردد. بلوک دیاگرام کنترلی ولتاژ به روش مستقیم در شکل (۸) نمایش داده شده است. در این مقاله از روش کنترل مستقیم ولتاژ استفاده شده است.

از جای گذاری جریان استاتور بر حسب جریان مغناطیسی کنندگی استاتور طبق رابطه (۴) قابل بیان است.

$$T_e = \frac{2}{3} P L_o \operatorname{Im}\left\{ \bar{I}_s \left(\bar{I}_t e^{j\epsilon} \right)^* \right\} \mapsto T_e = -\frac{2}{3} P \frac{L_o}{1+\sigma_s} |\bar{I}_{ms}| I_{qs} \quad (4)$$

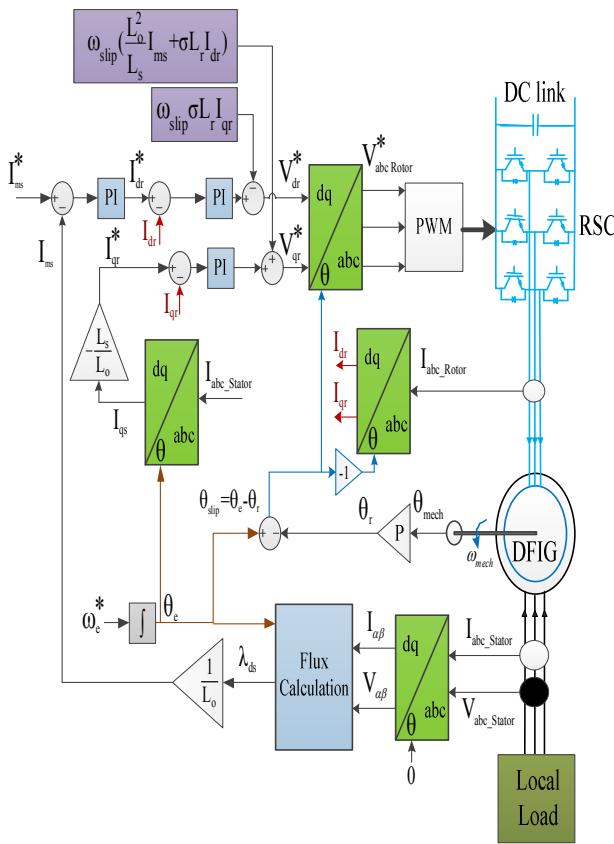
در نتیجه با فرض ثابت بودن مقدار $|\bar{I}_{ms}|$ ، گشتاور الکترومغناطیسی در DFIG، با مؤلفه I_{qs} ، ارتباط مستقیم دارد. بنابراین براساس روش کنترل برداری، شار و گشتاور DFIG به طور مستقل از یکدیگر قابل کنترل اند.

۵. اصول کنترلی مبدل سمت روتور

در حالت مستقل از شبکه، DFIG باید ولتاژ و فرکانس ثابتی در ترمینال استاتور تولید کند. این وظیفه مهم بر عهده مبدل سمت روتور است. به منظور تشریح نحوه تنظیم ولتاژ استاتور باید گفت ابتدا براساس رابطه (۳)، مقدار جریان مغناطیسی کنندگی استاتور توسط I_{dr} قابل تنظیم است. از طرفی براساس رابطه (۲) مشاهده می شود، مشتق جریان مغناطیسی کنندگی استاتور مستقیماً با ولتاژ استاتور رابطه دارد. در نتیجه می توان گفت توسط تنظیم مؤلفه I_{dr} در واقع ولتاژ استاتور تنظیم می شود. به علت آنکه فرکانس جریان تزریقی به روتور معادل با سرعت لغزش است، فرکانس جریان تزریقی به روتور، توسط مبدل سمت روتور همواره روی مقدار $\omega_r - \omega_1$ تنظیم می شود. در این صورت، فرکانس استاتور به طور خودکار، به علت روابط حاکم بر ماشین القایی، روی سرعت زاویه‌ای الکتریکی سنکرون تنظیم می شود. این عمل با تنظیم زاویه دوران در تبدیل بین دستگاه‌ها در مبدل سمت روتور صورت می گیرد، زاویه دوران مذکور در شکل ۸ با نماد θ_{slip} نشان داده شده است. روابط مهم حاکم بر ژنراتور القایی تغذیه دو گانه در دستگاه گردان شار استاتور که به قاب مرتع سنکرون نیز معروف است، به صورت روابط (۵) بیان می شود [۷].

$$\begin{cases} \lambda_{ds} = L_s I_{ds} + L_o I_{dr}, & V_{ds} = R_s I_{ds} + p\lambda_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} \\ \lambda_{qs} = L_s I_{qs} + L_o I_{qr}, & V_{qs} = R_s I_{qs} + p\lambda_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} \\ \lambda_{dr} = L_t I_{dr} + L_o I_{ds}, & V_{dr} = R_t I_{dr} + p\lambda_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} \\ \lambda_{qr} = L_t I_{qr} + L_o I_{qs}, & V_{qr} = R_t I_{qr} + p\lambda_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \end{cases} \quad (5)$$

براساس روش کنترل برداری به منظور امتدادیابی بردار شار استاتور باید مطابق رابطه (۶) مؤلفه محور قائم شار استاتور λ_{qs} ، برابر صفر باشد. در نتیجه بردار شار استاتور بر محور مستقیم

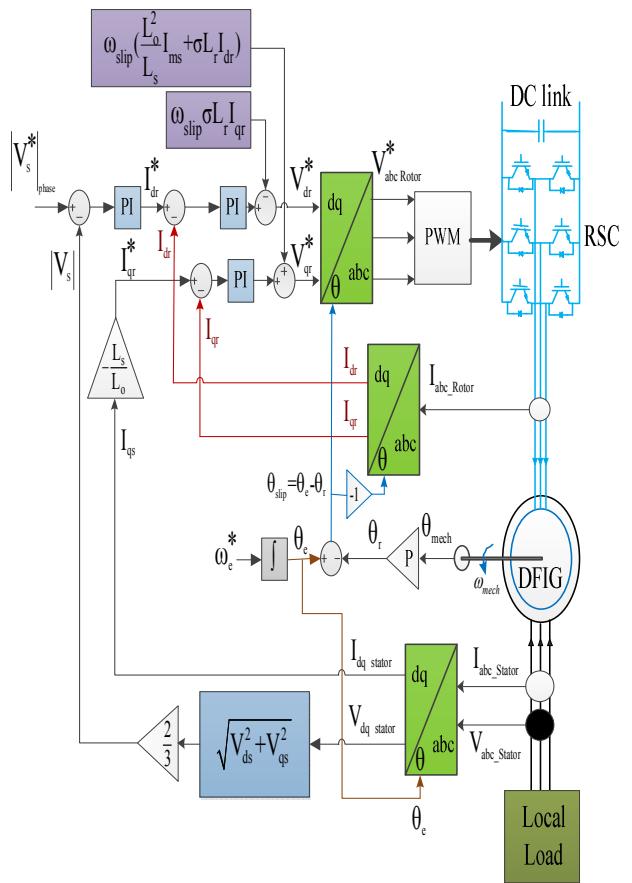


شکل (۹): بلوک دیاگرام کنترلی برای مبدل سمت روتور به روش کنترل غیرمستقیم ولتاژ

با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود برای به‌دست‌آوردن جریان مغناطیسی‌کنندگی از بلوک تخمین شار استفاده شده است که از ولتاژها و جریان‌های استاتور در دستگاه ساکن استاتور (V_{S_ab}, I_{S_ab}) مطابق رابطه (۷) استفاده می‌شود.

$$\begin{cases} \int V_{as} - R_s I_{as} = \lambda_{as}, \\ \int V_{bs} - R_s I_{bs} = \lambda_{bs}, \end{cases} \quad , \quad \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

مشاهده می‌شود از جمله معایب روش کنترل غیرمستقیم ولتاژ، این است که برای به‌دست‌آوردن جریان مغناطیسی‌کنندگی به پارامترهای ژنراتور از قبیل مقاومت استاتور و اندوکتانس متقابل، وابسته است و از آنجاکه مقاومت استاتور در حین عملکرد ژنراتور، کاملاً ثابت نیست. بنابراین دقت عملکرد سیستم کنترلی پایین می‌آید.. از طرف دیگر، اثر اشباع در اندوکتانس متقابل نیز بر عملکرد سیستم کنترلی اثر نامطلوبی می‌گذارد [۲۴]. یکی دیگر از معایب این روش این است که از افت ولتاژ روی مقاومت استاتور و اندوکتانس پراکندگی صرف‌نظر می‌شود، در نتیجه تنظیم ولتاژ استاتور روی مقدار نامی با کمی خطأ همراه است. با توجه به دلایل مطرح شده و



شکل (۸): بلوک دیاگرام کنترلی برای مبدل سمت روتور به روش کنترل مستقیم ولتاژ

رابطه تبدیل بین دستگاه‌ها در پیوست بیان شده است. نکته قابل توجه در شکل (۸) این است که برای پیدا کردن موقعیت دستگاه گردان شار استاتور (θ_e), برخلاف حالت متصل به شبکه، نیازی به حلقة قفل فاز^۱ نیست، بلکه از عدد ثابت ($\omega_e = 2\pi f_e$) انتگرال گرفته می‌شود. در نتیجه زاویه دوران دستگاه گردان به صورت یک متغیر بدون اختشاش در اختیار است [۱ و ۷]. مقادیر مرجع مؤلفه‌های ولتاژ روتور در دستگاه گردان شار استاتور، به کمک زاویه لغزش ($\theta_r = \theta_{slip}$) به دستگاه سه فاز روتور انتقال می‌یابند.

۲.۵. کنترل ولتاژ به روش غیرمستقیم

در این روش با نمونه‌گیری از جریان مغناطیسی‌کنندگی استاتور I_{ms} و به کمک کنترل کننده PI^۲، مقدار مرجع مؤلفه I_{dr}^{*} تولید می‌شود، در نتیجه ولتاژ استاتور به طور غیرمستقیم کنترل می‌گردد. بلوک دیاگرام کنترلی ولتاژ به روش غیرمستقیم در شکل (۹) نمایش داده شده است.

1. Phase Lock Loop (PLL)

۲. کنترل کننده تناسبی-انتگرالی

مطابق رابطه (۸) توان حقيقی و موهومی کل وارد شده به مبدل سمت بار محاسبه می‌شود، در این رابطه فرض می‌شود جریان I_{q-LSC} توسط بخش کنترلی مبدل، روی صفر تنظیم شده باشد و از طرف دیگر، با امتدادیابی بردار ولتاژ استاتور، مقدار مؤلفه قائم ولتاژ استاتور برابر با صفر است تا بردار ولتاژ استاتور بر روی مؤلفه محور مستقیم خود منطبق گردد. در این شرایط ضربیت توان عملکرد مبدل برابر با یک خواهد شد.

$$\begin{cases} P_{dq-LSC} = \frac{2}{3}(V_{d-LSC}I_{d-LSC} + V_{q-LSC}I_{q-LSC}) = \frac{2}{3}(V_{d-LSC}I_{d-LSC}) \\ Q_{dq-LSC} = \frac{2}{3}(V_{q-LSC}I_{d-LSC} - V_{d-LSC}I_{q-LSC}) = 0 \rightarrow PF_{LSC} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

۷. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

توربین بادی ۶۶۰ کیلووات مورد نظر که اطلاعات آن در پیوست ذکر شده است، به همراه ساختار کنترلی مربوط در محیط نرم افزار Matlab/simulink شبیه‌سازی می‌شود. به‌منظور بررسی عملکرد کنترلی ساختارهای طراحی شده، دو سناریو که شرایط واقعی را برای توربین مدل می‌کنند، مورد نظر است. در سناریوی اول سرعت روتور تغییر می‌کند و بار محلی ثابت است، اما در سناریوی دوم سرعت ثابت فرض می‌شود و بار محلی تغییر می‌یابد. در نهایت با درنظر گرفتن این دو سناریو و تطبیق نتایج شبیه‌سازی با استانداردهای موجود، درباره دقت ساختارهای کنترلی می‌توان اظهار نظر کرد.

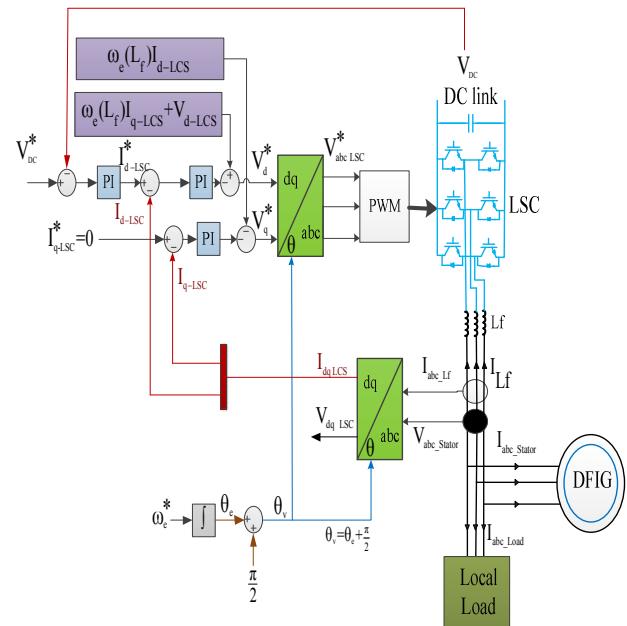
۱.۷. شبیه‌سازی در حالت تغییر سرعت روتور به‌ازای بار محلی ثابت

در این حالت به‌ازای بار ثابت در طی ۱۰ ثانیه، سرعت روتور از (1.3 pu) به (0.7 pu) کاهش داده می‌شود. هدف از این شبیه‌سازی، بررسی صحت عملکرد ساختار مستقل از شبکه به‌ازای تغییر پیوسته در ۳۰ درصد بالاتر و پایین‌تر از سرعت نامی ژنراتور می‌باشد. گفتنی است برای تنظیم ضرایب کنترل کننده از روش تجربی به همراه انتخاب مناسب محدود کننده در خروجی کنترل کننده استفاده شده است. در شکل (۱۱) نتایج شبیه‌سازی آمده است.

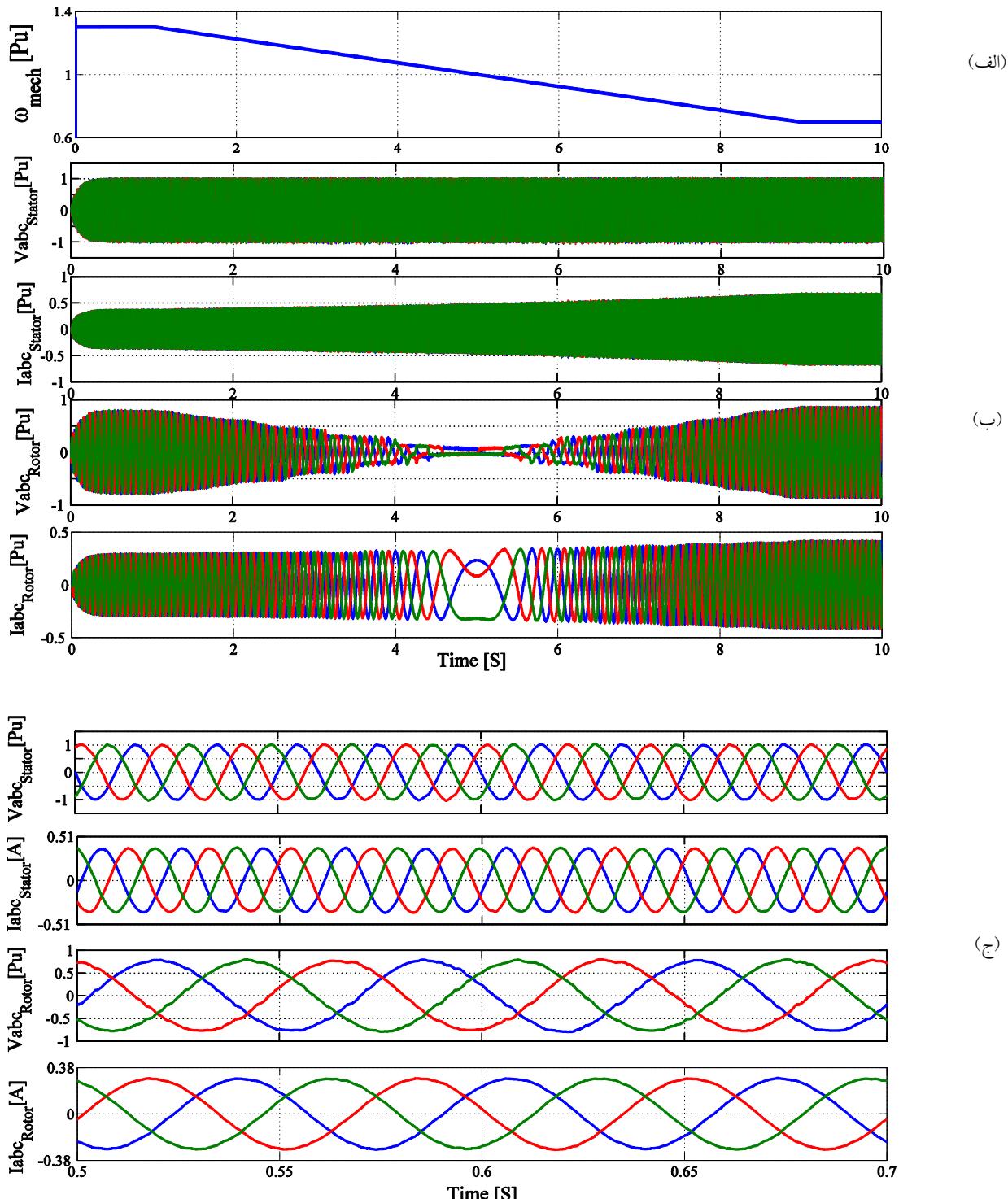
به‌دلیل آنکه روش مستقیم کنترل ولتاژ فاقد این معایب است، در این مقاله از روش کنترل مستقیم ولتاژ استفاده شده است.

۶. اصول کنترلی مبدل سمت بار

هدف مبدل سمت بار، صرف‌نظر از اندازه و جهت توان الکتریکی روتور، ثابت نگاه داشتن ولتاژ خازن در مبدل پشت به پشت^۱ است. با استفاده از قاب مرجع گردان منطبق بر موقعیت بردار ولتاژ استاتور، شار توان حقيقی و موهومی بین استاتور و مبدل سمت بار به‌طور مستقل قابل کنترل است. در این روش توان مولفه محور مستقیم جریان ورودی به مبدل (I_{d-LSC})، می‌توان ولتاژ خازن را کنترل کرد و مؤلفه محور قائم جریان (I_{q-LSC})، کنترل توان موهومی وارد شده به مبدل سمت روتور را بر عهده دارد [۶]. به همین منظور، برای دستیابی به عملکرد در حالت ضربیت توان یک، باید مقدار مرجع جریان محور قائم (I_{q-LSC}^*), برابر با صفر انتخاب گردد. به‌علت اینکه بردار ولتاژ استاتور تقریباً به اندازه ۹۰ درجه از بردار شار استاتور پیش‌فاز است، برای پیدا کردن موقعیت دستگاه گردان ولتاژ استاتور، می‌توان از موقعیت دستگاه گردان شار استاتور با ۹۰ درجه جابجایی استفاده کرد [۷ و ۲۳]. در شکل (۱۰) بلوک دیاگرام کنترلی مبدل سمت بار نمایش داده شده است.



شکل (۱۰): بلوک دیاگرام کنترلی مبدل سمت بار برای حالت مستقل از شبکه



شکل (۱۱): (الف). نحوه تغییر پیوسته سرعت روتور؛ ب. شکل موج‌های ولتاژ استاتور، جریان استاتور، ولتاژ روتور و جریان روتور؛ ج. تصویر بزرگنمایی شده در بازه زمانی ۰.۵s تا ۰.۷s

مشاهده می‌شود در شکل (۱۱-ب) ولتاژ و جریان تزریقی به روتور دارای فرکانس لغزش هستند. براساس مرجع [۲۱] به دلیل آنکه تلفات الکتریکی در مبدل پشت به پشت به جریان عبوری از آن وابسته است، باید نسبت دور سیم‌پیچی‌های استاتور به سیم‌پیچی‌های روتور طوری باشد که جریان کشیده شده از مبدل

کم باشد و از طرفی ولتاژ مورد نیاز روتور نیز تأمین شود، به همین دلیل بین مبدل سمت روتور و سیم‌پیچی‌های روتور از یک ترانس کاهنده با نسبت ۲ به ۱ استفاده شده است. همان‌طور که بیان شد در این مقاله، مطالعه موردی روی توربین ۶۶۰ کیلوواتی صورت گرفته است، در همین راستا همه روابط و متغیرها، برای شرایط

مذکور ابتدا پریونیت شده‌اند و سپس طراحی‌ها و تنظیم کنترل کننده‌های PI انجام شده است. در جدول (۲)، ضرایب کنترل کننده‌های PI در مبدل‌های پشت به پشت که براساس تلفیقی از روابط کنترلی و روش آزمون و خطا به دست آمده‌اند، ارائه شده‌اند.

جدول (۲): ضرایب کنترل کننده‌های PI برای مبدل‌های پشت به پشت

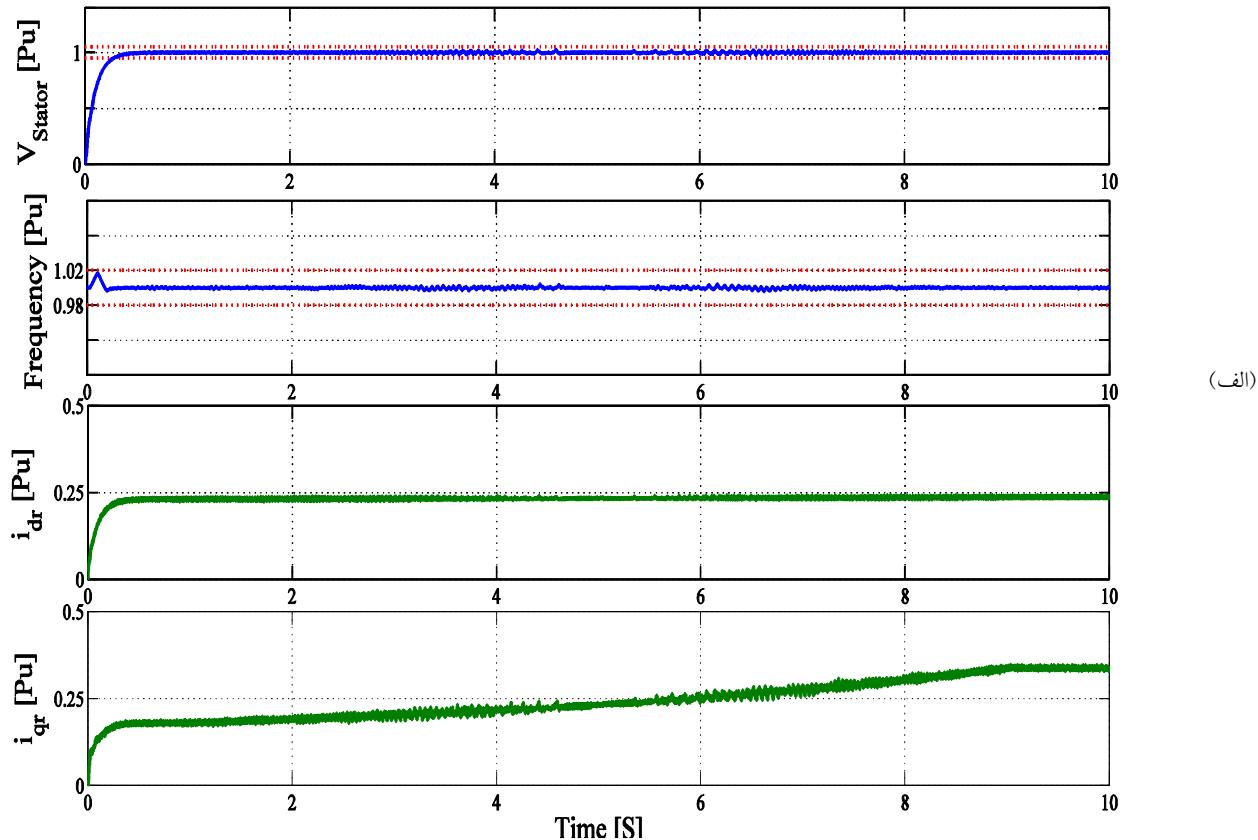
RSC		LSC	
ضرایب PI مبدل سمت بار		ضرایب PI مبدل سمت بار	
Kp_(_I _d ,I _q)	0.005	Kp_V _{DC}	0.9
Ki_(_I _d ,I _q)	1	Ki_V _{DC}	20
Kp_I _{ms}	0.1	Kp_(I _d ,I _q)	0.01
Ki_I _{ms}	10	Ki_(I _d ,I _q)	0.5

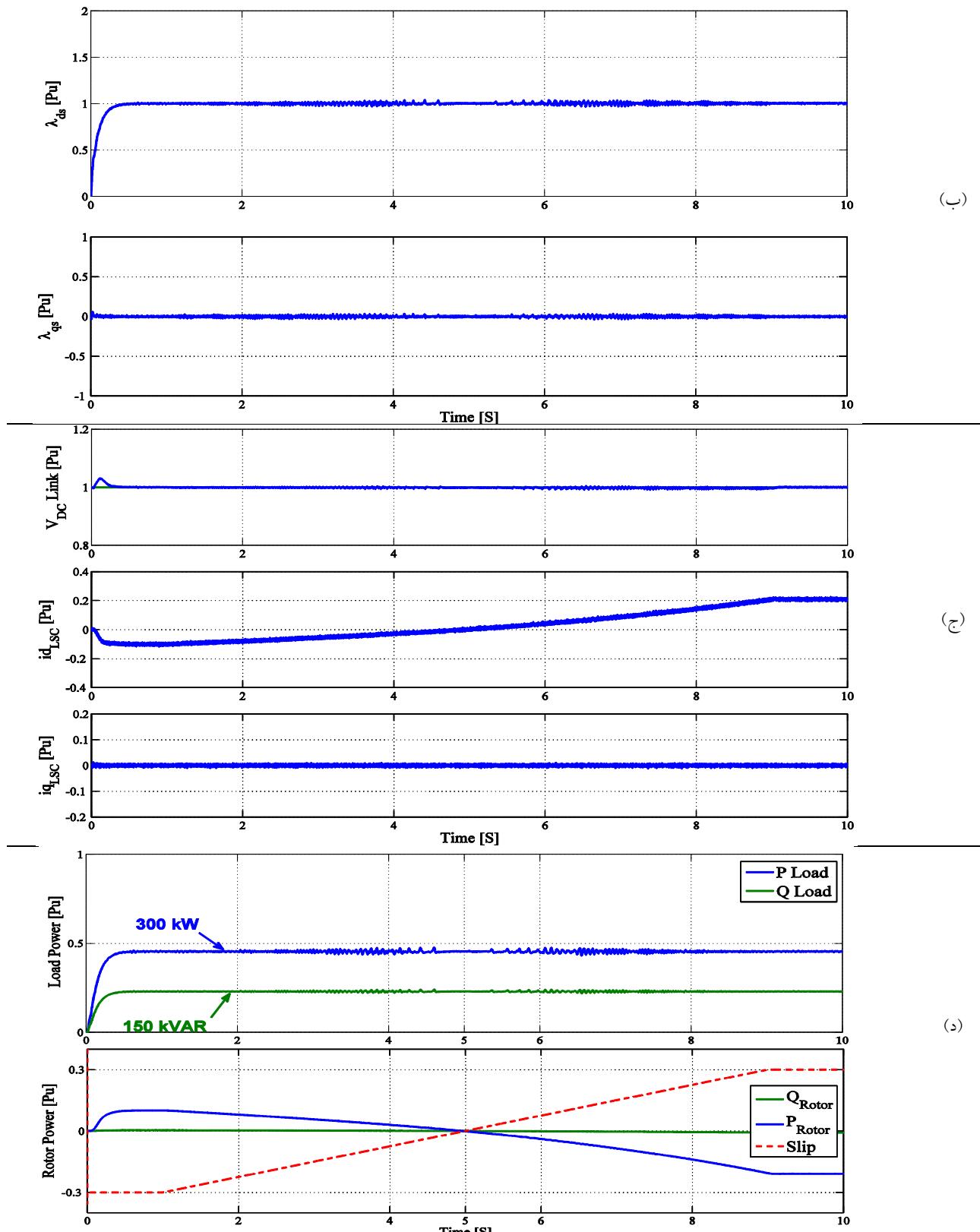
در ادامه به منظور تحلیل نتایج و بررسی دقیق ضرایب کنترل کننده‌ها، مقدار THD شکل موج‌ها به دست آمده است و در جدول (۳) ارائه شده‌اند. با توجه به جدول (۳) و شکل (۱۱-ج) مشاهده می‌شود شکل موج‌های حاصل از اعوجاج کمی برخوردار نند، زیرا براساس استانداردهای EN61000 و EN50160 THD ولتاژ خط و جریان تولیدی باید کمتر از ۸٪ باشد [۲۵ و ۲۶].

جدول (۳): مقادیر THD برای شکل موج‌ها در سرعت روتور pu

THD	Fundamental frequency	Signal
1.72 %	50 Hz	ولتاژ خط استاتور
1.80 %	50 Hz	جریان استاتور
2.23 %	15 Hz	ولتاژ خط روتور
1.11 %	15 Hz	جریان روتور

در شکل (۱۲-الف) ولتاژ فاز استاتور و مقدار فرکانس بر حسب پریونیت به همراه محدوده مجاز تغییرات نمایش داده شده است که به خوبی تنظیم و ثابت شده‌اند. در شکل (۱۲-ب) مشاهده می‌شود در حین تغییرات سرعت روتور، همواره مقدار مؤلفه قائم شار استاتور برابر با صفر بوده و مؤلفه مستقیم شار استاتور روی یک پریونیت ثابت مانده است. درنتیجه امتدادیابی بردار شار استاتور، در دستگاه گردان شار استاتور به خوبی صورت گرفته است. در شکل (۱۲-ج) مشاهده می‌شود مؤلفه مستقیم جریان طوری تغییر کرده است که در حین تغییرات سرعت روتور، ولتاژ خارجی در مبدل پشت به پشت ثابت باقی بماند. از طرفی ضریب توان عملکرد مبدل برابر یک است.



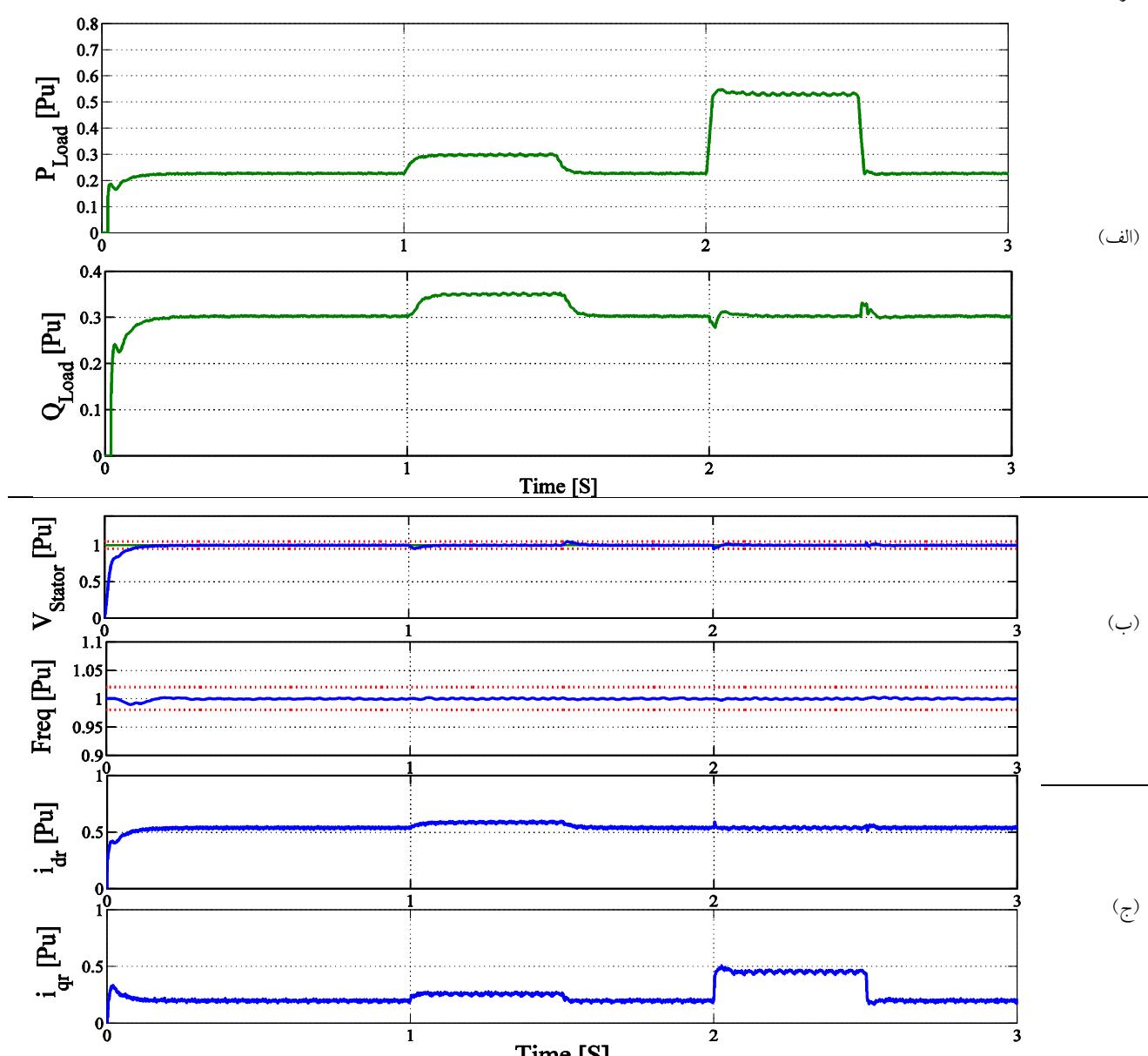


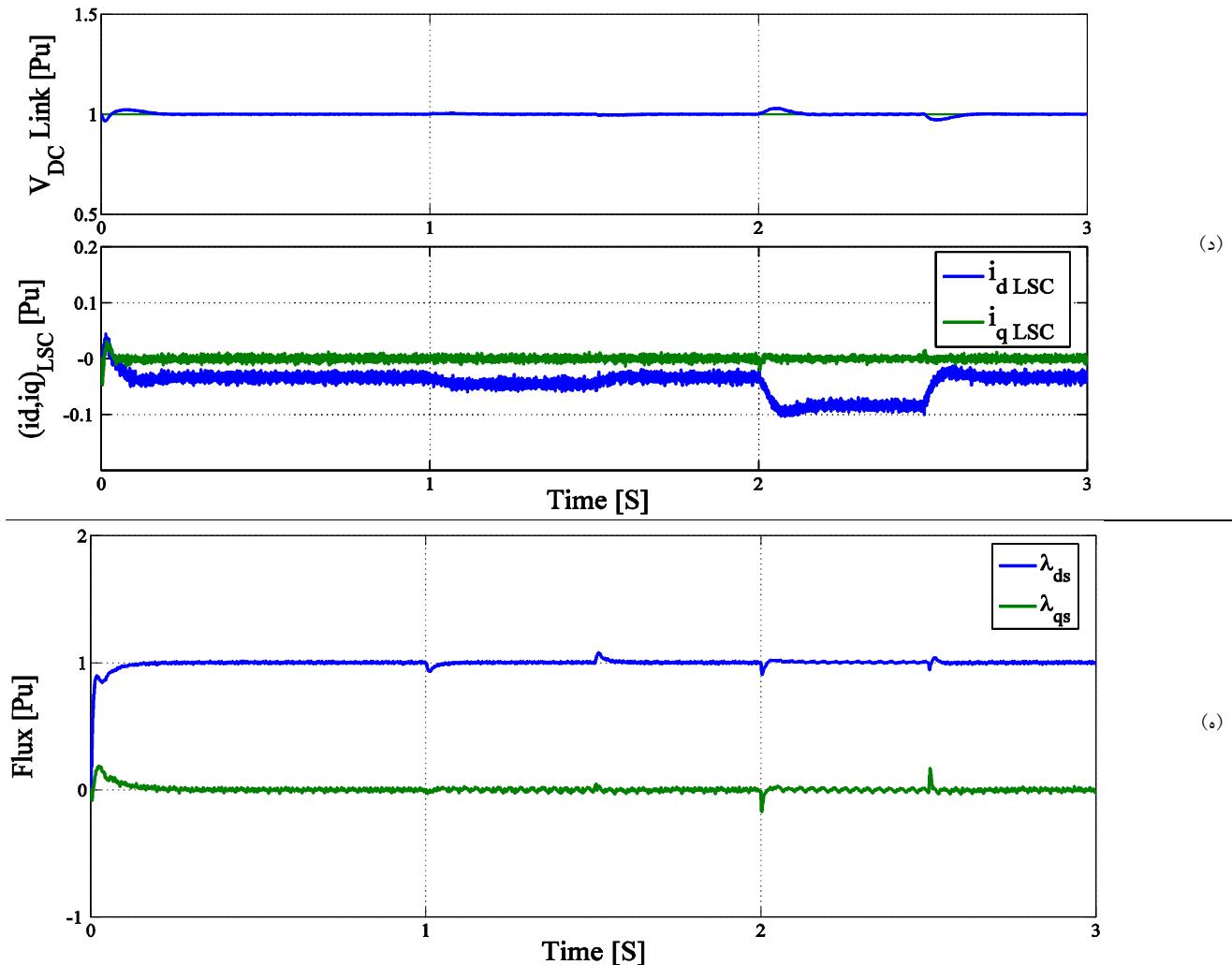
شکل (۱۲): الف. دامنه ولتاژ فاز استاتور، فرکانس استاتور، جریان محور مستقیم روتور و جریان محور قائم روتور؛ ب. مؤلفه‌های شار استاتور؛ ج. ولتاژ خازن در مبدل پشت به پشت، مؤلفه‌های مستقیم و قائم جریان در مبدل سمت بار؛ د. توان حقیقی و موهومنی بار محلی، توان حقیقی و موهومنی روتور به همراه مقدار لغزش

۲.۷ شبیه‌سازی تغییر بار به‌ازای سرعت ثابت ژنراتور

در این حالت در سرعت ثابت روتور (1.2 pu), طی مدت ۳ ثانیه، تغییراتی مطابق شکل (۱۳-الف) در توان حقیقی و موهومی مورد تقاضای بار محلی ایجاد می‌شود، این عمل با کلیدزنی روی بارهای مقاومتی خالص و مقاومتی‌سلفی صورت گرفته است. در واقع با کلیدزنی روی بار اهمی، توان حقیقی تغییر می‌کند و با کلیدزنی روی بار مقاومتی‌سلفی توان موهومی مورد تقاضاً تغییر می‌یابد.

در شکل (۱۳-ب) مشاهده می‌شود دامنه ولتاژ و مقدار فرکانس استاتور در حین تغییر بار، بهخوبی تنظیم و ثبت شده‌اند و از حدود مجاز استاندارد خارج نشده‌اند، زیرا خطوط نقطه‌چین نمایش داده شده در دو طرف منحنی ولتاژ و فرکانس، محدوده مجاز تغییرات براساس استانداردهای کیفیت توان است. محدوده مجاز برای تغییرات فرکانس ۲ درصد و برای تغییرات ولتاژ ۵ درصد در نظر گرفته شده است [۲۵]. مطابق شکل (۱۳-ج) مشاهده می‌شود مؤلفه مستقیم جریان روتور (I_{dr}) با توان موهومی بار و مؤلفه قائم (I_{qr}) با توان حقیقی بار، رابطه مستقیم دارند. در نهایت مطابق شکل (۱۳-ه) امتدادیابی شار استاتور بهخوبی صورت گرفته است.





شکل (۱۳): الف. تغییرات در توان حقیقی و موهومی بار محلی؛ ب. دامنه ولتاژ و فرکانس استاتور؛ ج. مؤلفه‌های جریان روتور؛ د. ولتاژ خازن، مؤلفه‌های جریان ورودی به مبدل سمت بار؛ ه. مؤلفه‌های شار استاتور

گرفت سیستم‌های کنترلی طراحی شده به خوبی عمل می‌کنند و چالش‌های پیش رو، از جمله کنترل ولتاژ و فرکانس را تا حد قابل قبولی پوشش می‌دهند.

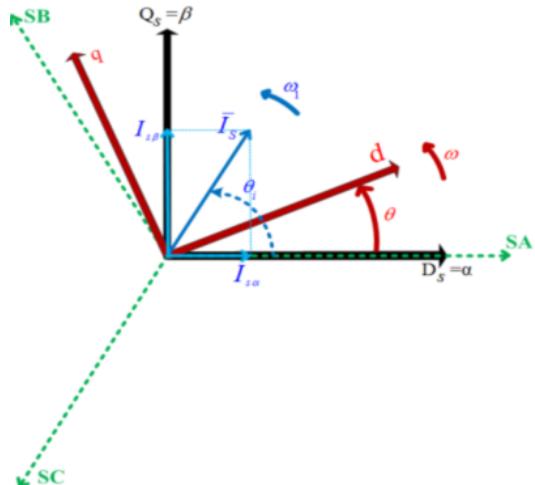
۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل DFIG برای تغذیه بار محلی برای توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی در حالت مستقل از شبکه، مورد تحلیل و شبیه‌سازی قرار گرفت. مطالعه موردنی روی توربین بادی ۶۶۰ کیلووات شرکت وستاس صورت گرفت و منحنی‌های عملکردی آن استخراج شد. از آنجاکه این توربین بدون حضور دیگر منابع تولید پراکنده و بدون حضور عناصر ذخیره‌کننده انرژی فرض شده است، کنترل دامنه ولتاژ و فرکانس به طور کامل بر عهده DFIG است که به خوبی کنترل شده‌اند. با طراحی و تنظیم مناسب کنترل‌کننده‌ها مقدار اعوجاج شکل موج‌های خروجی، مطابق استاندارد در محدوده مجاز بوده است. با تحلیل نتایج شبیه‌سازی، می‌توان نتیجه

۹. پیوست

در شکل (۱۴)، بردار فضایی جریان استاتور در دستگاه ساکن استاتور به همراه دوران دستگاه dq نمایش داده شده است. گفتنی است این روش نمایش بردارهای فضایی ترکیبی از مراجع [۸] و [۲۷] می‌باشد.

0.007 pu	مقاومت روتور
0.04 pu	اندوکتانس نشتی استاتور
0.06 pu	اندوکتانس نشتی روتور
2.89 pu	اندوکتانس متقابل
52.6	نسبت گیربکس
0.2 sec	ثابت زمانی ژنراتور
3.05 sec	ثابت زمانی توربین
2	تعداد زوج قطب
SPWM	روش مدلسیون مبدل ها
4 kHz	فرکانس سوئیچینگ مبدل ها
1380 V	ولتاژ خازن در مبدل پشت به پشت
0.001148 H	سلف فیلتر در مبدل سمت بار



شکل (۱۴): بردار فضایی جریان استاتور در دستگاه ساکن استاتور

۱۰. فهرست علائم

گشتاور مکانیکی و گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی	T_e, T_m
اینرسی کل انتقالی به سمت ژنراتور	J_{Total}
نسبت گیربکس	n_{gear}
اندوکتانس پراکنده روتور و پراکنده استاتور	$L_{s\sigma}, L_{\sigma r}$
سرعت زاویه‌ای مکانیکی و الکتریکی سنترون	$\omega_1, \omega_{Sync_mech}$
سرعت زاویه‌ای مکانیکی و الکتریکی روتور	$\omega_{rotor_el}, \omega_{mech}$
اندوکتانس متقابل و شار فاصل هوایی	λ_m, L_o
تعداد جفت قطب	p
لغزش	S
ثابت زمانی استاتور	T_s
محور مستقیم دستگاه ساکن استاتور	α
موقعیت و سرعت زاویه‌ای دستگاه روتور	θ_r, ε
موقعیت و سرعت زاویه‌ای دستگاه شار استاتور	ω_{ms}, μ
زاویه بردار جریان روتور نسبت به دستگاه روتور	γ
نحوه نمایش بردار جریان روتور در دستگاه روتور	\bar{I}_r
نحوه نمایش بردار جریان روتور در دستگاه ساکن	$\bar{I}_r e^{j\gamma}$
سرعت زاویه‌ای دوران بردار جریان روتور	ω_1
زاویه جریان روتور نسبت به دستگاه شار استاتور	δ
بردار جریان مغناطیسی کنندگی استاتور	\bar{I}_{ms}

در انتهای تعریف جدیدی از بردار فضایی و ماتریس انتقال مقادیر سه فاز به دستگاه گردان dq که با سرعت دوران اختباری (ω) در حال چرخش است. بیان شده است که این ماتریس مذکور نیز با ترکیب روابط مطرح شده در مراجع [۸ و ۲۷] به دست آمده است. در شبیه‌سازی‌ها از این ماتریس انتقال استفاده شده است.

$$\begin{aligned} \bar{I}_s(t) &= \left[i_{sA}(t) + e^{j(\frac{2\pi}{3})} \cdot i_{sB}(t) + e^{j(\frac{4\pi}{3})} \cdot i_{sC}(t) \right] = |\bar{I}_s| e^{j\theta_i} = I_{sa} + j I_{sb} \\ \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{0s} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sA}(t) \\ I_{sB}(t) \\ I_{sC}(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

در جدول (۴) اطلاعات توربین ۶۶۰ کیلووات مورد مطالعه که در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده، ارائه شده است.

جدول (۴): اطلاعات استفاده شده در شبیه‌سازی سیستم توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی مورد مطالعه

توان نامی	660 kW
فرکانس نامی ژنراتور	50 Hz
ولتاژ نامی خط	690 v
مقاومت استاتور	0.008 pu

- [1] Phan, V.T., Lee, H.H., "Control Strategy for Harmonic Elimination in Stand-Alone DFIG Applications With Nonlinear Loads", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 9, pp. 2662-2675, SEPTEMBER 2011.
- [2] Suvire, G.O., "Wind Farm – Impact in Power System and Alternatives to Improve the Integration", InTech Publishing, Croatia, July 2011.
- [3] Chen, M., Yu, L., Wade, N., Liu, X., Liu, Q. and Yang, F., "Investigation on the Faulty State of DFIG in a Microgrid", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 7, pp. 1913-1919, July 2011.
- [4] Goel, P., Singh, B., Murthy, S.S. and Kishore, N., "Parallel Operation of DFIGs in Three-Phase Four-Wire Autonomous Wind Energy Conversion System", IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 47, No. 4, pp. 1872-1883, JULY/AUGUST 2011.
- [5] Patin, P., Monmasson, E. and Louis, J.P., "Modeling and Control of a Cascaded Doubly Fed Induction Generator Dedicated to Isolated Grids", IEEE Transactions on Industry applications ELECTRONICS, Vol. 56, No. 10, pp. 4207-4219, OCTOBER 2009.
- [6] Pena, P., Clare, L. C. and Asher, G. M., "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind energy generation", IEE Proc. Electric Power Applications, Vol. 143, No. 3, pp. 231-241, May 1996.
- [7] Pena, P., Clare, L. C. and Asher, G. M., "A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine", IEE Proc. Electric Power Applications, Vol. 143, No. 5, pp. 380-387, September 1996.
- [8] Leonhard, W., "Control of Electrical Drives", Third Edition, Springer, new York, 2001.
- [9] Shahabi, M., Haqifam, M. R., Mohamadian, M. and Nabavi-Niaki, S. A., "Microgrid Dynamic Performance Improvement Using a Doubly Fed Induction Wind Generator", IEEE Energy Conversion, Vol. 24, No. 1, pp. 137-145 March 2009.
- [10] Zhang, Y., Ooi, T., "Stand-Alone Doubly-fed Induction Generator With Autonomous Frequency Control", IEEE TRANSACTIONS ON Power Delivery, Vol. 28, No. 2, pp. 752-760, April 2013.
- [11] Kumaresan, K. V. N. and Gounden, N. A., "Operation and closed-loop control of wind-driven stand-alone doubly fed induction generators using a single inverter-battery system", Vol. 6, No. July 2011, pp. 162-171, 2012.
- [12] Gonzalez, F. D., Sumper, A., Bellmunt, O. G., Robles, R. V., "A review of energy storage technologies for wind power applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, pp. 2154-2171, 2012.
- [13] Jain, A.K., "Wound Rotor Induction Generator With Sensorless Control and Integrated Active Filter for Feeding Nonlinear Loads in a Stand-Alone Grid", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 1, pp. 218-228 January 2008.
- [14] Nguyen, N. T., Chun, T. W., Lee, H. H., "An Enhanced Control Algorithm for Stand-alone DFIG System feeding Unbalanced Loads with Reduced Current Sensors", 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, Harbin, China, June 2012.
- [15] Pena, R., Cardenas, R., S. Member, Escobar, E., Clare, J. and Wheeler, P., "Control System for Unbalanced Operation of Stand-Alone Doubly Fed Induction Generators", Vol. 22, No. 2, pp. 544-545, 2007.
- [16] Wei, F., Zhang, X., Vilathgamuwa, D. M., Choi, S. S. and Wang, S., "Mitigation of distorted and unbalanced stator voltage of stand-alone doubly fed induction generators using repetitive control technique", IET Electr. Power Appl, Vol. 7, Iss. 8, pp. 654-663, 2013.
- [17] Jain, A. K., Ranganathan, V. T., "Wound Rotor Induction Generator With Sensorless Control and Integrated Active Filter for Feeding Nonlinear Loads in a Stand-Alone Grid", Vol. 55, No. 1, pp. 218-228, 2008.
- [18] Pattnaik, M., Kastha, D., "Harmonic Compensation with Zero Sequence Load Voltage Control in a Speed Sensorless DFIG Based Stand-alone VSCF Generating System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 12, pp. 5506-5514, December 2013.
- [19] www.suna.org.ir
- [20] Vestas Company, "V47- 660 kW with OptiTip and OptiSlip".
- [21] Petersson, A., "Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines", Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden 2005.
- [22] Song, H. S., Nam, K., Choi, H. R. and Kim, H. G., "A New Topology and Control Scheme for 4WD HEV using a DFIM with a Reduced Size Converter-Inverter", IEEE, 0-7803-9208-6/05,2005.
- [23] EL-helw, H. M., Tennakoon, S. B., "vector control of a doubly fed induction generator for stand alone wind energy", EPE Wind Energy Chapter 1st Seminar, Delft, 27-28 March 2008.
- [24] Bolik, S. M., "Modelling and Analysis of Variable Speed Wind Turbines with Induction Generator during Grid Fault", Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, ISBN 87-89179-55-2, October 2004.
- [25] Ackermann, T., "Wind Power in Power Systems", John Wiley & Sons Publishing, Stockholm, Sweden, 2005.
- [26] Sujod, Z., Erlich, M., "Control of DFIG based Wind Turbine Converter using Continuous and Discontinuous PWM: A Comparative Study", Power Plants and Power Systems Control, Vol. 8, No. 1 2012.
- [27] Vas, P., "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford University Press, Oxford science Publication, 1998.