

کنترل و مدیریت توان سیستم ترکیبی میکروتوربین - بادی در حالت تغذیه بار مستقل AC

احمدرضا عطاپور، محسن رحیمی و اللهیار اخباری

L_b ، R_b و C_b : سلف، مقاومت و خازن مبدل باک
 i_{Lb} ، V_d و V_b : جریان سلف، ولتاژ ورودی و خروجی مبدل باک

۱- مقدمه

از گذشته تا کنون، بخش زیادی از توان سیستم‌های قدرت از طریق نیروگاه‌های حرارتی تأمین می‌شود که این امر موجب انتشار زیاد گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه افزایش دمای زمین و تغییرات آب و هوایی می‌شود. بروز این مشکلات از یک سو و افزایش تقاضای مصرف انرژی و همچنین کاهش منابع سوخت‌های فسیلی از طرف دیگر باعث شده‌اند که در سال‌های اخیر، به کارگیری منابع انرژی‌های تجدیدپذیر مثل انرژی بادی و خورشیدی مورد توجه قرار گیرد [۱] و [۲]. همچنین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر ماهیتی متغیر دارند و توان تولیدی آنها به عواملی وابسته است که خارج از کنترل انسان است. به عنوان مثال یک سیستم تبدیل انرژی باد تا زمانی می‌تواند تولید توان داشته باشد که سرعت باد کافی برای کارکرد توربین بادی در دسترس باشد. بنابراین به منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان از منابع متعارف و سنتی تولید انرژی در کنار منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بهره گرفت و یک سیستم تولید انرژی ترکیبی (هیبریدی) ایجاد نمود [۳] و [۴]. سیستم تولید انرژی ترکیبی معمولاً شامل توربین ژنراتورهای بادی، پیل‌های سوختی و سلول‌های خورشیدی است که در کنار یک منبع متعارف و سنتی تولید انرژی الکتریکی مثل میکروتوربین‌های گازی تشکیل سیستم مذکور را می‌دهد [۵] و [۶]. در این سیستم‌ها دو یا چند منبع تولید توان وجود دارد که به صورت موازی و مکمل هم عمل نموده و در بیشتر موارد از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه و یا بار متصل می‌شوند. نقش این مبدل‌ها در یک سیستم هیبریدی پررنگ و حایز اهمیت است، زیرا با تغییر ساختار کنترلی این مبدل‌ها امکان کارکرد سیستم ترکیبی در شرایط مختلف فراهم می‌شود.

در سال‌های اخیر مقالات متعددی در زمینه ارزیابی عملکرد، کنترل و مدیریت توان سیستم‌های هیبریدی منتشر شده است. در دسته‌ای از این مقالات سیستم ترکیبی متشکل از یک میکروتوربین و سلول‌های خورشیدی [۷] تا [۹]، یا توربین - ژنراتور بادی [۱۰] تا [۱۳] و یا پیل‌های سوختی [۱۴] تا [۱۸] است. ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر با ذخیره‌سازهای انرژی و منابع انرژی معین قابل دیسچ در ریزشبکه‌های AC و DC در مقالات متعددی بحث شده است [۱۹] تا [۲۵]. در برخی مقالات مثل [۲۲]، [۲۵] و [۲۶]، منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در مود ردیابی توان بهینه کار می‌کنند و ذخیره‌سازهای انرژی، توازن بین تولید و مصرف را در ریزشبکه برقرار می‌کنند. با این حال به دلیل ظرفیت محدود ذخیره‌سازها، امکان این که همیشه منابع انرژی تجدیدپذیر در مود ردیابی

چکیده: در مقاله حاضر به بررسی عملکرد، کنترل و مدیریت توان سیستم تحت مطالعه متشکل از توربین - ژنراتور بادی مبتنی بر ژنراتور سنکرون مغناطیس‌دایم و میکروتوربین در حالت جدا از شبکه و تغذیه بار مستقل پرداخته می‌شود. به عنوان نوآوری، در این مقاله توربین بادی همیشه و در همه حالات در مود ردیابی توان بهینه کار نمی‌کند بلکه بسته به توان در دسترس توربین بادی و توان مصرفی بار، دو مود عملکردی برای توربین بادی تعریف می‌شود: مود کنترل توان (یا مود ردیابی توان بهینه) و مود کنترل ولتاژ (یا مود ردیابی توان بار). چنانچه توان در دسترس توربین بادی کمتر از توان بار باشد، توربین بادی در مود ردیابی توان بهینه کار می‌کند و میکروتوربین کمبود توان بار را جبران می‌کند. چنانچه توان در دسترس توربین بادی از توان بار فراتر رود، با توجه به این که میکروتوربین نمی‌تواند توان اضافی را جذب کند، توربین بادی تغییر مود داده و در مود کنترل ولتاژ یا ردیابی توان بار عمل می‌کند. در این مود، توان تزریقی توسط توربین بادی برابر توان بار و کمتر از توان در دسترس است و توان تولیدی میکروتوربین ناچیز خواهد بود. در خاتمه با استفاده از شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه در محیط Matlab-Simulink، عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلیدواژه: توربین بادی با ژنراتور سنکرون مغناطیس‌دایم، میکروتوربین، کنترل هماهنگ، مدیریت توان، مودهای کنترل توان و کنترل ولتاژ.

فهرست علائم

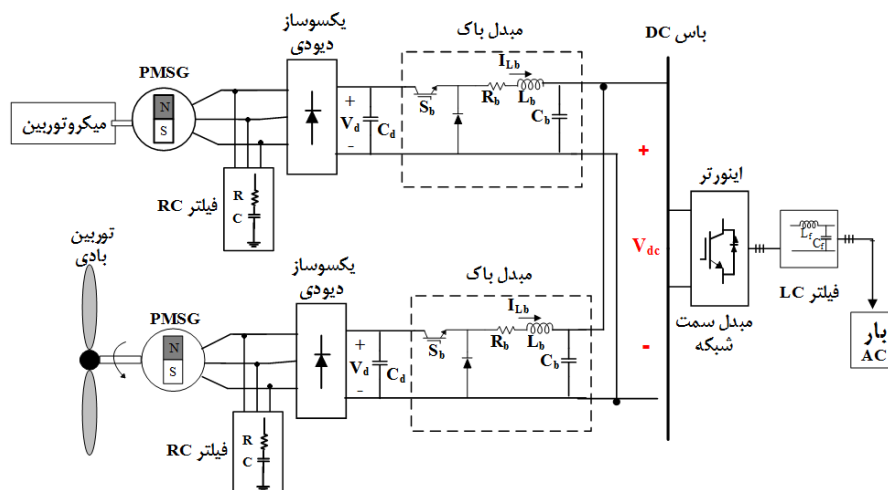
P_{WT} : توان توربین بادی
 P_L : توان بار الکتریکی خروجی
 ω_s : فرکانس بار الکتریکی خروجی
 ω_g : سرعت ژنراتور بادی
 V_{dc} : ولتاژ لینک DC
 DL : مقاومت تلف‌کننده توان
 v_{cd} و v_{cq} : مؤلفه‌های d و q ولتاژ خروجی اینورتر
 i_{cd} و i_{cq} : مؤلفه‌های d و q جریان خروجی اینورتر
 i_{Ld} و i_{Lq} : مؤلفه‌های d و q جریان بار اینورتر
 v_{Ld} و v_{Lq} : مؤلفه‌های d و q ولتاژ بار اینورتر

این مقاله در تاریخ ۲ مرداد ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۴ اسفند ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

احمدرضا عطاپور، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، (email: ra_atapoor@yahoo.com)

محسن رحیمی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، (email: mrahimi@kashanu.ac.ir)

اللهیار اخباری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، (email: allahyar_akhbari@yahoo.com)



شکل ۱: سیستم ترکیبی مورد مطالعه.

و میکروتوربین از طریق مبدل‌های کاهنده باک به لینک DC اینورتر تغذیه‌کننده بار متصل می‌شوند. به عنوان نوآوری در این مقاله، توربین بادی بر خلاف بسیاری از مقالات مشابه، همیشه و در همه حالات در مود ردیابی توان بهینه کار نمی‌کند. بلکه بسته به توان در دسترس توربین بادی و توان مصرفی بار، دو مود عملکردی برای توربین بادی تعریف می‌شود: مود کنترل توان یا مود ردیابی توان بهینه و مود کنترل ولتاژ یا مود ردیابی توان بار. چنانچه توان در دسترس توربین بادی کمتر از توان بار باشد، توربین بادی در مود کنترل توان (مود ردیابی توان بهینه) کار می‌کند و بیشینه توان در دسترس را به بار منتقل می‌کند. در این حالت میکروتوربین ولتاژ لینک DC اینورتر را کنترل می‌کند و به این وسیله کمبود توان بار را جبران می‌کند. چنانچه توان در دسترس توربین بادی از توان بار فراتر رود، با توجه به این که میکروتوربین نمی‌تواند توان اضافی را جذب کند، اضافه ولتاژ در لینک DC اینورتر به وقوع می‌پیوندد. برای حل این مشکل، توربین بادی تغییر مود داده و در مود کنترل ولتاژ یا ردیابی توان بار عمل می‌کند. در مود ردیابی توان بار، توربین بادی وظیفه کنترل و تثبیت ولتاژ لینک DC را به عهده دارد و توان تزریقی توسط توربین بادی برابر توان بار و کمتر از توان در دسترس است. همچنین در این مود، توان تولیدی میکروتوربین ناچیز خواهد بود.

در این راستا در این مقاله، ابتدا ساختار سیستم تحت مطالعه معرفی می‌شود. سپس دو مود کنترلی مذکور (مود ردیابی توان بهینه و مود ردیابی توان بار) برای سیستم معرفی و روش مدیریت توان میکروتوربین و توربین-ژنراتور بادی مطرح می‌گردد. در ادامه به استخراج ساختارهای کنترلی اینورتر سمت بار و مبدل‌های باک منابع تولید انرژی بادی و میکروتوربین پرداخته شده و نحوه انتخاب و طراحی ضرایب کنترل‌کننده‌ها ارائه می‌گردد. در خاتمه با استفاده از شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه در محیط Matlab-Simulink عملکرد سیستم تحت شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- معرفی سیستم تحت مطالعه و روش مدیریت توان

شکل ۱، ساختار سیستم ترکیبی تحت مطالعه را نشان می‌دهد. مطابق شکل، سیستم تحت مطالعه شامل یک سیستم تولید انرژی بادی (WECS)^۱ و میکروتوربین^۲ (MTGS) است و در حالت جدا از شبکه و

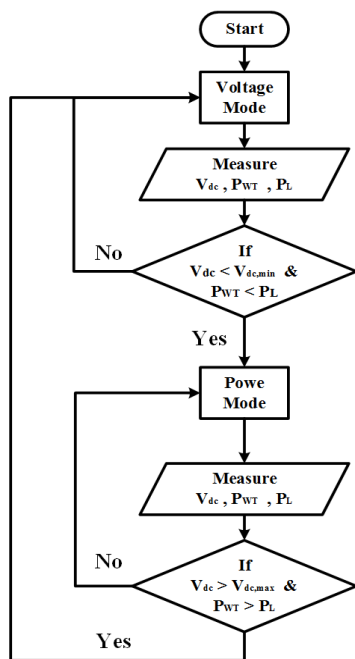
توان بهینه کار کنند، وجود ندارد. بنابراین چالش‌هایی در مدیریت توان ریزشکه‌هایی که شامل منابع انرژی تجدیدپذیر هستند وجود دارد. به این معنی که منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در بعضی شرایط بسته به شرایط بار و ریزشکه، نباید در مود ردیابی توان بهینه کار کنند [۲۷] تا [۳۳].

ساختار سیستم هیبریدی تحت مطالعه در این مقاله که در شکل ۱ نشان داده شده است، متشکل از یک توربین ژنراتور بادی مبدل کامل مبتنی بر ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم و یک میکروتوربین است که در حالت جدا از شبکه و برای تغذیه بار مستقل مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. ژنراتور به کار رفته در هر دو تولید بادی و میکروتوربین از نوع سنکرون مغناطیس دائم است. سیستم پیشنهادی مناسب مناطق دورافتاده است که فاصله زیادی از شبکه داشته و تأمین توان الکتریکی مورد نیاز آنجا توسط شبکه، نه مطمئن است و نه صرفه اقتصادی دارد؛ چرا که برای انتقال توان از شبکه به مناطق دورافتاده، هم هزینه خطوط انتقال بسیار بالا است و هم تلفات توان زیادی را ایجاد می‌کند [۳۴] و [۳۵]. علت پیشنهاد استفاده از انرژی باد در مقاله حاضر به این خاطر است که این منبع انرژی، جزء پرطرفدارترین منابع تجدیدپذیر محسوب می‌شود و پیشرفت‌های سریع در تکنولوژی توربین‌های بادی، استفاده از انرژی باد را برای تولید برق آسان‌تر کرده به طوری که تا پایان سال ۲۰۱۷ ظرفیت تولید توان از انرژی باد به ۵۱۴/۸ گیگاوات رسیده است [۳۶]. همچنین متوسط توان توربین-ژنراتورهای بادی تجاری نصب‌شده تا اواسط دهه ۹۰ میلادی، ۳۰۰ کیلووات بوده ولی در سال‌های اخیر با ساخت ژنراتورهای الکتریکی با ظرفیت بالاتر، توان این دسته از منابع انرژی‌های نو تا ۱۰ مگاوات نیز افزایش یافته است. باد، زمانی که در دسترس باشد یک منبع بی‌نهایت انرژی است و مهم‌تر این که اثرات زیست‌محیطی بسیار کمی هم دارد که به این ترتیب از دید اقتصادی، هزینه برای سرمایه‌گذاری اولیه آن قابل توجیه است [۳۷] و [۳۸]. جزء دیگر سیستم ترکیبی مورد بحث، سیستم میکروتوربین است. در واقع میکروتوربین به عنوان یک سیستم پشتیبان برای سیستم تولید انرژی بادی در نظر گرفته شده است که به دلیل اندازه کوچک‌تر، راندمان بالاتر و پاسخ سریع‌تر در مقایسه با توربین‌های گازی معمول، محبوبیت زیادی در تولید پراکنده پیدا کرده است [۳۹] تا [۴۱].

هدف این مقاله، کنترل و مدیریت توان سیستم تولید انرژی ترکیبی تحت مطالعه می‌باشد که جدا از شبکه بوده و همان طور که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است متشکل از توربین-ژنراتور بادی، میکروتوربین، اینورتر تغذیه‌کننده بار و بار مستقل است. با توجه به شکل ۱، توربین بادی

1. Wind Energy Conversion System

2. Microturbine Generation System



شکل ۳: روندنمای تغییر مود کنترلی سیستم تحت مطالعه.

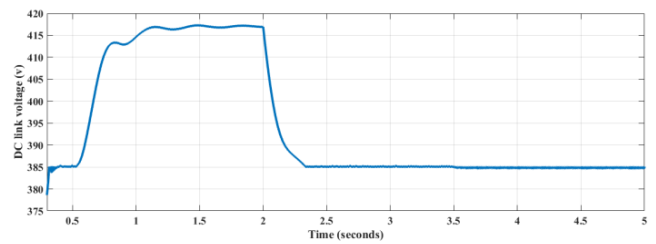
و توان میکروتوربین به مقدار بسیار کمی محدود می‌شود. در شبیه‌سازی ذکرشده در پاراگراف پیشین، این تغییر مود در لحظه ۲/۵ ثانیه صورت می‌گیرد و طبق شکل ۲ ولتاژ لینک DC بعد از یک حالت گذرا به مقدار نامی خود (۳۸۵ V) باز می‌گردد.

در مود کنترل ولتاژ، بایستی زاویه گام پره توربین- ژنراتور بادی تغییر کند تا انرژی دریافتی از باد، متناسب با انرژی مورد نیاز بار باشد. اما اگر در این حالت، کنترل زاویه گام به اندازه کافی سریع نباشد، برای جلوگیری از افزایش سرعت ژنراتور (ω_g) به بیش از حد مجاز، یک مکانیزم خارجی برای جذب انرژی اضافی باد نیاز است. این مکانیزم خارجی می‌تواند یک ذخیره‌ساز انرژی یا یک تلف‌کننده توان (DL) باشد. DL می‌تواند مثلاً بانک‌های مقاومتی یا یک ایستگاه تولید هیدروژن یا یک سیستم آبیاری باشد که اگر V_{dc} به حد بالایی خود رسید از طریق یک کلید، DL روشن شود و با مصرف جریان، اضافه توان تولیدی باد را جذب کند. در این مقاله کنترل زاویه گام پره به اندازه کافی سریع در نظر گرفته شده است به طوری که از افزایش سرعت ژنراتور جلوگیری می‌کند و بنابراین به DL دیگر نیازی نیست.

چنانچه سیستم در مود کنترل ولتاژ باشد و توان توربین بادی از توان بار مصرفی کمتر گردد ($P_{WT} < P_L$)، این بار عکس فرایندی که در پاراگراف‌های پیشین شرح داده شد، رخ می‌دهد و ولتاژ لینک DC کاهش می‌یابد و سیستم از مود کنترل ولتاژ به مود کنترل تغییر وضعیت می‌دهد. با توجه به آنچه شرح داده شد و با تعریف یک ولتاژ آستانه بالا و پایین برای ولتاژ لینک DC می‌توان سیستم تحت مطالعه را مدیریت نمود و عملکردی پایدار را برای سیستم تحت مطالعه فراهم کرد. در شکل ۳، روندنمای تغییر مود سیستم نشان داده شده است.

۳- کنترل اینورتر سمت بار

اینورتر سمت بار وظیفه کنترل ولتاژ و فرکانس بار خروجی را دارد. ساختار کنترلی این اینورتر در شکل ۴ ترسیم شده است. مطابق شکل،



شکل ۲: تغییرات ولتاژ لینک DC در صورت عدم تغییر مود کنترلی.

تغذیه بار تنها مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. منابع تولید انرژی از طریق میدل‌های الکترونیک قدرت به باس AC خروجی متصل شده‌اند. مطابق شکل ۱، هر یک از واحدهای تولید دارای یک یکسوساز پل دیودی سه‌فاز و یک میدل DC/DC کاهنده یا میدل باک است. همچنین یک اینورتر منبع ولتاژ PWM به لینک DC متصل بوده و بین این اینورتر و بار AC خروجی یک فیلتر پسیو LC قرار گرفته است، زیرا ولتاژ خروجی این میدل به واسطه کلیدزنی حاوی مؤلفه‌های هارمونیک فرکانس بالا بوده و برای تضعیف این هارمونیک‌ها و جلوگیری از مشکلات کیفیت توان، به این فیلتر نیاز خواهد بود. طبق شکل ۱، ژنراتور در هر دو منبع تولید انرژی از نوع PMSG است، زیرا به واسطه جایگزینی آهن‌ربای دائم به جای سیم‌پیچی میدان روتور، تلفات، اینرسی روتور و تعمیرات و نگهداری کمتر شده و چگالی توان و قابلیت اطمینان بالاتر است [۴۲].

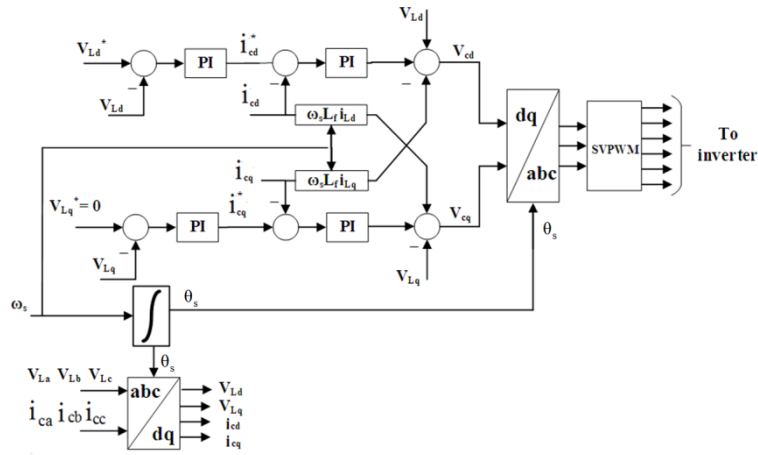
در سیستم تحت مطالعه اینورتر PWM وظیفه تنظیم ولتاژ و فرکانس نامی بار را دارد. همچنین دو مود کنترلی تعریف می‌گردد و بسته به نوع مود، نقش میدل‌های باک توربین- ژنراتور بادی و میکروتوربین در سیستم فرق می‌کند و در ادامه به تفصیل در مورد آن بحث خواهد شد.

در سیستم‌های ترکیبی وجود یک سیستم مدیریت توان جهت عملکرد پایدار و صحیح سیستم الزامی است. زیرا در بازه‌های مختلف شبانه‌روز میزان تولیدات توان منابع تجدیدپذیر و میزان تقاضای بار تغییر می‌کند. بنابراین برای سیستم ترکیبی تحت مطالعه یک سیستم مدیریت توان طراحی و در این بخش به شرح عملکرد آن پرداخته می‌شود.

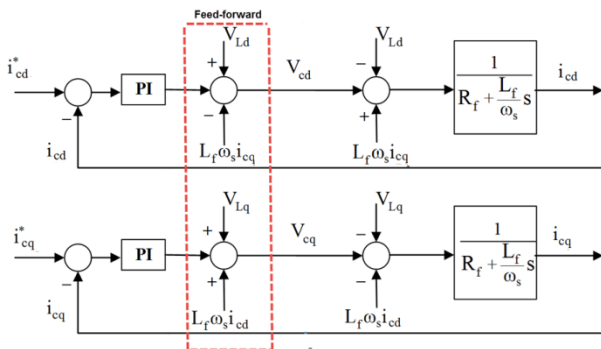
در این مقاله به منظور فراهم‌آوردن ولتاژ ثابت برای بار AC خروجی در شرایطی که توان توربین بادی P_{WT} یا توان مورد نیاز بار P_L تغییر می‌کند، دو مود کنترلی توان و ولتاژ تعریف می‌شود. در مودهای کنترلی مذکور، ساختار کنترلی میدل‌های باک توربین بادی و میکروتوربین عوض شده و از ولتاژ لینک DC، توان خروجی توربین بادی و توان مورد نیاز بار به عنوان شاخص تشخیص‌دهنده تغییر مود استفاده شده است.

در مود کنترل توان، توان خروجی توربین بادی کمتر از توان مورد نیاز بار است ($P_{WT} < P_L$) و میدل باک این منبع، توان خروجی آن را کنترل می‌کند. همچنین ولتاژ لینک DC توسط میدل باک میکروتوربین کنترل می‌گردد. در مود کنترل توان اگر توان مورد نیاز بار کاهش یابد به نحوی که $P_{WT} > P_L$ شود، چنانچه مود کنترلی سیستم تغییر نکند، ولتاژ لینک DC افزایش می‌یابد. این نتیجه با استفاده از شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه که در شکل ۲ نشان داده شده نیز قابل دریافت است. شکل ۲، ولتاژ لینک DC را در شرایطی نشان می‌دهد که سیستم از ابتدای شبیه‌سازی تا لحظه ۲ ثانیه در مود کنترل توان قرار دارد. در بازه زمانی ۰/۵ تا ۲ ثانیه $P_{WT} > P_L$ شده و همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ولتاژ لینک DC افزایش می‌یابد. بنابراین در این شرایط بایستی سیستم تغییر مود داده و از مود کنترل توان به کنترل ولتاژ منتقل شود.

در مود کنترل ولتاژ، توان توربین بادی از توان خروجی بار بیشتر است ($P_{WT} > P_L$) و میدل باک توربین بادی ولتاژ لینک DC را کنترل می‌کند



شکل ۴: ساختار کلی کنترل اینورتر سمت بار.



شکل ۶: حلقه‌های داخلی کنترل مؤلفه‌های d و q جریان خروجی اینورتر.

به صورت پربونیت شده و در دستگاه مرجع سنکرون با محورهای dq به صورت زیر می‌توان نوشت [۴۳]

$$\begin{cases} v_{cd} = R_f i_{cd} - L_f \omega_s i_{cq} + \frac{L_f}{\omega_s} \frac{di_{cd}}{dt} + v_{Ld} \\ v_{cq} = R_f i_{cq} + L_f \omega_s i_{cd} + \frac{L_f}{\omega_s} \frac{di_{cq}}{dt} + v_{Lq} \end{cases} \quad (2)$$

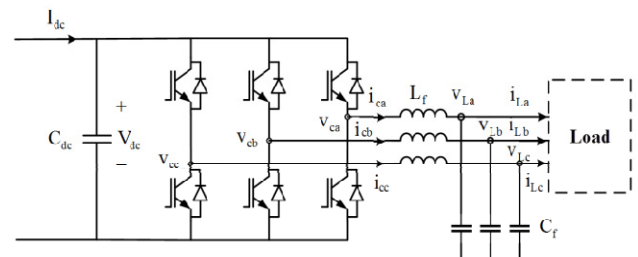
با توجه به (۲)، بلوک دیاگرام حلقه داخلی کنترل جریان محور d و q به صورت شکل ۶ به دست می‌آید. در شکل مذکور جهت جریان ترم‌های اغتشاشی $-v_{Lq} - \omega_s L_f i_{cd}$ و $-v_{Ld} + \omega_s L_f i_{cq}$ که به حلقه‌های کنترل جریان d و q وارد می‌شوند، عبارت‌های $v_{Ld} - \omega_s L_f i_{cq}$ و $v_{Lq} + \omega_s L_f i_{cd}$ به صورت فید-فوروارد به خروجی کنترل‌کننده‌های PI اضافه شده است. این جبران‌سازی موجب عملکرد سریع‌تر حلقه کنترلی در شرایط گذرا می‌شود.

با توجه به حلقه‌های داخلی کنترل مؤلفه‌های d و q جریان، تابع تبدیل حلقه باز سیستم $G_{ol}^{i_{cdq}}(s)$ به صورت (۳) خواهد بود

$$G_{ol}^{i_{cdq}}(s) = \frac{K_{P,i_{cdq}} \left(s + \frac{K_{I,i_{cdq}}}{K_{P,i_{cdq}}} \right)}{s} \times \frac{1}{\frac{L_f}{\omega_s} \left(s + \frac{R_f}{L_f} \omega_s \right)} \quad (3)$$

چنانچه جهت طراحی ضرایب کنترل‌کننده PI از روش حذف صفر و قطب استفاده گردد [۴۲]، ضرایب کنترل‌کننده‌های تناسبی و انتگرالی یا $K_{P,i_{cdq}}$ و $K_{I,i_{cdq}}$ به صورت زیر به دست می‌آید

$$K_{P,i_{cdq}} = \frac{\alpha_{i_{cdq}}}{\omega_s} L_f \quad (4)$$



شکل ۵: مدار اینورتر سمت بار.

جهت تسهیل کنترل اینورتر سمت بار از روش کنترل برداری در دستگاه چرخان dq با جهت‌یابی ولتاژ بار استفاده می‌شود. این بدان معناست که ولتاژها و جریان‌های سه‌فاز بار خروجی با استفاده از تبدیل پارک از دستگاه ساکن abc به دستگاه مرجع سنکرون dq منتقل می‌شود. ضمناً جهت محاسبه آرگمان تبدیل پارک θ_s کافی است که از فرکانس نامی بار خروجی ω_s انتگرال گرفته شود. همچنین به واسطه این که از کنترل برداری با جهت‌یابی ولتاژ بار استفاده می‌شود، مؤلفه d ولتاژ بار خروجی برابر مقدار نامی دامنه ولتاژ بار و مؤلفه q آن برابر صفر است.

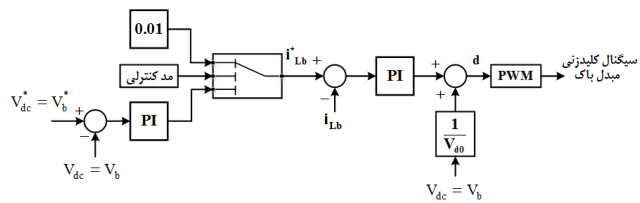
با توجه به شکل ۴، جهت کنترل مؤلفه‌های d و q ولتاژ و جریان بار AC خروجی، ساختار کنترلی اینورتر سمت بار، دارای دو حلقه کنترلی است که عبارتند از حلقه داخلی کنترل جریان و حلقه خارجی کنترل ولتاژ. در ادامه ابتدا بلوک دیاگرام حلقه‌های کنترلی مذکور به دست آمده و سپس درباره طراحی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی آنها بحث خواهد شد.

۳-۱ حلقه‌های داخلی کنترل جریان اینورتر سمت بار

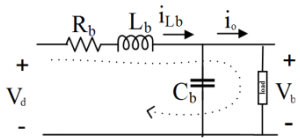
شکل ۵، مدار اینورتر سمت بار را نشان می‌دهد. مطابق این شکل اینورتر از طریق یک فیلتر LC سه‌فاز به بار خروجی متصل شده که L_f و C_f به ترتیب سلف و خازن فیلتر است. با توجه به شکل ۵ و با صرف نظر از جریان خازن‌های C_f در هر سه‌فاز، رابطه ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ بار در دستگاه سه‌فاز abc به صورت زیر به دست می‌آید

$$\begin{cases} v_{ca} = R_f i_{ca} + L_f \frac{di_{ca}}{dt} + v_{La} \\ v_{cb} = R_f i_{cb} + L_f \frac{di_{cb}}{dt} + v_{Lb} \\ v_{cc} = R_f i_{cc} + L_f \frac{di_{cc}}{dt} + v_{Lc} \end{cases} \quad (1)$$

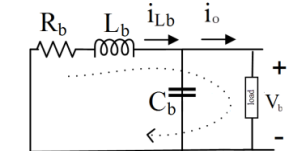
که R_f ، v_c ، v_L و i_c به ترتیب مقاومت سلف فیلتر LC، ولتاژ فاز خروجی اینورتر، ولتاژ فاز بار و جریان خروجی اینورتر است. روابط فوق را



شکل ۹: ساختار کنترلی ولتاژ لینک DC در مبدل باک میکروتوربین.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: وضعیت مدار مبدل باک، (الف) در حالت روشن بودن کلید و (ب) در حالت خاموش بودن کلید.

و (۱۰) به دست می‌آید

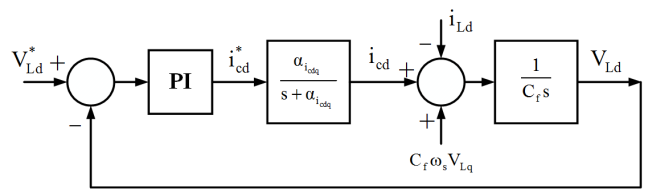
$$K_{P,V_{Ldq}} = C_f \frac{\alpha_{i_{cdq}}}{\nu} \quad (۹)$$

$$K_{I,V_{Ldq}} = C_f \frac{\alpha_{i_{cdq}}}{\lambda} \quad (۱۰)$$

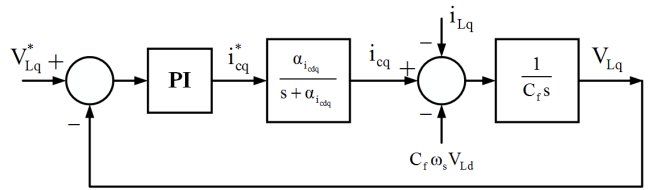
۴- کنترل مبدل باک میکروتوربین

شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب مدار مبدل باک میکروتوربین و بلوک دیگرام کنترلی آن را نشان می‌دهد. طبق شکل ۹، در ساختار کنترلی مبدل باک میکروتوربین، یک حلقه کنترل جریان سلف i_{Lb} وجود دارد. بسته به این که سیستم در چه مودی کار می‌کند مقدار مرجع جریان i_{Lb}^* فرق خواهد نمود. در مود کنترل ولتاژ که بایستی توان میکروتوربین به مقدار ناچیزی محدود شود $i_{Lb}^* = 0.1$ است. در مود کنترل توان که میکروتوربین ولتاژ لینک DC را کنترل می‌کند مقدار i_{Lb}^* از یک حلقه دیگری به نام حلقه خارجی کنترل ولتاژ تعیین می‌شود. در ادامه ابتدا مدل مبدل باک استخراج گردیده و سپس کنترل‌کننده‌های هر دو حلقه کنترل جریان و ولتاژ طراحی می‌شوند.

شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب به ترتیب مدار مبدل باک را در شرایطی که کلید مبدل روشن و خاموش است نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که مبدل باک یک سیستم متغیر با زمان محسوب می‌شود [۴۵]. از آنجا که اساس طراحی کنترل‌کننده در این مقاله بر پایه اصول کنترل خطی است، بنابراین لازم است مدلی خطی و تغییرناپذیر با زمان برای مبدل باک استخراج گردد. در [۴۶] با استفاده از روش میانگین فضای حالت، مبدل باک به صورت یک سیستم تغییرناپذیر با زمان تقریب زده می‌شود و با فرض آن که مبدل در مود CCM (پیوسته جریان) کار کند، مدلی به صورت شکل ۱۱ پیشنهاد می‌شود. در مدل ارائه شده d ضریب وظیفه کلید مبدل باک است که طبق رابطه $t_{on} = dT_s$ با دوره تناوب کلیدزنی T_s و زمان روشن بودن کلید t_{on} در ارتباط است. همچنین V_d ، i_{Lb} ، R_b و L_b به ترتیب سلف، مقاومت و خازن مبدل باک و V_b و i_o به ترتیب جریان سلف، ولتاژ ورودی و خروجی این مبدل است.

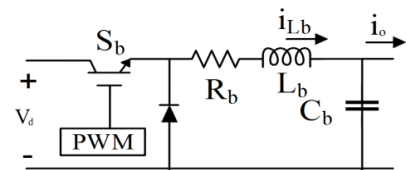


(الف)



(ب)

شکل ۷: حلقه‌های خارجی کنترل ولتاژ بار (الف) مؤلفه d و (ب) مؤلفه q .



شکل ۸: مبدل باک میکروتوربین.

$$K_{I,i_{cdq}} = \alpha_{i_{cdq}} R_f \quad (۵)$$

که در روابط فوق $\alpha_{i_{cdq}}$ پهنای باند سیستم حلقه بسته کنترل مؤلفه‌های d و q جریان خروجی اینورتر است و توسط طراح تعیین می‌گردد. بنابراین تابع تبدیل حلقه بسته سیستم کنترلی به صورت $G_{cl}^{i_{cdq}}(s) = \alpha_{i_{cdq}} / (s + \alpha_{i_{cdq}})$ است.

۳-۲ حلقه خارجی کنترل ولتاژ بار

با توجه به شکل ۵، رابطه بین جریان خروجی اینورتر i_c و جریان بار i_L در دستگاه ساکن abc طبق (۶) است

$$\begin{cases} i_{ca} = C_f \frac{dv_{La}}{dt} + i_{La} \\ i_{cb} = C_f \frac{dv_{Lb}}{dt} + i_{Lb} \\ i_{cc} = C_f \frac{dv_{Lc}}{dt} + i_{Lc} \end{cases} \quad (۶)$$

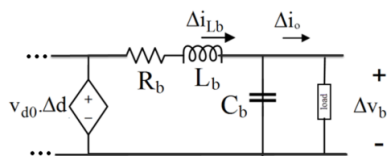
چنانچه رابطه فوق به دستگاه dq منتقل گردد، می‌توان نتیجه گرفت

$$\begin{cases} i_{cd} = C_f \frac{dV_{Ld}}{dt} - C_f \omega_s V_{Lq} + i_{Ld} \\ i_{cq} = C_f \frac{dV_{Lq}}{dt} + C_f \omega_s V_{Ld} + i_{Lq} \end{cases} \quad (۷)$$

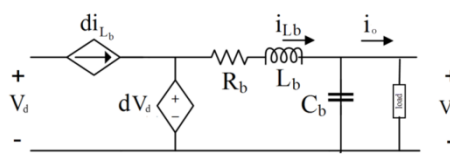
با توجه به (۷)، بلوک دیگرام حلقه خارجی کنترل ولتاژ محور d و q به صورت شکل ۷ به دست می‌آید. با توجه به شکل مذکور تابع تبدیل حلقه باز کنترل ولتاژ عبارت است از

$$G_{ol}^{V_{Ldq}}(s) = \frac{K_{P,V_{Ldq}} (s + \frac{K_{I,V_{Ldq}}}{K_{P,V_{Ldq}}})}{s} \times \frac{\alpha_{i_{cdq}}}{s + \alpha_{i_{cdq}}} \times \frac{1}{C_f s} \quad (۸)$$

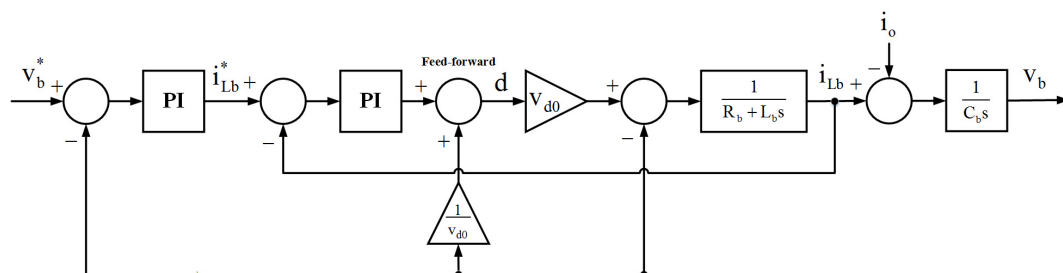
برای انتخاب ضرایب کنترل‌کننده PI حلقه کنترلی از روش بهینه‌سازی متقارن [۴۴] استفاده می‌شود و ضرایب $K_{P,V_{Ldq}}$ و $K_{I,V_{Ldq}}$ بر اساس (۹)



شکل ۱۲: مدل متوسط و خطی شده مبدل باک.



شکل ۱۱: مدل متوسط مبدل باک.



شکل ۱۳: حلقه کنترل مبدل باک.

که در آن $\omega_{c,i_{Lb}}$ پهنای باند تابع تبدیل حلقه بسته کنترل جریان است. بنابراین بر اساس بلوک دیاگرام حلقه کنترلی مبدل باک (شکل ۱۳) و با توجه به (۱۵)، تابع تبدیل حلقه باز کنترل ولتاژ مبدل باک عبارت است از

$$G_{ol}^{v_b}(s) = PI^{v_b}(s) \times G_{sys}^{v_b}(s) = \frac{K_{P,v_b} \left(s + \frac{K_{I,v_b}}{K_{P,v_b}} \right)}{s} \times \frac{\omega_{c,i_{Lb}}}{s + \omega_{c,i_{Lb}}} \times \frac{1}{C_b s} \quad (16)$$

چنانچه صفر کنترل کننده PI حلقه خارجی، با قطب تابع تبدیل حلقه بسته کنترل جریان برابر در نظر گرفته شود (یا $K_{I,v_b}/K_{P,v_b} = \omega_{c,i_{Lb}}$) و همچنین به منظور پایداری سیستم کنترلی فرض گردد حلقه خارجی خیلی کندتر از حلقه داخلی است یا به عبارتی دیگر فرکانس عبور بهره حلقه خارجی ولتاژ α_{v_b} خیلی کوچکتر از پهنای باند حلقه داخلی جریان $\omega_{c,i_{Lb}}$ باشد (یا $\alpha_{v_b} = 0.1 \omega_{c,i_{Lb}}$)، می توان نتیجه گرفت

$$K_{P,v_b} = 0.1 C_b \omega_{c,i_{Lb}} \quad (17)$$

$$K_{I,v_b} = \omega_{c,i_{Lb}} K_{P,v_b} \quad (18)$$

۵- کنترل مبدل باک توربین بادی در مدهای کنترل توان و کنترل ولتاژ

در این بخش ساختارهای کنترلی مبدل باک توربین بادی در مدهای کنترل توان و کنترل ولتاژ ارائه می شود.

۵-۱ ساختار کنترلی مبدل باک توربین بادی در مود کنترل توان

توربین- ژنراتورهای بادی در سرعت های مختلف باد و به ازای سرعت زاویه ای مشخصی از ژنراتورشان، می توانند بیشینه توان را از باد دریافت و به شبکه و یا بار تزریق کنند. برای مثال در شکل ۱۴، ارتباط بین توان خروجی ژنراتور بادی با سرعت چرخش آن به ازای سرعت های مختلف باد در قالب چند نمودار ترسیم شده است [۴۷] و [۴۸]. همان طور که از شکل مشخص است در سرعت باد $11/5 \text{ m/s}$ به ازای سرعت چرخش ژنراتور برابر با 1 pu ، بیشینه توان تولیدی توربین ژنراتور بادی حاصل می گردد. به همین ترتیب این رفتار برای سایر سرعت های باد نیز مشاهده می شود. بنابراین جهت کنترل مبدل باک توربین- ژنراتور بادی در مود کنترل توان بایستی کنترل کننده ای طراحی نمود که در محدوده سرعت های مجاز باد و

از آنجا که مدل ارائه شده برای مبدل باک غیر خطی است (به دلیل ضرب d در i_{Lb} و V_d) لذا لازم است مدل حول نقطه کار خطی سازی شود. با در نظر گرفتن ولتاژها و جریان های مدار به فرم $u = u + \Delta u$ که در آن u و Δu به ترتیب مقدار پارامتر و تغییرات آنها حول نقطه کار است، با فرض ثابت بودن ولتاژ ورودی مبدل یا V_d مدل خطی آن مطابق شکل ۱۲ است. با توجه به مدل خطی مبدل باک و ساختار کنترلی مبدل که در شکل ۹ ارائه شده است، حلقه کنترلی مبدل باک در شکل ۱۳ ترسیم شده است.

با توجه به شکل ۱۳ تابع تبدیل حلقه باز، حلقه داخلی جریان عبارت است از

$$G_{ol}^{i_{Lb}}(s) = PI^{i_{Lb}}(s) \times G_{sys}^{i_{Lb}}(s) = \frac{K_{P,i_{Lb}} s + K_{I,i_{Lb}}}{s} \times \frac{V_d}{L_b s + R_b} \quad (11)$$

چنانچه فرکانس عبور بهره حلقه داخلی، توسط طراح برابر $\alpha_{i_{Lb}}$ در نظر گرفته شود و همچنین فرض گردد که اندازه صفر کنترل کننده PI این حلقه، خیلی کوچکتر از فرکانس عبور بهره باشد، بنابراین می توان گفت

$$\frac{K_{I,i_{Lb}}}{K_{P,i_{Lb}}} \ll \alpha_{i_{Lb}} \Rightarrow \frac{K_{I,i_{Lb}}}{\alpha_{i_{Lb}}} \ll K_{P,i_{Lb}} \quad (12)$$

با توجه به رابطه فوق و از آنجا که اندازه تابع تبدیل حلقه باز در فرکانس عبور بهره برابر یک است (یا $|G_{ol}^{i_{Lb}}(j\alpha_{i_{Lb}})| = 1$)، لذا مقدار $K_{P,i_{Lb}}$ از (۱۳) به دست می آید

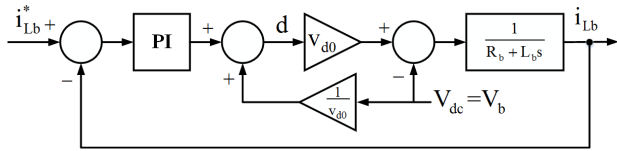
$$K_{P,i_{Lb}} \cong \frac{1}{|G_{sys}^{i_{Lb}}(j\alpha_{i_{Lb}})|} \quad (13)$$

از طرف دیگر، اگر حد فاز حلقه داخلی $PM_{i_{Lb}}$ برابر 60° درجه در نظر گرفته شود، مقدار $K_{I,i_{Lb}}$ از شرط حد فاز قابل محاسبه است

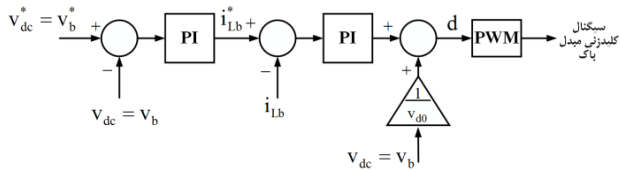
$$\angle G_{ol}^{i_{Lb}}(j\alpha_{i_{Lb}}) = -180^\circ + PM_{i_{Lb}} = -120^\circ \Rightarrow K_{I,i_{Lb}} = \alpha_{i_{Lb}} K_{P,i_{Lb}} \tan[120^\circ + \angle G_{sys}^{i_{Lb}}(j\alpha_{i_{Lb}})] \quad (14)$$

برای طراحی کنترل کننده PI حلقه خارجی ولتاژ، تابع تبدیل حلقه بسته کنترل جریان به صورت زیر تخمین زده می شود

$$G_{ol}^{v_b}(s) = \frac{i_{Lb}}{i_{Lb}^*} = \frac{\omega_{c,i_{Lb}}}{s + \omega_{c,i_{Lb}}} \quad (15)$$



شکل ۱۶: حلقه کنترل جریان مبدل باک توربین- ژنراتور بادی در مود کنترل توان.



شکل ۱۷: بلوک دیاگرام کنترل مبدل باک توربین- ژنراتور بادی در مود کنترل ولتاژ.

کنترل کننده جریان مبدل باک.

برای توصیف بهتر عملکرد کنترلی، شکل ۱۴ را در نظر بگیرید. به عنوان مثال، فرض کنید که PMSG در نقطه a و در سرعت باد 7.6 m/s در حال کار کردن است که ناگهان سرعت باد به 8.9 m/s افزایش می‌یابد (نقطه b). توان اضافه شده باعث افزایش سرعت PMSG و همچنین باعث ایجاد اختلاف بین جریان مرجع و جریان اندازه‌گیری شده مبدل باک می‌شود، این اختلاف باعث تنظیم ضریب وظیفه مبدل باک برای رسیدن به سرعت بهینه PMSG می‌گردد. در نهایت، ژنراتور به نقطه کار c جایی که اختلاف بین جریان مرجع با جریان اندازه‌گیری شده بسیار کوچک می‌شود، می‌رسد و دوباره امکان تولید حداکثری توان ژنراتور در سرعت باد جدید فراهم می‌شود. برای زمانی که سرعت باد کاهش می‌یابد هم روندی مشابه آنچه شرح داده شد اتفاق می‌افتد.

با توجه به شکل ۱۵ و مطالب مطرح شده در بخش ۴، حلقه کنترل جریان مبدل باک توربین بادی در مود کنترل توان به صورت شکل ۱۶ است. همچنین به خاطر شباهت این حلقه کنترلی به حلقه داخلی کنترل جریان مبدل باک میکروتوربین، ضرایب کنترل کننده PI در شکل ۱۶، طبق (۱۳) و (۱۴) قابل محاسبه است.

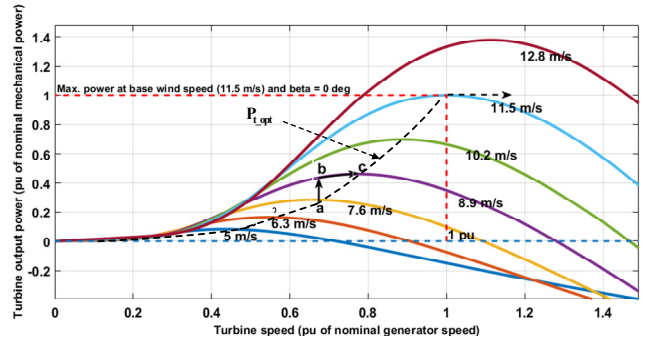
۵-۲ ساختار کنترلی مبدل باک توربین بادی در مود

کنترل ولتاژ

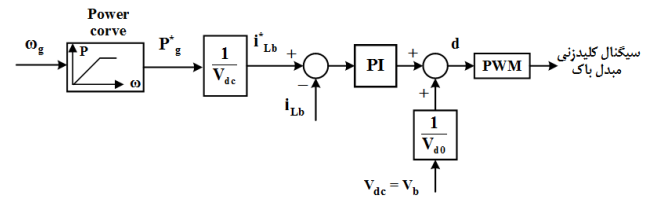
شکل ۱۷ بلوک دیاگرام کنترل مبدل باک توربین بادی در مود کنترل ولتاژ را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که ساختار کنترلی مبدل باک در این حالت مشابه بلوک دیاگرام کنترل مبدل باک میکروتوربین در مود کنترل ولتاژ است. از این رو حلقه‌های کنترلی مبدل باک توربین بادی در مود کنترل ولتاژ، شبیه شکل ۱۳ است و از همان روابط ارائه شده در بخش ۵-۱ می‌توان جهت طراحی کنترل کننده‌های حلقه‌های داخلی جریان و خارجی ولتاژ استفاده کرد.

۶- شبیه‌سازی سیستم ترکیبی بادی- میکروتوربین در کاربرد تغذیه بار تنها

به منظور بررسی عملکرد سیستم ترکیبی بادی- میکروتوربین، شکل ۱، مدل آن در نرم‌افزار MATLAB-Simulink شبیه‌سازی شده و مقدار پارامترهای سیستم در پیوست ارائه گردیده است. همچنین مقدار مینا و حداکثر توان هر دو واحد تولیدی برابر 6 kW است. بنابراین این سیستم ترکیبی قادر به تأمین مقدار توان 6 kW در هر لحظه از روز و صرف نظر از شرایط باد است. بار خروجی از نوع مقاومتی و پارامترهای سیستم در پیوست ارائه گردیده است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی سیستم ترکیبی تحت حالات مختلفی از شرایط باد و بار آورده شده است.



شکل ۱۴: نمودار توان خروجی توربین- ژنراتور بادی بر حسب سرعت چرخش ژنراتور آن در سرعت‌های مختلف باد.



شکل ۱۵: کنترل مبدل باک توربین بادی در مود کنترل توان.

با توجه به مشخصات آیرودینامیکی توربین- ژنراتور بادی بتوان حداکثر توان را به بار و یا شبکه تزریق نمود. به عبارت دیگر توربین- ژنراتور بادی در مود کنترل توان بایستی نقطه بیشینه توان را دنبال و یا در مود MPPT کار کند. رابطه بین سرعت زاویه‌ای توربین ژنراتور بادی ω_t و سرعت باد V_w از رابطه زیر به دست می‌آید [۴۷] و [۴۸]

$$\omega_t = \lambda \frac{V_w}{R} \tag{19}$$

که در آن λ نرخ سرعت نوک و R شعاع پره‌های توربین بادی است. همچنین رابطه بین توان مکانیکی منتقل شده به شفت توربین توسط (۲۰) محاسبه می‌شود

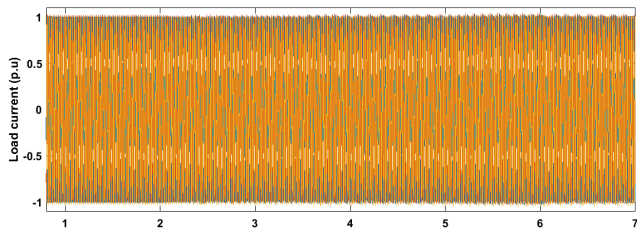
$$P_t = \frac{1}{2} \pi \rho R^3 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \tag{20}$$

که ρ چگالی هوا و C_p ضریب بازدهی توان بوده و تابعی از نرخ سرعت نوک λ و زاویه پره β است. با توجه به روابط اخیر، رابطه بین بیشینه توان خروجی توربین بادی P_{t_opt} و سرعت زاویه‌ای مربوط به این توان ω_{t_opt} به صورت زیر است

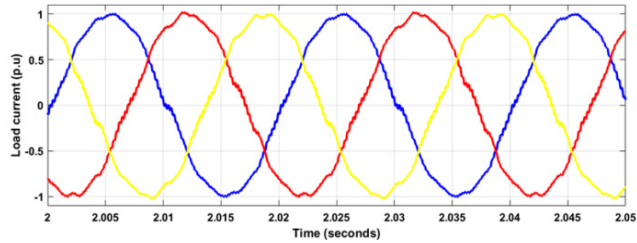
$$\begin{cases} P_{t_opt} = K_{opt} \omega_{t_opt}^3 \\ K_{opt} = \frac{1}{2} \pi \rho R^3 C_{P_opt} \left(\frac{R}{\lambda_{opt}}\right)^2 \end{cases} \tag{21}$$

در رابطه فوق C_{P_opt} بیشترین مقدار ثابت C_p به ازای یک زاویه پره مشخص و λ_{opt} مقدار بهینه نرخ سرعت نوک است. با توجه مطالب مطرح شده، ساختار پیشنهادی کنترل مبدل باک توربین ژنراتور بادی در مود کنترل توان، در شکل ۱۵ ترسیم شده است. هدف این کنترل کننده، کنترل ضریب وظیفه کلید مبدل باک توربین بادی است. بر اساس شکل ۱۵، الگوریتم کنترلی شامل مراحل زیر است:

- ۱) اندازه‌گیری یا تخمین سرعت زاویه‌ای ژنراتور بادی ω_g .
- ۲) تعیین مقدار مرجع توان (P_g^*) با استفاده از رابطه $P_g^* = K_{opt} \omega_g^3$.
- ۳) تعیین مقدار مرجع جریان مبدل باک (i_{Lb}^*) با توجه به رابطه $i_{Lb}^* = P_g^* / V_{dc}$.
- ۴) استخراج ضریب وظیفه (d) کلید S_b با استفاده از خروجی

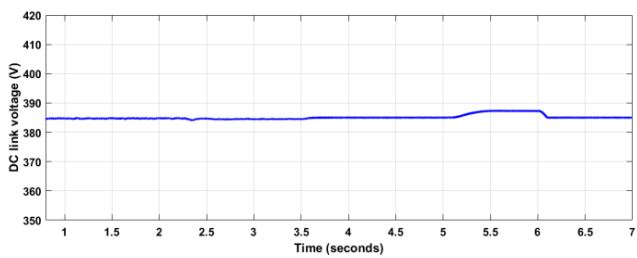


(الف)

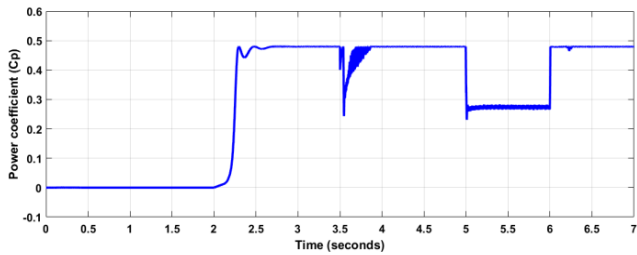


(ب)

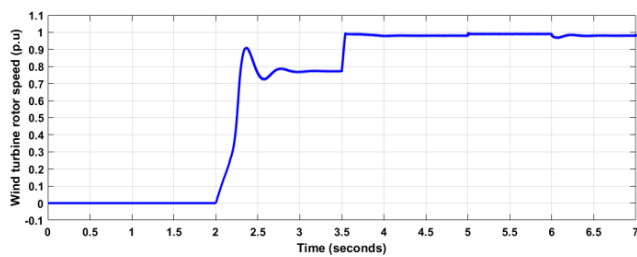
شکل ۲۱: (الف) جریان بار و (ب) جریان بار از ثانیه ۲ تا ۲.۰۵.



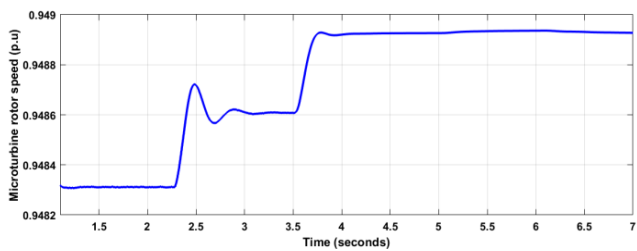
شکل ۲۲: ولتاژ لینک DC در حالت اول شبیه‌سازی.



شکل ۲۳: ضریب بازدهی توان (C_p) توربین- ژنراتور بادی در حالت اول شبیه‌سازی.

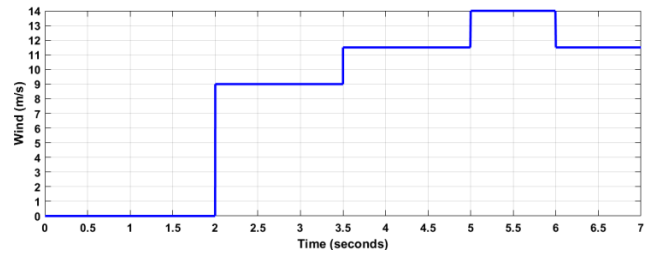


شکل ۲۴: سرعت روتور توربین-ژنراتور بادی در حالت اول شبیه‌سازی.

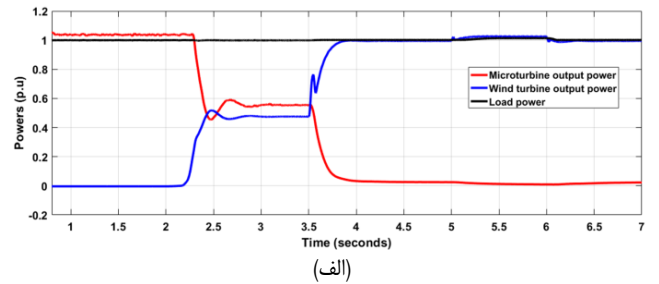


شکل ۲۵: سرعت روتور میکروتوربین در حالت اول شبیه‌سازی.

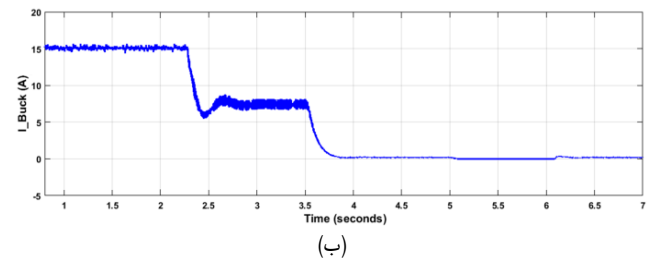
ژنراتور بادی کمتر و یا مساوی بار خروجی است ($P_{WT} \leq P_L$)، بنابراین سیستم در مود کنترل توان عمل نموده و مبدل باک توربین-ژنراتور بادی



شکل ۱۸: تغییرات سرعت باد در حالت اول شبیه‌سازی.

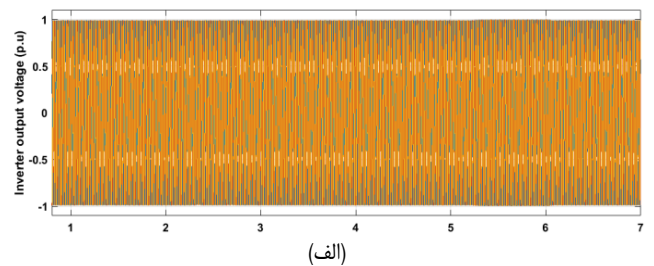


(الف)

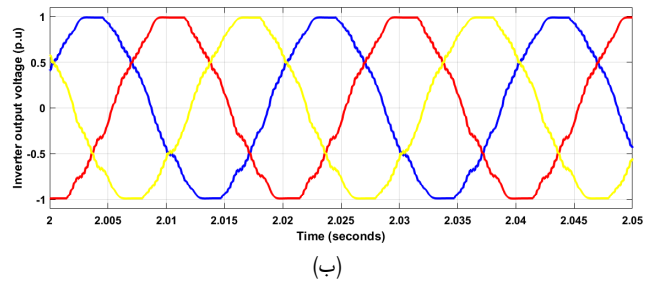


(ب)

شکل ۱۹: (الف) توان‌های خروجی میکروتوربین (قرمز) و توربین-ژنراتور بادی (آبی) و توان مصرفی بار (مشکی) و (ب) جریان مبدل باک میکروتوربین در حالت اول شبیه‌سازی.



(الف)

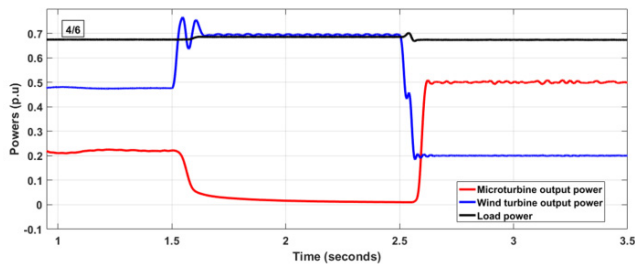


(ب)

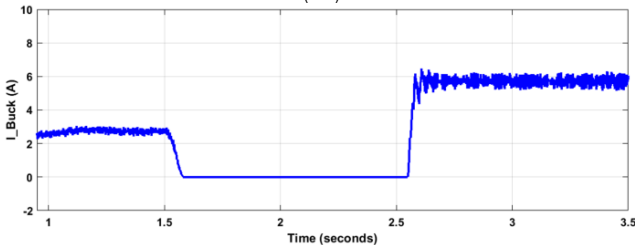
شکل ۲۰: (الف) ولتاژ خروجی اینورتر و (ب) ولتاژ خروجی اینورتر از ثانیه ۲ تا ۲.۰۵.

حالت ۱: بار نامی و سرعت باد متغیر

در این حالت، بار مصرفی در مقدار نامی خود یعنی ۱ pu ثابت در نظر گرفته شده و سرعت باد طبق شکل ۱۸ به صورت پله‌ای تغییر می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این حالت در شکل‌های ۱۹ تا ۲۵ آمده است. با توجه به شکل ۱۹، تا لحظه ۲ ثانیه که سرعت باد صفر است تمام توان مورد نیاز بار مصرفی توسط میکروتوربین تأمین می‌شود و توان خروجی توربین-ژنراتور بادی صفر است. از لحظه ۲ ثانیه به بعد باد شروع به وزیدن می‌نماید و توان خروجی توربین بادی مخالف صفر است. از آنجایی که در این حالت از شبیه‌سازی همواره توان خروجی توربین-



(الف)



(ب)

شکل ۲۷: (الف) توان‌های خروجی میکروتوربین (قرمز) و توربین- ژنراتور بادی (آبی) و توان مصرفی بار (مشکی) و (ب) جریان مبدل باک میکروتوربین در حالت دوم شبیه‌سازی.

از ثانیه ۲ به بعد همان طور که سهم میکروتوربین در تأمین توان مصرفی بار کم می‌شود، سرعت روتور آن نیز افزایش پیدا می‌کند. سرعت روتور توربین- ژنراتور بادی نیز با افزایش سرعت باد افزایش پیدا می‌کند ولی در مدت زمان ۵ تا ۶ ثانیه که سرعت باد از حد نامی تجاوز کرده است، کنترل زاویه گام فعال شده و مانع از افزایش بیش از حد مجاز سرعت روتور شده است.

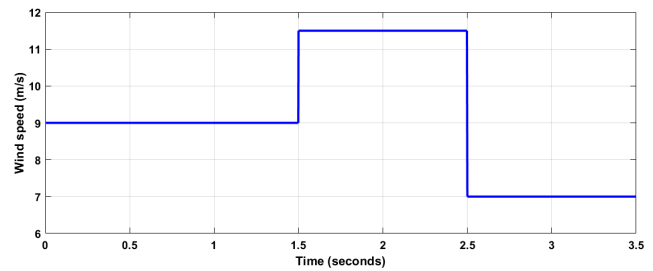
حالت ۲: کسری از بار نامی و سرعت باد متغیر

در حالت دوم نیز مشابه حالت قبلی بار مصرفی ثابت ولی مقدار آن کسری از مقدار نامی (0.68 pu) است. همچنین سرعت باد طبق شکل ۲۶ تغییر می‌کند و نتایج شبیه‌سازی در این حالت در شکل‌های ۲۷ تا ۳۳ نشان داده شده است.

شکل ۲۷- الف تغییرات توان‌های تولیدی توربین- ژنراتور بادی و سیستم میکروتوربین و توان مصرفی بار را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲۷- ب جریان مبدل باک میکروتوربین را نشان می‌دهد. تا ثانیه 1.5 ، سرعت باد در 9 m/s قرار دارد. در این سرعت باد، توربین- ژنراتور بادی در شرایط عادی خود یعنی مود کنترل توان به سر می‌برد و توان خروجی آن 0.48 pu است و بخشی از توان بار توسط میکروتوربین فراهم می‌شود. از ثانیه 1.5 تا 2.5 سرعت باد به مقدار نامی خود رسیده است. در این بازه زمانی توان تولیدی توربین بادی بیشتر از توان مصرفی بار است که باعث افزایش ولتاژ لینک DC در شکل ۳۰ می‌گردد. در نتیجه مود کنترلی مبدل باک توربین- ژنراتور بادی از مود کنترل توان به کنترل ولتاژ تغییر می‌کند. همچنین توان خروجی میکروتوربین با تغییر مقدار مرجع جریان مبدل باک به مقدار خیلی کمی می‌رسد.

از ثانیه 2.5 به بعد سرعت باد به 7 m/s کاهش پیدا کرده است. وظایف کنترلی مبدل‌های باک توربین بادی و میکروتوربین تغییر نموده و همانند بازه زمانی ابتدای شبیه‌سازی تا لحظه 1.5 ثانیه می‌شود. تنها تفاوت دو بازه زمانی مذکور این است که در بازه زمانی 2.5 ثانیه به بعد، سهم میکروتوربین در تغذیه بار بیشتر از توربین- ژنراتور بادی است.

شکل‌های ۲۸ و ۲۹ به ترتیب ولتاژ خروجی اینورتر و جریان بار را نشان می‌دهد. دامنه ولتاژ که در تمام مدت شبیه‌سازی در مقدار 1 pu ثابت مانده است و باعث می‌شود که بار مصرفی جریان مورد نیاز خود را



شکل ۲۶: تغییرات سرعت باد در حالت دوم شبیه‌سازی.

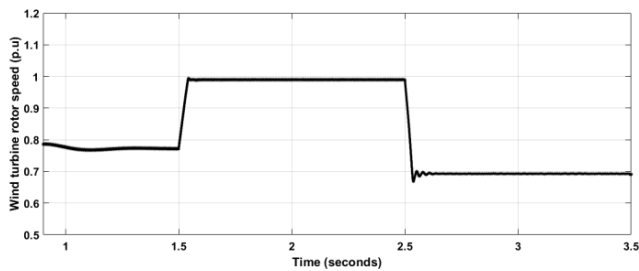
توان خروجی این منبع و مبدل باک میکروتوربین ولتاژ لینک DC را کنترل می‌کند.

بر اساس شکل ۱۹- الف، در بازه زمانی ۲ تا 3.5 ثانیه که سرعت باد کمتر از مقدار نامی آن یعنی 11.5 m/s است، توربین بادی در کسری از توان نامی خود (0.48 pu) عمل نموده و بخشی از توان مورد نیاز بار را تأمین می‌کند. از آنجایی که در این سیستم ترکیبی هر دو واحد تولیدی مکمل یکدیگر هستند، بنابراین مزاد توان مورد نیاز بار در این بازه توسط میکروتوربین فراهم می‌شود. در بازه زمانی 3.5 تا ۵ ثانیه و همچنین از لحظه ۶ ثانیه به بعد که سرعت باد برابر مقدار نامی (11.5 m/s) می‌شود، توان توربین بادی برابر 1 pu شده و عمده توان بار توسط این منبع تأمین می‌شود. از ثانیه ۵ تا ۶، سرعت باد به بیش از سرعت نامی افزایش یافته است و از این رو سیستم کنترل زاویه گام پره فعال شده و با تغییر زاویه پره، میزان توان دریافتی از باد را کاهش می‌دهد و توان خروجی منبع بادی را در مقدار مورد نظر 1 pu ثابت نگه می‌دارد. لازم به ذکر است که از لحظه 3.5 ثانیه به بعد با توجه به شکل ۱۹- الف و ۱۹- ب، توان خروجی میکروتوربین به مقدار ناچیز 0.04 pu می‌رسد و جریان مبدل باک میکروتوربین ناچیز است.

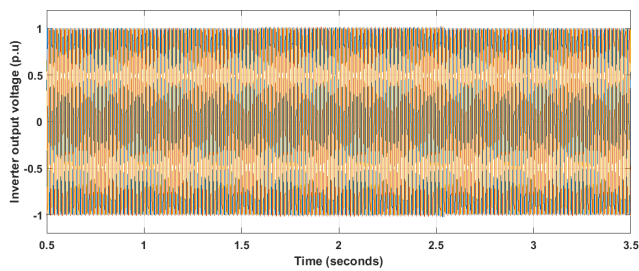
شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب ولتاژ خروجی اینورتر و جریان بار را بر حسب پریونیت نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، اینورتر کار خود را به درستی انجام داده و یک ولتاژ سه‌فاز سینوسی با دامنه ثابت 1 pu برای تغذیه بار فراهم کرده است. از آنجایی که بار مصرفی، مقاومتی در نظر گرفته شده، جریان نیز سه‌فاز سینوسی و هم‌فاز با ولتاژ است. طبق شکل ۲۲، ولتاژ لینک DC در تمام مدت شبیه‌سازی تقریباً ثابت می‌باشد و این بدان معناست که مبدل باک میکروتوربین وظیفه خود را که تثبیت ولتاژ لینک DC در مقدار مرجع (385 V) است به درستی انجام می‌دهد.

شکل ۲۳ ضریب بازدهی توان (C_p) توربین- ژنراتور بادی را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشخص است در بازه زمانی ۲ تا 3.5 ثانیه و از لحظه ۶ ثانیه به بعد، ضریب بازدهی همواره بهینه (برابر 0.48) است که این امر نشان‌دهنده عملکرد مبدل باک توربین- ژنراتور بادی در مود ردیابی توان بهینه (MPPT) است. همچنین در بازه زمانی ۵ تا ۶ ثانیه که سرعت باد بیش از مقدار نامی شده است و کنترل زاویه گام فعال می‌گردد، کارکرد در مود MPPT معنایی نداشته و سیستم کنترل زاویه گام با تغییر زاویه پره باعث می‌شود که توربین بادی از انرژی موجود باد فقط به میزان توان نامی ژنراتور استخراج کند و در این وضعیت C_p دیگر بهینه نخواهد بود.

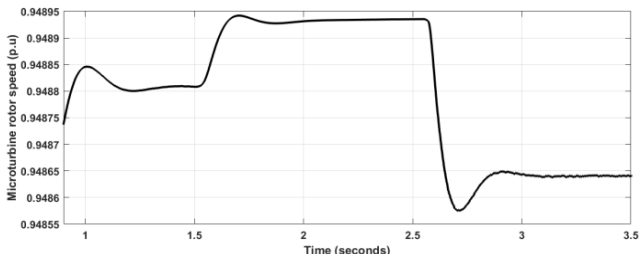
شکل‌های ۲۴ و ۲۵ به ترتیب سرعت‌های روتور توربین- ژنراتور بادی و میکروتوربین را بر حسب پریونیت نشان می‌دهد. سرعت روتور میکروتوربین تقریباً ثابت است و تغییرات بسیار ناچیزی دارد. تا ثانیه ۲ که فقط میکروتوربین در سیستم حضور دارد، سرعت روتور آن حداقل بوده و



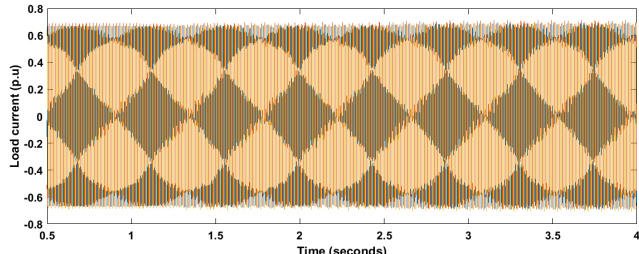
شکل ۳۲: سرعت روتور توربین- ژنراتور بادی در حالت دوم شبیه‌سازی.



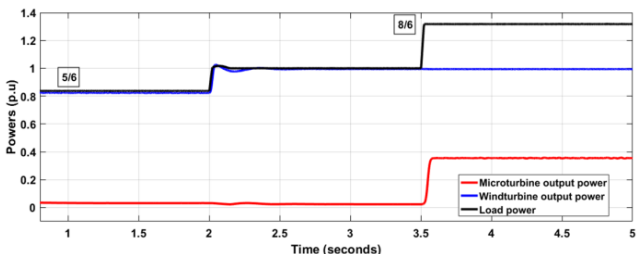
شکل ۲۸: ولتاژ خروجی اینورتر در حالت دوم شبیه‌سازی.



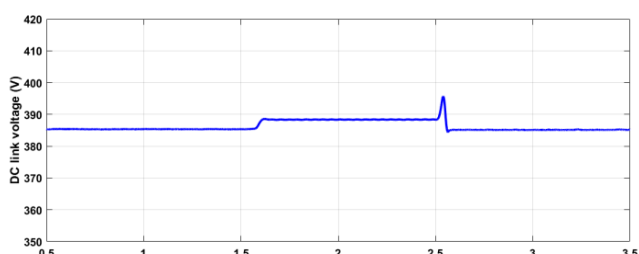
شکل ۳۳: سرعت روتور میکروتوربین در حالت دوم شبیه‌سازی.



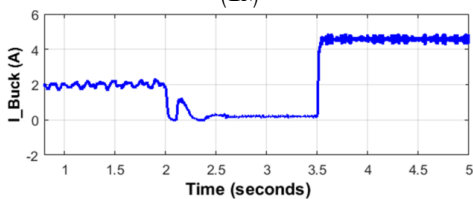
شکل ۲۹: جریان بار در حالت دوم شبیه‌سازی.



(الف)

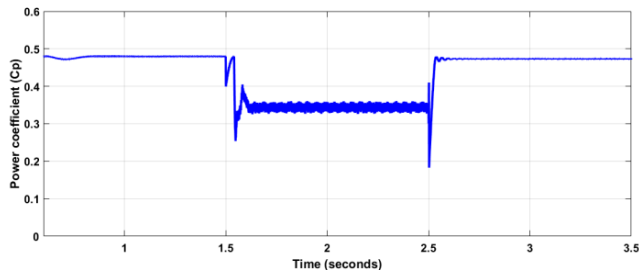


شکل ۳۰: ولتاژ لینک DC در حالت دوم شبیه‌سازی.



(ب)

شکل ۳۴: توان‌های خروجی میکروتوربین (قرمز) و توربین- ژنراتور بادی (آبی) و توان مصرفی بار (مشکی) و (ب) جریان مبدل باک میکروتوربین در حالت سوم شبیه‌سازی.



شکل ۳۱: ضریب بازدهی توان (C_p) توربین- ژنراتور بادی در حالت دوم شبیه‌سازی.

حالت ۳: بار متغیر و سرعت باد نامی

در حالت سوم، بر خلاف دو حالت قبلی، در طول مدت زمان شبیه‌سازی سرعت باد در مقدار نامی ($11/5$ m/s) ثابت در نظر گرفته شده و این توان مصرفی بار است که تغییر پیدا می‌کند. شکل ۳۴-الف نمودار تغییرات توان مصرفی بار را به همراه تغییرات توان‌های خروجی میکروتوربین و توربین- ژنراتور بادی بر حسب پریونیت نشان می‌دهد. همچنین شکل ۳۴-ب جریان مبدل باک میکروتوربین را نشان می‌دهد.

از ابتدای شبیه‌سازی تا لحظه $2/5$ ثانیه توان بار کمتر از توان خروجی توربین بادی است ($P_{WT} > P_L$). بنابراین چون توان خروجی منبع بادی بر مصرف غالب است، توربین- ژنراتور بادی ولتاژ لینک DC را کنترل می‌کند. همچنین در این مدت توان تولیدی میکروتوربین بسیار کم و در حدود 0.104 pu است.

از لحظه $2/5$ ثانیه به بعد توان مصرفی بار بزرگ‌تر و یا مساوی توان توربین بادی است ($P_{WT} \leq P_L$). در نتیجه مبدل باک توربین- ژنراتور بادی در این بازه زمانی از مود کنترل ولتاژ به مود کنترل توان تغییر وضعیت می‌دهد. همچنین در این بازه میکروتوربین وظیفه کنترل ولتاژ

که در این حالت 0.67 pu است از سیستم دریافت کند. شکل ۳۰ بیانگر ولتاژ لینک DC است و طبق آن ولتاژ لینک DC در طول مدت شبیه‌سازی در مقدار مرجع خود (385 V) تقریباً ثابت مانده و تنها در لحظات تغییر مود کنترلی تغییر می‌کند. شکل ۳۱ ضریب بازدهی توان (C_p) را نشان می‌دهد که فقط در بازه زمانی $1/5$ تا $2/5$ ثانیه که مبدل باک توربین- ژنراتور بادی در مود کنترل ولتاژ است مقدار پهنه‌ای ندارد و در بقیه زمان‌ها که مبدل در مود کنترل توان است، C_p در مقدار بهینه خود قرار گرفته است.

شکل‌های ۳۲ و ۳۳ به ترتیب سرعت‌های روتور توربین- ژنراتور بادی و میکروتوربین را بر حسب پریونیت نشان می‌دهد. در بازه زمانی $1/5$ تا $2/5$ ثانیه که $P_{WT} > P_L$ می‌باشد سرعت توربین- ژنراتور بادی افزایش یافته است. همچنین تغییر وظیفه مود کنترلی مبدل باک توربین- ژنراتور بادی باعث می‌شود که سرعت روتور در حداکثر مقدار مجاز یعنی 1 pu ثابت بماند. در همین بازه زمانی با آن که میکروتوربین تولید چشم‌گیری ندارد، سرعت آن نسبت به قبل به مقدار خیلی کمی تغییر می‌کند.

جدول پ-۱: پارامترهای مکانیکی و الکتریکی سیستم تحت مطالعه.

مقدار پارامتر	نام سیستم
$\omega_{nom} = 7000 \text{ rpm}$, $P_{nom} = 6 \text{ kW}$	میکروتوربین
$R_s = 425 \text{ m}\Omega$ $L_d = L_q = 0.395 \text{ mH}$ $\Psi_f = 0.7 \text{ wb}$	ژنراتور PMSG میکروتوربین
$P = 4$, $J = 0.11 \text{ kg.m}^2$	توربین بادی
$P_{nom} = 6 \text{ kW}$, $Blade \text{ area} = 1.06 \text{ m}^2$ $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $V_{w,nom} = 11.5 \text{ m/s}$ $K_{opt} = 1.67 \times 10^{-7} \text{ N.m/(rad/s}^2)$	ژنراتور PMSG توربین بادی
$R_s = 425 \text{ m}\Omega$ $L_d = L_q = 8.4 \text{ mH}$ $\Psi_f = 0.433 \text{ wb}$	مبدل باک
$P = 10$, $J = 0.12 \text{ kg.m}^2$ $R_b = 15 \text{ m}\Omega$, $L_b = 12 \text{ mH}$ $C_b = 1 \text{ mF}$	فیلتر LC
$R_f = 7 \text{ m}\Omega$, $L_f = 4.6 \text{ mH}$ $C_f = 9 \text{ }\mu\text{F}$	

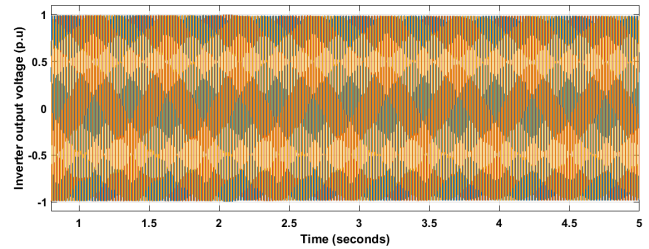
تولیدی منبع بادی، دو مود کنترلی تعریف شد. در مود کنترل توان، توان خروجی منبع بادی از توان مورد نیاز بار کمتر بوده و لذا بخشی از توان بار توسط میکروتوربین تأمین می‌شود. در مود مذکور، توربین-ژنراتور بادی حداکثر توان دریافتی از باد را به سیستم تزریق می‌کند. در مود کنترل ولتاژ، توان بار تنها توسط توربین ژنراتور بادی فراهم می‌شود و زاویه گام پره فعال می‌گردد. همچنین در ادامه حلقه‌های کنترلی مربوط به مبدل‌های الکترونیک قدرت سیستم، یعنی اینورتر سمت بار و مبدل‌های باک توربین-ژنراتور بادی و میکروتوربین استخراج گردید. سپس روشی جهت طراحی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی این مبدل‌ها مطرح شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد که روش مدیریت توان سیستم تحت مطالعه با تغییر مود کنترلی منابع در شرایط تغییر توان بار الکتریکی و یا تغییر سرعت باد، عملکرد پایدار و قابل قبولی را فراهم می‌آورد.

پیوست

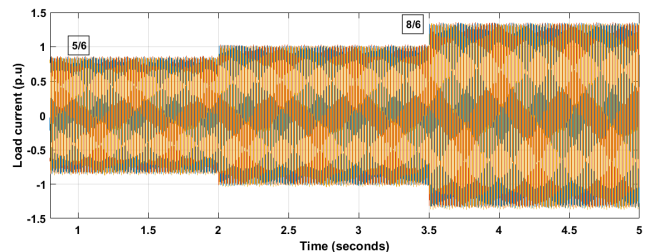
پارامترهای مکانیکی و الکتریکی سیستم تحت مطالعه در جدول پ-۱ آمده است.

مراجع

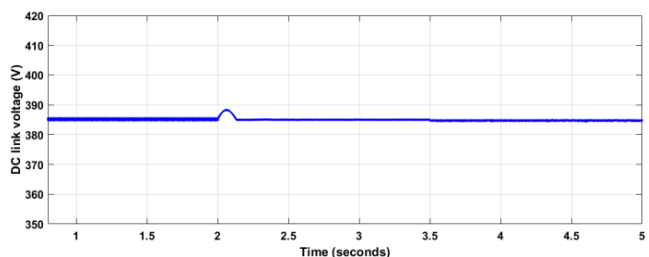
- [1] M. H. Nehrir, C. Wang, and S. R. Guda, "Alternative Energy Distributed Generation: Need for Multi-Source Operation," in *Proc. 38th North American Power Symp.*, pp. 547-551, Carbondale, IL, USA, 17-19 Sept. 2006.
- [2] M. R. Hamouda, M. I. Marei, and M. A. Badr, "A microturbine interface system with LVRT capability," in *Proc. Australasian Universities Power Engineering Conf. AUPEC'14*, 6 pp., Perth, WA, Australia, 28 Sept.-1 Oct. 2014.
- [3] H. Keshtkar, J. Solanki, and S. K. Solanki, "Dynamic modeling, control and stability analysis of microturbine in a microgrid," in *Proc. 2014 IEEE PES T&D Conf. and Expo.*, 9 pp., Chicago, IL, USA, 14-17 Apr. 2014.
- [4] A. Jain, B. P. Singh, S. Bhullar, and M. K. Verma, "Performance of hybrid wind-microturbine generation system in isolated mode," in *Proc. Int. Conf. on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems, ICETESES'16*, pp. 64-70, Sultanpur, India, 11-12 Mar. 2016.
- [5] X. Yu, Z. Jiang, and A. Abbasi, "Dynamic modeling and control design of microturbine distributed generation systems," in *Proc. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf.*, pp. 1239-1243, Miami, FL, USA, 3-6 May. 2009.



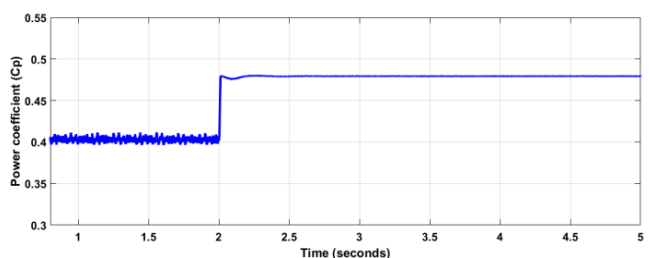
شکل ۳۵: ولتاژ خروجی اینورتر در حالت سوم شبیه‌سازی.



شکل ۳۶: جریان بار در حالت سوم شبیه‌سازی.



شکل ۳۷: ولتاژ لینک DC در حالت سوم شبیه‌سازی.



شکل ۳۸: ضریب بازدهی توان (C_p) توربین-ژنراتور بادی در حالت سوم شبیه‌سازی.

لینک DC را خواهد داشت و کمبود توان مورد نیاز بار مصرفی را جبران خواهد کرد.

لازم به ذکر است که در بازه ۲ تا ۳/۵ ثانیه اختلاف بین توان تولیدی توربین بادی و توان مورد نیاز بار کم بوده و از این رو در این بازه نیز توان تولیدی میکروتوربین بسیار ناچیز خواهد بود. شکل‌های ۳۵ تا ۳۸ به ترتیب ولتاژ خروجی اینورتر، جریان بار، ولتاژ لینک DC و ضریب بازدهی توان (C_p) توربین-ژنراتور بادی را نشان می‌دهد. تا لحظه ۲ ثانیه که توان دریافتی از باد بیشتر از توان مورد نیاز بار خروجی بوده و کنترل زاویه گام فعال است، ضریب بازدهی توان، بهینه نیست. از لحظه ۲ ثانیه به بعد توربین-ژنراتور بادی در توان نامی خود یعنی ۱ pu کار می‌کند، لذا ضریب بازدهی توان در مقدار بهینه خود قرار می‌گیرد. همچنین در کل بازه شبیه‌سازی ولتاژ لینک DC تقریباً ثابت است.

۷- نتیجه گیری

کنترل و مدیریت توان یک سیستم ترکیبی متشکل از میکروتوربین و توربین-ژنراتور بادی در حال جدا از شبکه و تغذیه بار مستقل در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به میزان توان مورد نیاز بار و میزان انرژی

- Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 1144-1154, 2012.
- [26] A. Labella, "Power Management Analysis in PV-BESS Islanded AC Microgrid," in *Proc. 11th Int. Symp. on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE'19*, 6 pp., Bucharest, Romania, 28-30 Mar. 2019.
- [27] C. R. Aguiar, G. F. Fuzato, R. Q. Q. Machado, and J. M. Guerrero, "An adaptive power sharing control for management of DC microgrids powered by fuel cell and storage system," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, pp. 1-1, 2019.
- [28] R. R. Deshmukh, M. Ballal, H. M. Suryawanshi, and M. K. Mishra, "An Adaptive Approach for Effective Power Management in DC Microgrid Based on Virtual Generation in Distributed Energy Sources," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, pp. 1-1, 2019.
- [29] G. Liu, T. Caldognetto, P. Mattavelli, and P. Magnone, "Power sharing analysis of power-based droop control for DC microgrids considering cable impedances," in *Proc. 19th European Conf. on Power Electronics and Applications*, pp. 10 pp., Warsaw, Poland, 11-14 Sept. 2017.
- [30] Z. Jin, J. M. Guerrero, and M. Li, "An alternative realization of droop control and virtual impedance for paralleled converters in DC microgrid," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE'18*, pp. 3765-3770, Portland, OR, USA, 23-27 Sept. 2018.
- [31] K. J. Bunker and W. W. Weaver, "Multidimensional droop control for wind resources in dc microgrids," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 3, pp. 657-664, 16 Feb. 2017.
- [32] Y. Xia, M. Yu, P. Yang, Y. Peng, and W. Wei, "Generation-storage coordination for islanded DC microgrids dominated by PV generators," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp. 130-138, Jul. 2018.
- [33] K. Sun, L. Zhang, Y. Xing, and J. M. Guerrero, "A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 10, pp. 3032-3045, Mar. 2011.
- [34] M. Soliman, A. K. Puppala, and M. Safiuddin, "Dynamic analysis of microturbine/fuel cell for peak power shaving," in *Proc. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 13-19, Montreal, QC, Canada, 18-22 Jun. 2006.
- [35] C. N. Bhende, S. Mishra, and S. G. Malla, "Permanent magnet synchronous generator-based standalone wind energy supply system," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 361-373, Jun. 2011.
- [36] X. Kong, X. Liu, L. Ma, and K. Y. Lee, "Hierarchical distributed model predictive control of standalone wind/solar/battery power system," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 49, no. 8, pp. 1570-1581, 4 Mar. 2019.
- [37] S. Guda, Modeling and Power Management of a Hybrid Wind-Microturbine Power Generation System, MSc Thesis, the Montana State University, Jul. 2005.
- [38] M. D. Amin, Dynamic Modeling and Stability Study of Microturbine with PMSG in Distributed Generation, MSc Thesis, the Islamic University of Technology-Bangladesh, May 2016.
- [39] W. Włodarski, "Experimental investigations and simulations of the microturbine unit with permanent magnet generator," *Energy*, vol. 158, pp. 59-71, Sept. 2018.
- [40] W. Włodarski, "Control of a vapour microturbine set in cogeneration applications," *ISA Trans.*, vol. 94, pp. 276-293, 1 Nov. 2019.
- [41] Z. Xu, Y. Lu, B. Wang, L. Zhao, C. Chen, and Y. Xiao, "Experimental evaluation of 100 kW grade micro humid air turbine cycles converted from a microturbine," *Energy*, vol. 175, pp. 687-693, 15 May 2019.
- [42] M. Rahimi, "Modeling, control and stability analysis of grid connected PMSG based wind turbine assisted with diode rectifier and boost converter," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 93, no. 93, pp. 84-96, 1 Dec. 2017.
- [43] A. H. Azizi and M. Rahimi, "Dynamic performance analysis, stability margin improvement and transfer power capability enhancement in DFIG based wind turbines at weak ac grid conditions," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 99, pp. 434-446, Jul. 2018.
- [44] A. L. S. Barbosa, P. R. Barros, and G. Acioli Junior, "Identification and PI controller redesign in symmetrical optimum based design," in *Proc. IEEE Conf. on Control Applications, CCA'14*, , vol. pp. 421-426, 8-10 Oct. 2014..
- [45] F. Wang and X. Ma, "Fractional order Buck-Boost converter in CCM: modelling, analysis and simulations," *International J. of Electronics*, vol. 101, no. 12, pp. 1671-1682, Feb. 2014.
- [46] S. R. Hebertt and S. O. Ramon, *Control Design Techniques in Power Electronics Devices*, 1st Ed. London: Springer-Verlag London, 2006.
- [6] S. K. Nayak and D. N. Gaonkar, "Modeling and performance analysis of hybrid fuel cell and microturbine based distributed generation system: A review," in *Proc. Int. Conf. on Power, Energy and Control, ICPEC*, pp. 760-766, Dindigul, India, 6-8 Feb. 2013.
- [7] Y. Lee, Y. Chang, C. Chan, and Y. Ho, "Preliminary implementation of microgrid with photovoltaic and microturbine for stand alone operation," in *Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 9 pp., Las Vegas, NV, USA, 7-11 Oct. 2012.
- [8] L. Chalal, J.-Y. Dieulot, G. Dauphin-Tanguy, and F. Colas, "Supervisory predictive control of a hybrid solar panels, microturbine and battery power generation plant," *IFAC Proceedings*, vol. 45, no. 21, pp. 375-380, 2012.
- [9] M. Kalantar and S. M. Mousavi G, "Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage," *Applied Energy*, vol. 87, no. 10, pp. 3051-3064, 2010.
- [10] M. Abdel-Gelil, I. F. Zidane, M. Anany, and S. F. Rezek, "Modeling and simulation of a hybrid power generation system of wind turbine, micro-turbine and solar heater cells," in *Proc. 11th IEEE Int. Conf. on Control & Automation, ICCA'14*, pp. 1304-1309, Taichung, Taiwan, 18-20 Jun. 2014.
- [11] C. Wang, J. Li, C. M. Colson, and M. H. Nehrir, "Power management of a stand-alone hybrid wind-microturbine distributed generation system," in *2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*, 7 pp., Lincoln, NE, USA, 24-26 Jun. 2009.
- [12] C. M. Colson, C. Wang, M. H. Nehrir, S. R. Guda, and J. Li, "Stand-alone Hybrid Wind-Microturbine Distributed Generation System: A Case Study," in *Proc. 39th North American Power Symp.*, pp. 337-341, Las Cruces, NM, USA, 30 Sept.-2 Oct. 2007..
- [13] S. M. Mousavi G, "An autonomous hybrid energy system of wind/tidal/microturbine/battery storage," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 1144-1154, 2012.
- [14] S. Baudoin, I. Vechiu, H. Camblong, J.-M. Vinassa, and L. Barelli, "Sizing and control of a Solid Oxide Fuel Cell/Gas microTurbine hybrid power system using a unique inverter for rural microgrid integration," *Applied Energy*, vol. 176, pp. 272-281, 2016.
- [15] F. Jurado, "Robust control for fuel cell-microturbine hybrid power plant using biomass," *Energy*, vol. 30, no. 10, pp. 1711-1727, 2005.
- [16] A. Al-Hinai, K. Sedhisigarchi, and A. Feliachi, "Stability enhancement of a distribution network comprising a fuel cell and a microturbine," in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004, vol. 2, pp. 2156-2161, Denver, CO, USA, 6-10 Jun. 2004.
- [17] M. Soliman, M. M. R. Ahmed, and M. Safiuddin, "Modeling of Fuel Cell/microturbine generation scheme with battery storage," in *Proc. IEEE Electrical Power & Energy Conf.*, 6 pp., Halifax, NS, Canada, 25-27 Aug. 2010.
- [18] H. Wang and G. Li, "Dynamic performance of microturbine and fuel cell in a microgrid," in *Proc. Int Conf. on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, MEC'11*, pp. 122-125, 2011.
- [19] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. d. Vicuna, and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, 12 Aug. 2010.
- [20] L. Chalal, J. -Y. Dieulot, G. Dauphin-Tanguy, and F. Colas, "Supervisory predictive control of a hybrid solar panels, microturbine and battery power generation plant," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 21, pp. 375-380, 2012.
- [21] M. Kalantar and S. M. Mousavi G, "Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage," *Applied Energy*, vol. 87, no. 10, pp. 3051-3064, 2010.
- [22] J. M. Carrasco et al., "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1002-1016, 7 Aug. 2006.
- [23] A. Mamen and U. Supatti, "A survey of hybrid energy storage systems applied for intermittent renewable energy systems," in *Proc. 14th Int. Conf. on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON'17*, pp. 729-732, Phuket, Thailand, 27-30 Jun. 2017.
- [24] C. M. Colson, C. Wang, M. H. Nehrir, S. R. Guda, and J. Li, "Stand-alone Hybrid Wind-Microturbine Distributed Generation System: A Case Study," in *Proc. 39th North American Power Symp.*, pp. 337-341, 2007.
- [25] S. M. Mousavi G, "An autonomous hybrid energy system of wind/tidal/microturbine/battery storage," *International J. of*

محسن رحیمی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق در سال ۱۳۸۰ از دانشگاه صنعتی اصفهان و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۹ از دانشگاه صنعتی شریف به پایان رسانیده و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان می‌باشد. زمینه‌های مورد علاقه ایشان شامل الکترونیک قدرت و کنترل ماشین‌های الکتریکی، مدل‌سازی، کنترل و تحلیل پایداری انرژی‌های تجدیدپذیر (شامل انرژی‌های بادی و خورشیدی)، مدل‌سازی و کنترل ریز شبکه‌های DC و AC و کنترل و تحلیل مسائل دینامیکی ماشین‌های الکتریکی می‌باشد.

اللهیار اخباری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق- قدرت در دانشگاه کاشان در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۴ به پایان رسانده است. نامبرده در حال حاضر در مقطع دکتری مهندسی برق- قدرت در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان مشغول به تحصیل است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل الکترونیک قدرت، انرژی‌های نو و بررسی و تحلیل پایداری و دینامیک سیستم‌های قدرت می‌باشد.

- [47] M. E. Haque, K. M. Muttaqi, and M. Negnevitsky, "Control of a stand-alone variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 9 pp., Pittsburgh, PA, USA, 20-24 Jul. 2008.
- [48] C. Busca, A. Stan, T. Stanciu, and D. I. Stroe, "Control of permanent magnet synchronous generator for large wind turbines," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics*, pp. pp. 3871-3876, Bari, Italy, 4-7 Jul. 2010.

احمد رضا عطاپور تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی رشته مهندسی برق در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه آزاد اسلامی نجف‌آباد و در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه کاشان به پایان رسانید. زمینه‌های مورد علاقه ایشان شامل الکترونیک قدرت و مدل‌سازی و کنترل انرژی‌های تجدیدپذیر و توربین‌های بادی می‌باشد.