طراحی سیستم کنترل و تحلیل عملکرد گذر از خطای سیستم تولید میکروتوربین متصل به شبکه

اللهیار اخباری[۱] محسن رحیمی[۲] احمدرضا عطاپور[۳]

۱- دانش آموخته دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان، ایران
allahyar_akhbari@yahoo.com

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان، ایران
mrahimi@kashanu.ac.ir

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان - کاشان، ایران
ra_atapoor@yahoo.com

چکیده: **در سال‌های اخیر، سیستم تولید میکروتوربین به عنوان یکی از منابع تولید پراکنده مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این مقاله به بررسی نحوه‌ی کنترل یک میکروتوربین و تحلیل عملکرد آن در حالت متصل به شبکه پرداخته می‌شود. در این راستا مدل مکانیکی میکروتوربین بررسی می‌گردد. سپس ساختار الکتریکی میکروتوربین که شامل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم و مبدل‌های الکترونیک قدرت است، معرفی می‌شود. مبدل‌های الکترونیک قدرت واسط بین ژنراتور و لینک DC شامل اتصال سری یکسوساز پل سه فاز دیودی و مبدل باک است که به عنوان مبدل سمت ژنراتور شناخته می‌شوند. همچنین بین لینک DC و شبکه، اینورتر منبع ولتاژ قرار گرفته است که مبدل سمت شبکه نامیده می‌شود. به عنوان نوآوری، دو روش کنترلی برای مبدل‌های سمت ژنراتور و شبکه تعریف و سپس ساختار کنترلی مبدل‌ها در این دو روش ارائه می‌گردد. در پایان، عملکرد روش‌های کنترلی تحت سناریوهای کاری مختلف از طریق شبیه‌سازی زمانی مقایسه می‌گردد.**

واژه‌های کلیدی: **سیستم تولید میکروتوربین، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، مدل متوسط مبدل باک، اینورتر منبع ولتاژ، قابلیت گذر از خطا**

نوع مقاله: **پژوهشی**

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۴
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محسن رحیمی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – کاشان – کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی– دانشگاه کاشان – دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]

۱- مقدمه

میکروتوربین‌ها توربین‌های گازی کوچکی هستند که با سوزاندن سوخت‌های مایع یا گازی یک ژنراتور الکتریکی را به حرکت در می‌آورند. رنج توان میکروتوربین‌ها بین ۳۰ kW تا ۴۰۰kW می‌باشد؛ درحالی که رنج توان توربین‌های گازی معمولی از ۵۰۰ kW تا بیش از ۳۰۰ MW است. این منابع تولید توان دارای مزایای متعددی هستند که از جمله آنها می‌توان به راه اندازی سریع به ویژه به منظور پشتیبانی از شبکه قدرت در شرایط بارگذاری حداکثر، اشاره کرد. همچنین میکروتوربین‌ها در مقایسه با دیزل-ژنراتورها، گازهای گلخانه-ای کمتری تولید می‌کنند به طوری که میزان تولید گازهای گلخانه ای آنها تقریباً یک هشتم دیزل-ژنراتورها است. [۵-۱].

تاکنون مقالات متعددی درباره کنترل و استفاده از میکروتوربین‌ها به عنوان یک منبع تولید پراکنده منتشرشده‌است که در ادامه به برخی از این مقالات اشاره می‌شود. مقالات [۱۳-۶] به مدل‌سازی، کنترل و شبیه سازی میکروتوربین در حالات متصل به شبکه و تغذیه بار تنها می‌پردازند. در مرجع [۶] بر روی تعیین بهینه پارامترهای کنترلی سیستم گاورنر میکروتوربین تمرکز شده تا بدین ترتیب مصرف سوخت کاهش یافته و ژنراتور سنکرون متصل به توربین پاسخ‌های گذرای آرام تری داشته باشد. مرجع [۷] طرح کنترلی جدیدی را ارائه می‌دهد تا سیستم کنترلی میکروتوربین بین دو حالت متصل به شبکه و تغذیه بار تنها به طور خودکار سوئیچ کند. در روش پیشنهادی زمان تغییر حالت کنترلی از طریق زاویه فاز تخمینی توسط حلقه قفل شونده فاز (PLL) تعیین می‌شود. مراجع [۸] و [۹] یک مدل دینامیکی برای شبیه سازی و بررسی عملکرد میکروتوربین معرفی می‌کنند. بررسی و بهبود عملکرد میکروتوربین در حالت گذار و در صورت وقوع اغتشاشاتی همچون کاهش و افزایش ولتاژ شبکه و وقوع عدم تعادل ولتاژ در مراجع [۱۶-۱۴] مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۳۶] پیشنهاد می‌شود که از یک مبدل ماتریسی منبع-Z برای اتصال میکروتوربین به شبکه یا بار الکتریکی استفاده شود. علت پیشنهاد این مبدل، حذف خازن با ظرفیت بالا از لینک DC و راه اندازی اولیه راحت تر میکروتوربین در حالت‌های متصل به شبکه و جدا از آن ذکر شده است. طراحی فیلتر خروجی هیبریدی و پیاده‌سازی کنترل افتی برای یک میکروتوربین در حالت متصل به شبکه موضوعاتی هستند که به ترتیب در [۲۷] و [۲۸] بیان شده اند.

در دسته ای دیگر از مقالات مرتبط با میکروتوربین‌ها از کنترل پیش-بین و روش منطق فازی جهت بهبود عملکرد کنترلی این منابع استفاده‌شده‌است. در مرجع [۱۷] پیشنهاد شده که در حلقه کنترل ولتاژ باس DC به جای استفاده از کنترل‌کننده PI، از روش کنترل پیش‌بین تطبیقی استفاده گردد. در مرجع [۱۸] به این مطلب اشاره می‌شود که بخش مکانیکی میکروتوربین دارای رفتاری کاملاً غیرخطی است و این سیستم تحت تاثیر اغتشاشات مختلفی مانند تغییرات توان خروجی، تغییر فشار کاری و تغییر دمای محیط قرار دارد؛ لذا در این مرجع پیشنهاد شده از کنترل پیش بین برای کنترل مناسب قسمت مکانیکی استفاده شود. در مرجع [۱۹] به جای به‌کارگیری کنترل‌کننده خطی پیش فاز-پس فاز از روش منطق فازی در سیستم کنترلی گاورنر میکروتوربین استفاده شود. زیرا با روش پیشنهادی سیستم کنترلی میکروتوربین در شرایط تغییر بار خروجی دارای حالت‌های گذاری کوتاه تری است و به علاوه نسبت به وقوع اغتشاشات عملکردی مقاوم تر خواهد داشت.

کنترل و مدیریت توان یک ریزشبکه هیبریدی متشکل از میکروتوربین، باتری و انرژی‌های تجدیدپذیر مثل پیل‌های سوختی، انرژی بادی و خورشیدی در مقالات [۲۶-۲۰] مطرح‌شده‌است. در این دسته از مقالات میکروتوربین نقش منبع تولید پشتیبان ریزشبکه در حالت جزیره ای را دارد و میزان تولید آن بسته به میزان بارگذاری ریزشبکه و میزان تولید منابع انرژی‌های تجدیدپذیر تغییر می‌کند.

بررسی مقالات ذکر شده در پاراگرف‌های پیشین نشان می‌دهد که در اغلب آنها از ترکیب یکسوکننده پل دیودی و اینورتر منبع ولتاژ جهت اتصال میکروتوربین به شبکه قدرت و یا بار الکتریکی استفاده می‌شود اما در این مقاله از ساختار دیگری متشکل از یک یکسوکننده سه فاز دیودی، مبدل کاهنده باک و اینورتر منبع ولتاژ استفاده‌شده‌است. با این ترکیب از مبدل‌های الکترونیک قدرت امکان کنترل همزمان ولتاژ باس DC، توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه وجود دارد. البته کنترل ولتاژ باس DC و توان اکتیو تزریقی به شبکه در ساختار پیشنهادی با دو طرح یا روش کنترلی قابل پیاده سازی است. لذا در این مقاله تلاش می‌شود که این دو روش تحت اغتشاشات مختلف شبکه خصوصاً در شرایط وقوع اتصال کوتاه مورد آزمون قرار گیرد و روش کنترلی برتر مشخص گردد.

ساختار این مقاله به این ترتیب است که ابتدا دو روش کنترلی برای مبدل باک و مبدل سمت شبکه تعریف و سپس ساختار کنترلی مبدل‌ها در این دو روش ارائه می‌گردد. در ادامه حلقه‌های کنترلی متناظر، استخراج و سپس کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی مربوطه طراحی می‌شود. در انتها با استفاده از شبیه‌سازی مدل سیستم در نرم‌افزار MATLAB، عملکرد سیستم در هر دو روش کنترلی تحلیل، ارزیابی و مقایسه می‌گردد.

۲- ساختار مکانیکی- الکتریکی میکروتوربین و نحوه عملکرد آنها

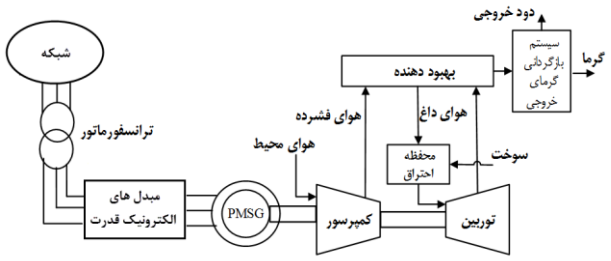
شکل (۱) ساختار کلی سیستم میکروتوربین را نشان می‌دهد. اجزاء اصلی تشکیل دهنده قسمت مکانیکی یک سیستم تولید میکروتوربین عبارت است از: کمپرسور، توربین، بهبوددهنده و ژنراتور سرعت بالا، که در ادامه عملکرد هر قسمت به طور خلاصه شرح داده می‌شود.

میکروتوربین‌ها نیز مشابه توربین‌های گازی بزرگ بر اساس سیکل ترمودینامیکی برایتون[1] کار می‌کنند. در این سیکل، هوای محیط پس

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]

از ورود به کمپرسور فشرده شده و در محفظه احتراق با سوخت ترکیب می‌شود و می‌سوزد؛ گاز داغ حاصل از سوخت در توربین منبسط می‌گردد و توان مکانیکی چرخشی ایجاد می‌کند. سپس این توان مکانیکی به کمپرسور و ژنراتور انتقال می‌یابد [۲۹]. در میکروتوربین، هوای فشرده ایجاد شده توسط کمپرسور، به یک مبدل حرارت گاز وارد می‌شود که به آن، بهبود دهنده می‌گویند. در بهبود دهنده، هوای فشرده قبل از ورود به محفظه احتراق، توسط گازهای داغ خروجی توربین گرم می‌شود؛ لذا این امر باعث کاهش سوخت مورد نیاز در فرآیند احتراق و افزایش بازدهی می‌گردد [۲۹]. از آنجایی که بحث اصلی، مدل‌سازی رفتار الکترومکانیکی میکروتوربین است، بهبوددهنده که فقط برای افزایش بازدهی توربین به کار گرفته می‌شود معمولاً در مدل‌سازی گنجانده نمی‌شود.

عمدتاً دو نوع سیستم میکروتوربین به کار گرفته می‌شود که عبارتند از مدل تک شفت و مدل دوشفت. در طراحی تک شفت، توربین-کمپرسور و ژنراتور هر دو روی یک شفت مشترک قرار می‌گیرند که درنتیجه سرعت میکروتوربین بسیار بالا می‌رود (در برخی موارد بیش از ۱۰۰۰۰۰rpm) و به تولید برق با فرکانس بالا (در حد چند کیلوهرتز) می‌انجامد. در مدل دوشفت، یک توربین برای چرخش کمپرسور روی یک شفت قرار می‌گیرد و یک توربین قدرت نیز روی یک شفت جداگانه از طریق جعبه دنده به ژنراتور متصل می‌گردد که منجر به تولید توان ac با فرکانس ۵۰Hz یا ۶۰Hz می‌شود. از آنجایی که در نوع تک شفت فرکانس ولتاژ خروجی بسیار بالا است، برای اتصال میکروتوربین به شبکه الزاماً نیاز به ادوات الکترونیک قدرت خواهد بود؛ در حالی که در مدل دوشفت نیازی به اتصالات الکترونیک قدرت نیست [۴]. لازم به ذکر است که در این مقاله مدل تک شفت درنظر گرفته شده است.

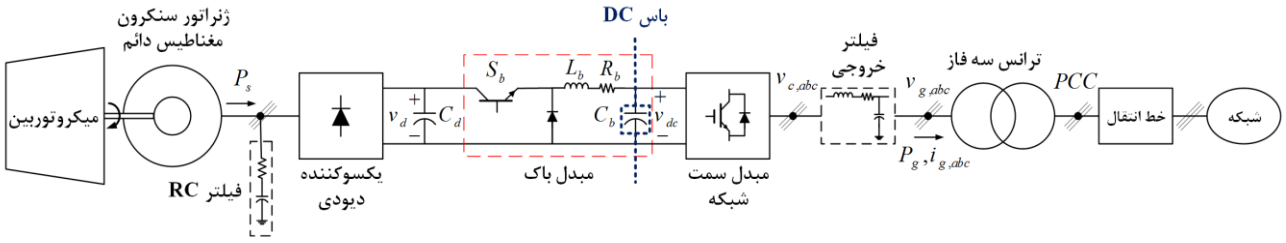


شکل (۱): ساختار سیستم میکروتوربین

شکل (۲) ساختار سیستم الکتریکی میکروتوربین تحت مطالعه را نشان می‌دهد. طبق شکل در این سیستم از یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده است. همچنین با توجه به توضیحات پاراگراف قبل، به واسطه در نظرگرفتن مدل تک شفت برای میکروتوربین، لازم است که ژنراتور از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه وصل گردد تا بدین ترتیب توان ac فرکانس بالای تولید شده توسط ژنراتور سنکرون، به توان مطلوب و قابل استفاده تبدیل شود. مبدل‌های الکترونیک قدرت این سیستم، شامل یک یکسوساز دیودی شش پالسه متصل به ژنراتور، یک اینورتر منبع ولتاژ PWM متصل به شبکه و یک مبدل باک است که بین یکسوساز و اینورتر قرار دارد.

۳- مدل بخش مکانیکی میکروتوربین

برای توربین گازی مدل‌های مختلفی وجود دارد که هر مدل بسته به کاربرد مورد نظر، پیچیدگی‌های خاص خودش را دارد.



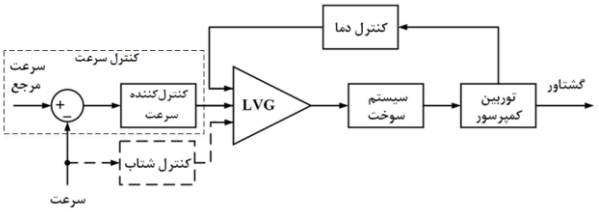
شکل (۲): ساختار سیستم الکتریکی میکروتوربین

سیستم توربین گازی که در شکل (۳) آورده شده اولین بار توسط آقای راون[۲] ارائه‌شده‌است. ایشان مدل توربین-ژنراتور گازی تک شفت را که شامل کنترل سرعت، کنترل دما و سیستم سوخت است را ارائه داده اند. این مدل که برای شبیه‌سازی توربین گازی مورد تأیید محققین زیادی قرارگرفته است، با ثابت زمانی کمتر، برای شبیه‌سازی میکروتوربین نیز قابل قبول است [۶،۲۹].

همان طور که در شکل (۳) مشخص است، سه تابع کنترلی برای میکروتوربین مورد نیاز است که عبارت‌اند از: کنترل سرعت که تحت بارگذاری جزئی عمل می‌کند، کنترل درجه حرارت که به عنوان محدود کننده اضافه توان خروجی است و کنترل شتاب که برای محدود کردن شتاب روتور، قبل از رسیدن سرعت سیستم به مقدار نامی در لحظه راه اندازی استفاده می‌شود. اگر سرعت عملکرد سیستم نزدیک به سرعت مجاز باشد، کنترل شتاب در مدل‌سازی قابل حذف است. با توجه به شکل (۳)، خروجی بلوک LVG[۳] توسط بلوک‌های کنترل دما، سرعت و شتاب مشخص می‌شود. در بین ورودی‌های LVG هر کدام کمترین مقدار را داشته باشد در خروجی این بلوک ظاهر و به این ترتیب ورودی بلوک سیستم سوخت تعیین می‌گردد [۶،۲۹].

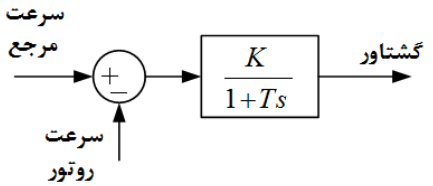
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol.19 No.4 Winter2022

از آنجایی که به طور کلی، دینامیک سیستم سوخت، کنترل دما و مجموعه توربین-کمپرسور نسبتاً کند و شبیه‌سازی آنها زمان بر است؛ همچنین به دلیل اینکه مطالعه و بررسی قسمت‌های مذکور هدف این مقاله نیست، بنابراین در بلوک دیاگرام ارائه شده برای میکروتوربین در شکل (۳)، تنها حلقه کنترل سرعت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در ادامه حلقه کنترل سرعت میکروتوربین بررسی می‌گردد.



شکل (۳): بلوک دیاگرام میکروتوربین

شکل (۴) حلقه کنترل سرعت میکروتوربین را نشان می‌دهد که به صورت افتی پیاده‌سازی‌شده‌است. افتی بودن حلقه سرعت بدین معناست که چنانچه توان تزریقی میکروتوربین به شبکه ناچیز باشد در این صورت سرعت روتور توربین تقریباً با سرعت مرجع برابر است و هر اندازه توان تزریقی این سیستم به شبکه افزایش یابد، سرعت روتور توربین افت می‌کند. همچنین درصد افت سرعت روتور از طریق بهره K تعیین می‌گردد. به عنوان مثال برای مشخصه افتی ۴٪ بایستی ضریب K برابر ۲۵ انتخاب شود.



شکل (۴): حلقه کنترل سرعت میکروتوربین

۴- مدل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

برای تحلیل عملکرد و مدل‌سازی ژنراتور مغناطیس دائم معمولاً معادلات این ماشین الکتریکی به دستگاه چرخان منطبق بر رتور (قاب مرجع dq) انتقال داده می‌شود، تا بدین وسیله اندوکتانس‌های ژنراتور مستقل از زمان گردد و ولتاژها، جریان‌ها و شارها در حالت ماندگار به صورت DC ظاهر و محاسبات به مراتب ساده‌تر شود [۳۱-۳۰]. اگر با استفاده از تبدیل پارک، معادلات الکتریکی حاکم بر این ژنراتور از دستگاه ساکن abc به دستگاه چرخان dq انتقال یابد، می‌توان گفت [۳۲]:

$$\begin{aligned} v_{sd} &= R_s i_{sd} - \omega_s \lambda_{sq} + \frac{d\lambda_{sd}}{dt} \\ v_{sq} &= R_s i_{sq} + \omega_s \lambda_{sd} + \frac{d\lambda_{sq}}{dt} \end{aligned} \quad (۱)$$

که R_s مقاومت اهمی سیم‌پیچ استاتور است. v_{sdq}، i_{sdq}، λ_{sdq} به ترتیب ولتاژ، جریان، شار پیوندی محور dq استاتور هستند. از سوی دیگر مؤلفه‌های d و q شار پیوندی از رابطه (۲) پیروی می‌کنند:

$$\begin{aligned} \lambda_{sd} &= L_{sd} i_{sd} + \lambda_{pm} \\ \lambda_{sq} &= L_{sq} i_{sq} \end{aligned} \quad (۲)$$

که λ_{pm} نشان‌دهنده شار ایجاد شده توسط آهنربای دائم رتور، L_{sd} و L_{sq} به ترتیب اندوکتانس خودی محورهای d و q استاتور هستند. با جایگذاری معادله (۲) در (۱)، رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} v_{sd} &= R_s i_{sd} - \omega_s L_{sq} i_{sq} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} \\ v_{sq} &= R_s i_{sq} + \omega_s L_{sd} i_{sd} + \omega_s \lambda_{pm} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} \end{aligned} \quad (۳)$$

گشتاور الکترومکانیکی ماشین قطب صاف از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۳۲].

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \lambda_{pm} i_{sq} \quad (۴)$$

که n_p تعداد جفت قطب‌های ماشین است. سرعت رتور نیز با توجه به دینامیک سیستم مکانیکی، طبق رابطه (۵) تعیین می‌گردد.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}[T_e - T_{mec}] \quad (۵)$$

که ω_m و J به ترتیب سرعت زاویه ای و اینرسی رتور است. T_{mec} گشتاور ایجاد شده توسط بخش مکانیکی میکروتوربین می‌باشد.

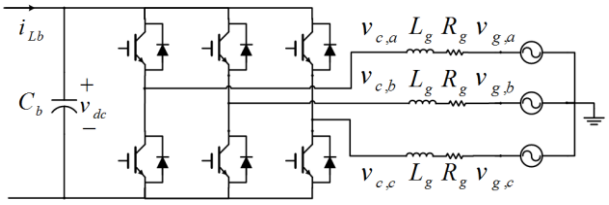
۵- روش‌های کنترل مبدل‌های میکروتوربین

در این مقاله دو روش کنترلی برای اینورتر منبع ولتاژ PWM و مبدل باک در نظر گرفته شده‌است. در روش اول کنترلی، اینورتر منبع ولتاژ ولتاژ لینک DC را در مقدار مرجعش ثابت نگه می‌دارد و مبدل باک توان حقیقی خروجی ژنراتور را در مقدار مرجع تنظیم می‌نماید. در روش دوم کنترلی، نقش دو مبدل مذکور عوض می‌شود و بنابراین اینورتر توان تزریقی به شبکه را تنظیم می‌کند و مبدل باک ولتاژ لینک DC را در مقدار مطلوب تثبیت می‌کند. در قسمت‌های بعدی ساختار کنترلی مبدل‌ها در هر دو روش کنترلی تشریح خواهد شد.

۵-۱- کنترل اینورتر منبع ولتاژ در روش اول کنترلی

در این روش، هدف کنترلی مورد نظر برای اینورتر نوع منبع ولتاژ شکل (۵)، کنترل و تثبیت ولتاژ لینک DC در مقدار مرجع است. همچنین این مبدل وظیفه کنترل توان راکتیو انتقالی بین ژنراتور و شبکه را نیز بر عهده دارد. البته در اکثر موارد این مبدل در ضریب توان واحد به کار گرفته می‌شود و لذا توان راکتیو مبادله شده بین ژنراتور و شبکه صفر خواهد بود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]



شکل (۵): اینورتر منبع ولتاژ متصل به شبکه

توان‌های حقیقی و راکتیو تحویلی به شبکه به ترتیب توسط روابط (۶) و (۷) در دستگاه مختصات سنکرون (dq) بیان می‌شود:

$$P_g = \frac{3}{2}\left(v_{gd} i_{gd} + v_{gq} i_{gq}\right) \quad (۶)$$

$$Q_g = \frac{3}{2}\left(v_{gq} i_{gd} - v_{gd} i_{gq}\right) \quad (۷)$$

در روابط فوق v_{gd} و v_{gq}، همچنین i_{gd} و i_{gq} به ترتیب مؤلفه‌هایdq ولتاژ محل اتصال اینورتر به شبکه و جریان تزریقی به شبکه اند. چنانچه جهت کنترل مبدل از دستگاه مرجع سنکرون با جهت یابی ولتاژ شبکه v_g استفاده گردد، مؤلفه d ولتاژ شبکه برابر دامنه فاز-نول ولتاژ شبکه ($v_{dg} = |V_g|$) و مؤلفه محور q ولتاژ برابر صفر می‌شود ($v_{gq} = 0$). به این ترتیب با صفر قرار دادن v_{gq} در روابط (۶) و (۷)، توان‌های حقیقی و راکتیو تحویلی به شبکه به صورت زیر بازنویسی می‌شوند.

$$P_g = \frac{3}{2}|V_g| i_{gd} \quad (۸)$$

$$Q_g = -|V_g| i_{gq} \quad (۹)$$

بنابراین به وسیله مولفه d جریان شبکه (i_{gd}) می‌توان P_g و درنتیجه v_{dc} را کنترل نمود. همچنین توسط مولفه q جریان شبکه (i_{gq}) می‌توان Q_g را کنترل کرده و در مبادله توان راکتیو شرکت نمود.

با توجه به مطالب بیان شده، ساختار کنترلی اینورتر منبع ولتاژ در روش اول کنترلی به صورت شکل (۶) می‌باشد. طبق شکل مذکور، ابتدا از طریق حلقه‌های خارجی کنترل ولتاژ لینک DC و کنترل توان راکتیو، مقادیر مرجع مؤلفه‌های d و q جریان شبکه در دستگاه مختصات سنکرون بدست می‌آید؛ یعنی از حلقه خارجی کنترل ولتاژ لینک DC، مقدار مرجع مؤلفه d جریان شبکه (i^*_{gd}) و از حلقه خارجی کنترل توان راکتیو، مقدار مرجع مؤلفه q جریان شبکه (i^*_{gq}) حاصل می‌شود. البته همان‌طور که اشاره شد به دلیل کارکرد مبدل سمت شبکه در ضریب توان واحد، توان راکتیو مبادله شده صفر می‌باشد ($Q_g = 0$) و بنابراین طبق رابطه (۹)، مقدار مرجع مؤلفه q جریان شبکه نیز برابر صفر است ($i^*_{gq} = 0$).

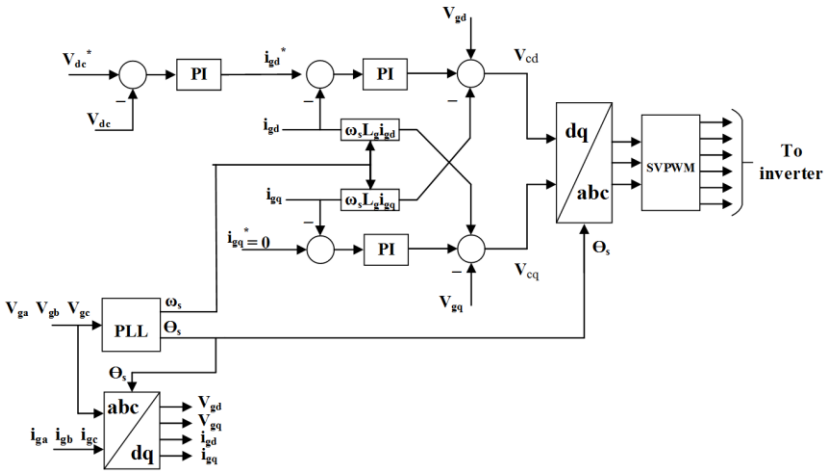
در مرحله بعد، حلقه‌های کنترل جریان شبکه قرار دارند که در آنها مقدار خطای بین جریان مرجع و مقدار اندازه گیری شده آن به یک کنترل‌کننده PI اعمال می‌گردد. به خروجی کنترل‌کننده PI ترم‌های پیش خور-پس خور[۴] اضافه و در نهایت مؤلفه‌های dq ولتاژ خروجی اینورتر (v_{cdq}) ساخته می‌شود.

با توجه به شکل(۵)، معادلات دینامیکی مؤلفه‌های d و q ولتاژ و جریان خروجی اینورتر به صورت زیر می‌باشد:

$$v_{cd} = R_g i_{gd} - L_g \omega_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} + v_{gd} \quad (۱۰)$$

$$v_{cq} = R_g i_{gq} + L_g \omega_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + v_{gq} \quad (۱۱)$$

بر اساس روابط فوق و ساختار کنترلی اینورتر سمت شبکه، حلقه‌های داخلی کنترل جریان به صورت شکل (۷) خواهد بود.



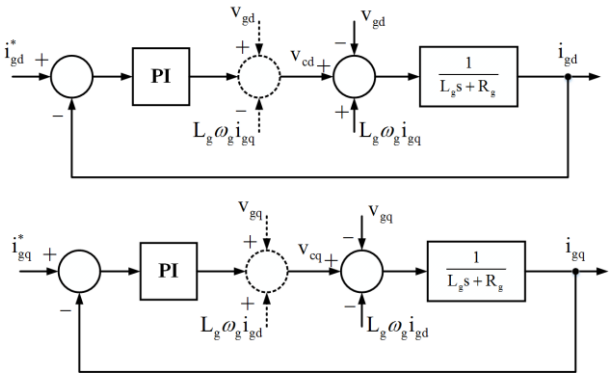
شکل (۶): ساختار کلی کنترل مبدل سمت شبکه در روش اول کنترلی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]

با توجه به شکل (۷) ترم‌های اغتشاشی $-v_{gd}+\omega_g L_g i_{gq}$ و $-v_{gq}-\omega_g L_g i_{gd}$ به ترتیب به حلقه‌های کنترل جریان محور d و q وارد می‌شوند که اثر آن‌ها با استفاده از ترم‌های پیش‌خور جبران می‌شود. اگر چه می‌توان تنها اثر ولتاژ سلف یعنی جمله‌های $\omega_g L_g i_{gd}$ و $-\omega_g L_g i_{gq}$ را جبران نمود، اما برای پاسخ مناسب‌تر سیستم به ویژه در هنگام تغییرات ناگهانی ولتاژ شبکه، لازم است عبارت‌های اول یعنی v_{gd} و v_{gq} نیز جبران گردند [۳۳]. بنابراین عبارت‌های $v_{gd}-\omega_g L_g i_{gq}$ و $v_{gq}+\omega_g L_g i_{gd}$ به ترتیب به خروجی کنترل‌کننده محور d و q جریان شبکه اضافه می‌شوند.

با توجه به شکل (۷) تابع تبدیل حلقه باز سیستم $LP_o^{\,i_{gdq}}(s)$ عبارت است از:

$$LP_o^{\,i_{gdq}}(s)=\frac{K_p^{\,i_{gdq}}\left(s+\frac{K_i^{\,i_{gdq}}}{K_p^{\,i_{gdq}}}\right)}{L_g s\left(s+\frac{R_g}{L_g}\right)} \qquad (۱۲)$$



شکل (۷): حلقه‌های داخلی کنترل مؤلفه‌های d و q جریان شبکه

برای انتخاب ضرایب کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی، فرض می‌شود که صفر کنترل‌کننده PI یعنی $z=-K_i^{\,i_{gd}}/K_p^{\,i_{gd}}$ با قطب تابع تبدیل سیستم یعنی $p=-(R_g/L_g)$ برابر باشد؛ لذا تابع تبدیل حلقه باز سیستم با در نظر گرفتن $\alpha_{igdq}=\frac{K_p^{\,i_{gdq}}}{L_g}$ از رابطه (۱۳) پیروی می‌کند:

$$LP_o^{\,igdq}(s)=\frac{\alpha_{igdq}}{s} \qquad (۱۳)$$

که α_{igdq} پهنای باند سیستم حلقه بسته کنترل مؤلفه‌های d و q جریان شبکه است و با در نظر گرفتن ملاحظاتی همچون فرکانس کلیدزنی مبدل و فرکانس شبکه تعیین می‌گردد. بنابراین با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده، مقدار ضرایب کنترل‌کننده PI طبق روابط (۱۴) و (۱۵) مشخص می‌شود.

$$K_p^{\,i_{gdq}}=\alpha_{i_{gdq}} L_g \qquad (۱۴)$$

$$K_i^{\,i_{gdq}}=\alpha_{i_{gdq}} R_g \qquad (۱۵)$$

با توجه به شکل (۸)، رابطه تعادل توان در خازن لینک DC و توان این خازن به ترتیب از روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$P_{dc}+P_g+P_{loss}=P_{o,buck} \qquad (۱۶)$$

$$P_{dc}=C_b V_{dc}\frac{dV_{dc}}{dt} \qquad (۱۷)$$

که $P_{o,buck}$، P_{dc}، P_g و P_{loss} به ترتیب توان خروجی مبدل باک، توان خازن لینک DC، توان تزریقی به شبکه و توان تلف شده در اینورتر منبع ولتاژ است.

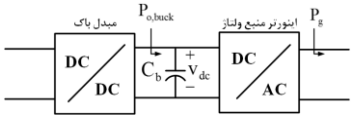
با جایگذاری معادلات (۸) و (۱۷) در رابطه (۱۶) و خطی سازی معادله بدست آمده حول نقطه کار، رابطه (۱۸) حاصل می‌گردد:

$$C_b V_{dc_0}\frac{d\tilde{V}_{dc}}{dt}+\frac{3}{2}|V_g|\tilde{i}_{gd}+\tilde{P}_{loss}=\tilde{P}_{o,buck} \qquad (۱۸)$$

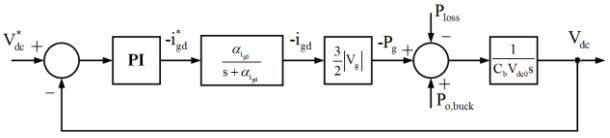
در رابطه (۱۸) نماد (~)، بیانگر تغییرات هر متغیر حول نقطه کار و V_{dc_0} مقدار ولتاژ لینک DC حول نقطه کار است.

طبق رابطه (۱۸) و ساختار کنترلی اینورتر منبع ولتاژ، شکل (۶)، حلقه کنترل ولتاژ لینک DC به صورت شکل (۹) بدست می‌آید. در این شکل تابع تبدیل حلقه بسته جریان محور d با $\frac{\alpha_{i_{gd}}}{s+\alpha_{i_{gd}}}$ نشان داده‌شده‌است. تابع تبدیل حلقه باز کنترل ولتاژ لینک DC از رابطه (۱۹) بدست می‌آید.

$$LP_o^{\,V_{dc}}(s)=\left(K_p^{\,V_{dc}}+\frac{K_i^{\,V_{dc}}}{s}\right)\times\frac{\alpha_{i_{gd}}}{s+\alpha_{i_{gd}}}\times\frac{3|V_g|}{2C_b V_{dc0}s} \qquad (۱۹)$$



شکل (۸): ساختار کلی مبدل‌های باک و اینوتر منبع ولتاژ و توان خروجی آنها



شکل (۹): حلقه خارجی کنترل ولتاژ لینک DC

اگر برای طراحی کنترل‌کننده PI و داشتن بیشترین پهنای باند و حاشیه پایداری از روش بهینه سازی متقارن[۵] [۳۴] استفاده گردد، مقدار $K_p^{\,V_{dc}}$ و $K_i^{\,V_{dc}}$ به ترتیب از روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه می‌گردد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]

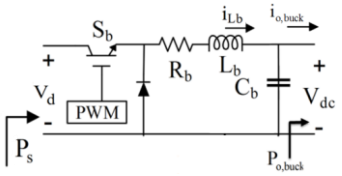
$$K_p^{v_{dc}} = \frac{\alpha_{i_{gd}}}{3}\frac{C_b V_{dc_0}}{|V_g|} \quad (۲۰)$$

$$K_i^{v_{dc}} = \frac{\alpha^2_{i_{gd}}}{12}\frac{C_b V_{dc_0}}{|V_g|} \quad (۲۱)$$

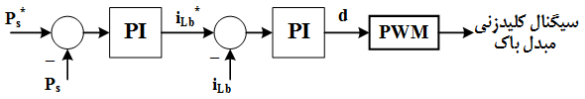
۵-۲- کنترل مبدل باک در روش اول کنترلی

همان طور که در بخش (۵) بیان گردید، در این روش کنترلی، از مبدل باک، شکل (۱۰)، به منظور کنترل توان حقیقی خروجی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم(P_s) استفاده می‌شود. از این رو ساختار کنترلی مبدل باک در این روش مطابق شکل (۱۱) می‌باشد. روند کنترل بدین صورت خواهد بود که از طریق حلقه خارجی کنترل توان، مرجع جریان سلف مبدل باک (i_{Lb}^*) بدست می‌آید؛ سپس این مقدار مرجع به یک حلقه داخلی کنترل جریان وارد شده و در نتیجه دوره وظیفه مبدل باک تعیین می‌گردد.

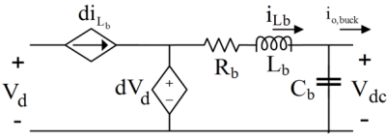
شکل (۱۲) مدل متوسط مبدل باک را نشان می‌دهد [۳۵]. با توجه به این شکل می‌توان گفت:



شکل (۱۰): ساختار مبدل باک



شکل (۱۱): ساختار کلی کنترل توان مبدل باک



شکل (۱۲): مدل متوسط مبدل باک

$$dv_d = L_b\frac{di_{Lb}}{dt} + R_b i_{Lb} + v_{dc} \quad (۲۲)$$

در رابطه فوق R_b و L_b به ترتیب مقاومت و سلف مبدل v_d، v_{dc} و i_{Lb} به ترتیب ولتاژ ورودی مبدل، ولتاژ لینک DC و جریان سلف مبدل است. با توجه به رابطه فوق و شکل (۱۱)، حلقه کنترل جریان سلف مبدل، به صورت شکل (۱۳) خواهد بود. همچنین تابع تبدیل این حلقه کنترلی یا $LP_o^{i_{Lb}}(s)$ طبق رابطه (۲۳) است.

$$LP_o^{i_{Lb}}(s) = \frac{K_p^{i_{Lb}}\left(s+\frac{K_i^{i_{Lb}}}{K_p^{i_{Lb}}}\right)}{s}\times\frac{1}{L_b\left(s+\frac{R_b}{L_b}\right)} \quad (۲۳)$$

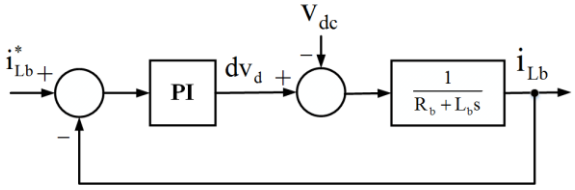
اگر مشابه آنچه برای طراحی حلقه داخلی کنترل جریان اینورتر بیان شد از روش حذف صفر و قطب برای طراحی کنترل‌کننده PI این حلقه استفاده گردد، تابع تبدیل حلقه باز $LP_o^{P_S}(s)$ از رابطه (۲۴) پیروی می‌نماید:

$$\begin{cases} LP_o^{i_{Lb}}(s) = \dfrac{\alpha_{i_{Lb}}}{s} \\ \alpha_{i_{Lb}} = \dfrac{K_p^{i_{Lb}}}{L_b} \end{cases} \quad (۲۴)$$

که $\alpha_{i_{Lb}}$ پهنای باند سیستم حلقه بسته کنترل جریان سلف بوده و توسط طراح تعیین می‌شود. بنابراین مقدار ضرایب کنترل‌کننده PI از روابط (۲۵) و (۲۶) محاسبه می‌شود.

$$K_p^{i_{Lb}} = \alpha_{i_{Lb}} L_b \quad (۲۵)$$

$$K_i^{i_{Lb}} = \alpha_{i_{Lb}} R_b \quad (۲۶)$$



شکل (۱۳): حلقه داخلی کنترل جریان سلف مبدل باک

طبق شکل (۱۰)، توان حقیقی خروجی استاتور (P_s) با صرف نظر از تلفات مبدل باک تقریباً با توان خروجی این مبدل برابر بوده و می‌توان گفت:

$$P_s \approx P_{o,buck} = i_{Lb} V_{dc_0} \quad (۲۷)$$

از آنجایی که ولتاژ لینک DC توسط مبدل سمت شبکه، کنترل و در مقدار مشخصی تثبیت‌شده‌است پس توان حقیقی به طور مستقیم توسط جریان سلف کنترل می‌شود. به این ترتیب حلقه خارجی کنترل توان حقیقی ژنراتور به صورت شکل (۱۴) خواهد بود. در این حلقه کنترلی، تابع تبدیل حلقه بسته $\frac{\alpha_{i_{Lb}}}{s+\alpha_{i_{Lb}}}$ مدل کننده حلقه داخلی کنترل جریان سلف مبدل می‌باشد. همچنین تابع تبدیل حلقه باز سیستم به صورت رابطه (۲۸) نوشته می‌شود.

$$LP_o^{P_S}(s) = \frac{K_p^{P_s}\left(s+\frac{K_i^{P_s}}{K_p^{P_s}}\right)}{s}\times\frac{\alpha_{i_{Lb}}}{s+\alpha_{i_{Lb}}}\times V_{dc_0} \quad (۲۸)$$

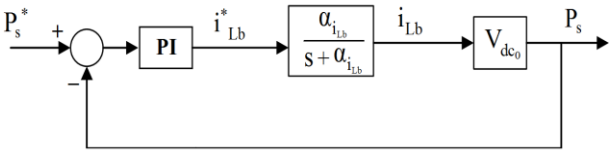
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]

مشابه آنچه در طراحی ضرایب PI حلقه داخلی کنترل جریان i_{Lb} گفته شد، برای طراحی ضرایب کنترل‌کننده PI حلقه خارجی کنترل توان P_s نیز از روش حذف صفر و قطب استفاده می‌شود و با درنظر-گرفتن مقدار مناسب برای پهنای باند حلقه کنترلی توان α_{ps}، مقادیر $K_p^{P_s}$ و $K_i^{P_s}$ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$K_p^{Ps} = \frac{\alpha_{ps}}{\alpha_{i_{Lb}}} \times \frac{1}{V_{dc_0}} \quad (۲۹)$$

$$K_i^{Ps} = \alpha_{ps} \times \frac{1}{V_{dc_0}} \quad (۳۰)$$

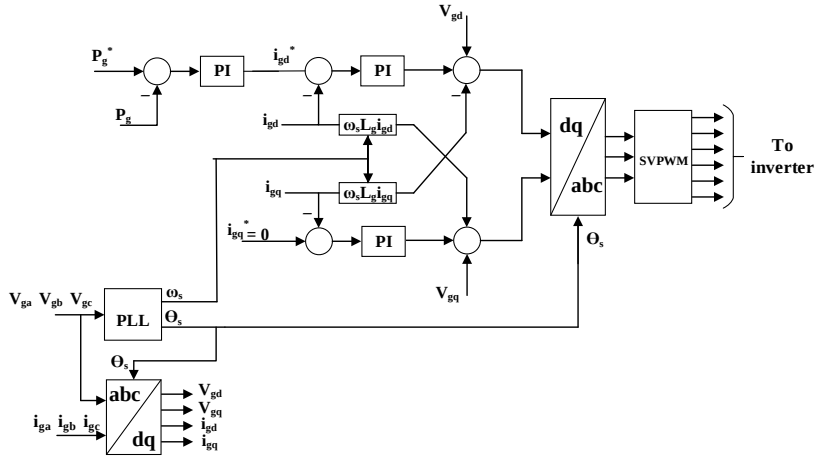
البته لازم به ذکر است که به منظور پایداری حلقه‌های کنترلی بایستی α_{ps} به اندازه کافی کوچکتر از $\alpha_{i_{Lb}}$ باشد.



شکل (۱۴): حلقه خارجی کنترل توان مبدل باک

۵-۳- کنترل اینورتر منبع ولتاژ در روش دوم کنترلی

شکل (۱۵) ساختار کلی کنترل مبدل سمت شبکه را به همراه حلقه-های داخلی کنترل مؤلفه‌های d و q جریان مبدل سمت شبکه در روش دوم کنترلی نشان می‌دهد. با مقایسه شکل (۶) با (۱۵) می‌توان دریافت که در این روش کنترلی به جای حلقه خارجی کنترل ولتاژ لینک DC، حلقه خارجی کنترل توان حقیقی تزریقی به شبکه قرار گرفته است. از آنجا که در این حالت نیز از دستگاه مرجع سنکرون با جهت یابی ولتاژ شبکه استفاده می‌گردد، P_g و Q_g به ترتیب به وسیله مؤلفه‌های d و q جریان شبکه (i_{gd} و i_{gq}) کنترل می‌شود. از آنجا که در هر دو روش کنترلی، حلقه‌های داخلی کنترل جریان یکسان هستند لذا ضرایب کنترل‌کننده حلقه مذکور در روش دوم نیز طبق روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شود.



شکل (۱۵): ساختار کلی کنترل اینورتر منبع ولتاژ در روش دوم کنترلی

حلقه خارجی کنترل توان حقیقی توسط مبدل سمت شبکه در شکل (۱۶) نشان داده‌شده‌است. تابع تبدیل حلقه بسته $\frac{\alpha_{i_{gdq}}}{s+\alpha_{i_{gdq}}}$ در شکل مذکور، مدل‌کننده حلقه داخلی کنترل مولفه d جریان شبکه (i_{gd}) است.

برای طراحی ضرایب کنترل‌کننده PI حلقه خارجی کنترل توان حقیقی نیز از روش حذف صفر و قطب استفاده می‌شود. بنابراین ضرایب K_p^{Ps} و K_i^{Ps} کنترل‌کننده طبق روابط (۳۱) و (۳۲) بدست می‌آید:

$$K_p^{Ps} = \frac{2}{3}\frac{\alpha_{ps}}{\alpha_{i_{gd}}}\frac{1}{|V_g|} \quad (۳۱)$$

$$K_i^{Ps} = \frac{2}{3}\frac{\alpha_{ps}}{|V_g|} \quad (۳۲)$$

که α_{ps} پهنای باند سیستم حلقه بسته کنترل توان حقیقی می‌باشد و توسط طراح تعیین می‌شود.

۵-۴- کنترل مبدل باک در روش دوم کنترلی

در این روش کنترلی مبدل باک وظیفه کنترل ولتاژ لینک DC را دارد. شکل (۱۷) ساختار کلی کنترل ولتاژ لینک DC مبدل باک را به همراه حلقه داخلی جریان سلف نشان می‌دهد. روند کنترل بدین صورت خواهد بود که خطای بین مقدار مرجع ولتاژ لینک DC و مقدار اندازه-گیری شده آن، پس از عبور از کنترل‌کننده PI، مقدار مرجع جریان مبدل باک را می‌سازد. سپس این مقدار مرجع به یک حلقه داخلی کنترل جریان وارد شده و در نتیجه ضریب وظیفه مبدل باک تعیین می‌گردد. همچنین به دلیل یکسان بودن حلقه داخلی کنترل جریان مبدل باک در هر دو روش کنترلی، ضرایب کنترل‌کننده حلقه مذکور در روش دوم نیز از روابط (۲۵) و (۲۶) بدست می‌آید.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]

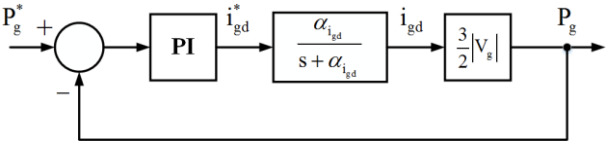
رابطه (۳۳) بیانگر ارتباط میان ولتاژ لینک DC (v_{dc}) و جریان سلف مبدل باک (i_{Lb}) است. با استفاده از رابطه مذکور و با در نظرگرفتن دینامیک حلقه داخلی جریان مبدل باک به صورت تابع تبدیل $\frac{\alpha_{i_{gdq}}}{s+\alpha_{i_{gdq}}}$، حلقه خارجی کنترل ولتاژ لینک DC را به صورت شکل (۱۸) خواهد بود.

$$i_{Lb}=C_b\frac{dv_{dc}}{dt}+i_{o,buck} \quad (۳۳)$$

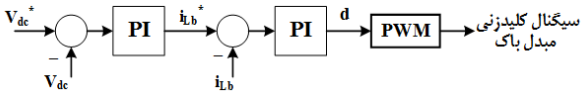
با انتخاب ضرایب کنترل‌کننده PI این حلقه از روش بهینه‌سازی متقارن خواهیم داشت:

$$K_p{}^{v_{dc}}=C_b\frac{\alpha_{i_{Lb}}}{2} \quad (۳۴)$$

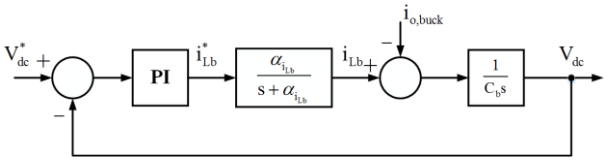
$$K_i{}^{v_{dc}}=C_b\frac{\alpha_{i_{Lb}}^2}{8} \quad (۳۵)$$



شکل (۱۶): حلقه خارجی کنترل توان حقیقی تزریقی به شبکه



شکل (۱۷): ساختار کنترلی ولتاژ لینک DC توسط مبدل باک



شکل (۱۸): حلقه خارجی کنترل ولتاژ لینک DC توسط مبدل باک

۶- مطالعات شبیه‌سازی

در این بخش عملکرد دو روش مطرح شده برای کنترل مبدل باک و مبدل سمت شبکه میکروتوربین تحت سه سناریوی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. این سناریوها عبارت اند از: تغییر پله ای مقدار مرجع توان اکتیو، کاهش و افزایش ۲۰٪ ولتاژ شبکه و وقوع اتصال کوتاه سه فاز در پایانه خروجی میکروتوربین. برای انجام این مطالعه، سیستم تولید میکروتوربین در حالت متصل به شبکه و در محیط Simulink/MALTAB شبیه‌سازی شده‌است. مقادیر پارامترهای سیستم شبیه سازی شده در بخش ضمائم ارائه گردیده است.

سناریوی یک: تغییر پله ای مقدار مرجع توان اکتیو

شکل (۱۹-الف) تغییرات مقدار مرجع توان اکتیو میکروتوربین را طی شبیه سازی نشان می‌دهد. مطابق شکل توان مرجع در ابتدای شبیه سازی برابر ۰/۵ پریونیت است و در لحظه ۲ ثانیه مقدار آن به طور ناگهانی به ۱ پریونیت افزایش یافته است. براساس شکل (۱۹-ب) با وقوع این تغییر ولتاژ باس DC (v_{dc}) در روش اول کنترلی تا ۲/۵ برابر مقدار نامی افزایش می‌یابد اما در روش دوم v_{dc} تغییر گذرای محسوسی ندارد. همچنین با توجه به شکل (۱۹-ج)، جریان مبدل باک (i_{Lb}) در روش اول کنترلی پس از افزایش ۰/۵ پریونیتی توان اکتیو در لحظه ۲ ثانیه دارای یک حالت گذرای حدوداً ۰/۵ ثانیه ای است این در حالی است که در روش دوم دینامیک i_{Lb} بسیار سریع است.

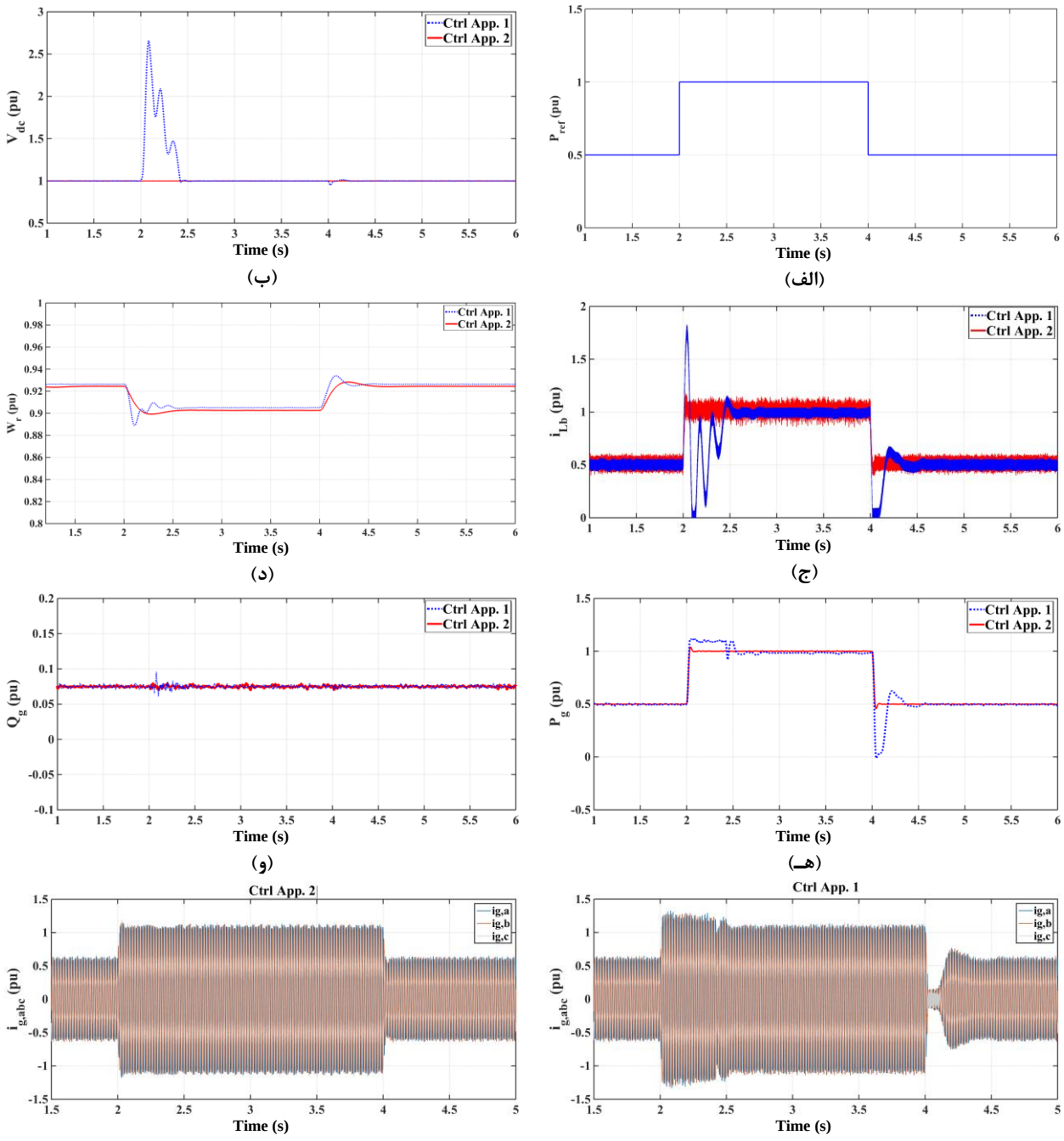
سرعت شفت ژنراتور طی این شبیه سازی در شکل (۱۹-د) نشان داده‌شده‌است و بر اساس آن با افزایش توان مرجع در لحظه دو ثانیه مقدار این متغیر در هر دو روش به ۰/۹ پریونیت کاهش می‌یابد و با کاهش توان مرجع مقدار سرعت به ۰/۹۲ پریونیت می‌رسد.

در شکل‌های (۱۹- هـ) و (۱۹-و) توان اکتیو (P_g)، توان راکتیو (Q_g) تزریقی به شبکه طی سناریوی یک نشان داده‌شده‌است. توان اکتیو تزریقی به شبکه در هر دو روش کنترلی مقدار مرجع را دنبال می‌کند؛ همچنین توان راکتیو در کل شبیه سازی در حوالی مقدار صفر است تا بدین ترتیب ضریب توان میکروتوربین در نقطه اتصال به شبکه یک باشد. جریان تزریقی به شبکه در شکل‌های (۱۹-ز) و (۱۹-ح) ارائه شده و طبق آن مدت زمان حالت گذرای جریان در روش اول طولانی تر از روش دوم است.

سنایوی دوم: افرایش و کاهش پله ای ولتاژ شبکه

در این حالت از شبیه سازی مطابق شکل (۲۰-الف)، ولتاژ موثر شبکه در بازه زمانی ۲ تا ۳ ثانیه ۲۰ درصد افزایش و در بازه زمانی ۴ تا ۵ ثانیه ۲۰ درصد کاهش یافته است. همچنین با توجه به شکل (۲۰-ب) توان اکتیو تزریقی به شبکه طی مدت زمان شبیه سازی برابر ۱ پریونیت می‌باشد. طبق شکل (۲۰-ج) در هر دو روش کنترلی به دنبال افزایش ۲۰ درصدی ولتاژ شبکه، مقدار مؤثر جریان خروجی میکروتوربین برابر ۰/۸۳ پریونیت و با کاهش ۲۰ درصدی ولتاژ شبکه مقدار آن تقریباً ۱/۲۵ پریونیت شده‌است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]



شکل (۱۹): نتایج شبیه سازی در سناریوی اول؛ الف) توان اکتیو مرجع، ب) ولتاژ باس DC، ج) جریان سلف مبدل باک، د) سرعت شفت ژنراتور، هـ) توان اکتیو تزریقی به شبکه، و) توان راکتیو تزریقی به شبکه، ز) جریان تزریقی به شبکه (روش اول)، ح) جریان تزریقی به شبکه (روش دوم)

طبق شکل (۲۰-د)، سرعت چرخش روتور ژنراتور به واسطه ثابت بودن توان خروجی میکروتوربین در کل مدت زمان شبیه سازی، برابر ۰/۹ پریونیت است.

شکل‌های (۲۰-هـ) و (۲۰-و) به ترتیب ولتاژ باس DC و جریان سلف مبدل باک را نشان می‌دهند. مطابق دو شکل مذکور، تغییرات لحظه ای ولتاژ شبکه در لحظات ۲، ۳، ۴ و ۵ ثانیه، موجب حالتی گذار با مدت زمانی بسیار کوتاه در ولتاژ باس DC روش اول و جریان سلف مبدل باک در روش دوم کنترلی می‌شود.

سناریوی سه: اتصال کوتاه سه فاز

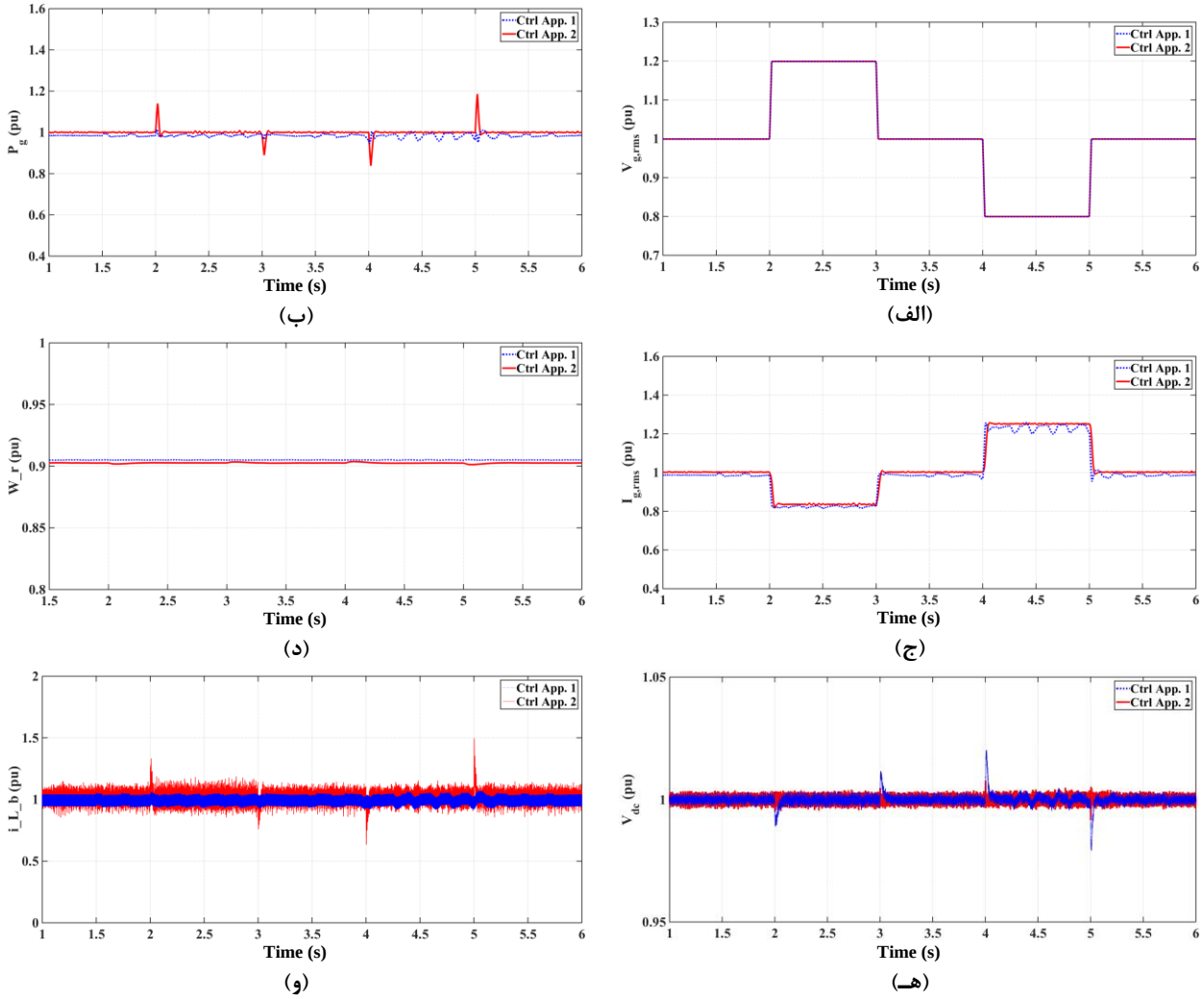
در این حالت از شبیه سازی عملکرد دو روش کنترلی در برابر وقوع اتصال کوتاه آزموده می‌شود. در این راستا، با توجه به شکل (۲) یک اتصال کوتاه سه فاز به زمین در محل *PCC* رخ داده است.

شکل (۲۱-الف) ولتاژ شبکه را نشان می‌دهد که براساس این شکل می‌توان ملاحظه نمود که اتصال کوتاه در لحظه ۳ ثانیه رخ می‌دهد و در لحظه ۳/۲ ثانیه برطرف شده‌است. با وقوع اتصال کوتاه طبق شکل (۲۱-ب)، ولتاژ باس DC در روش اول تا ۳/۵ برابر مقدار

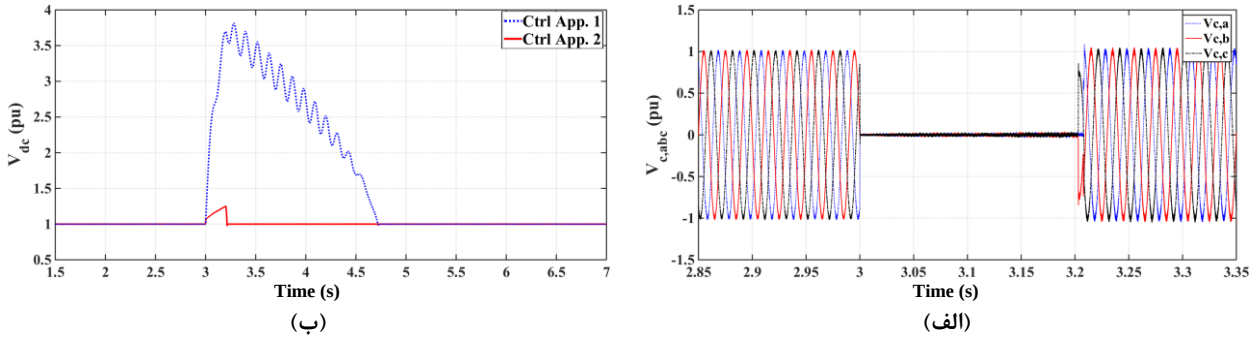
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]

نامی افزایش می‌یابد؛ این ولتاژ پس یک حالت گذرای ۱/۷ ثانیه ای به مقدار ماندگار می‌رسد. در مقابل در روش دوم v_{dc} دارای یک مقدار پیک ۱/۲ پریونیت است و حالت گذرای آن در حدود ۰/۲۵ ثانیه می‌باشد.

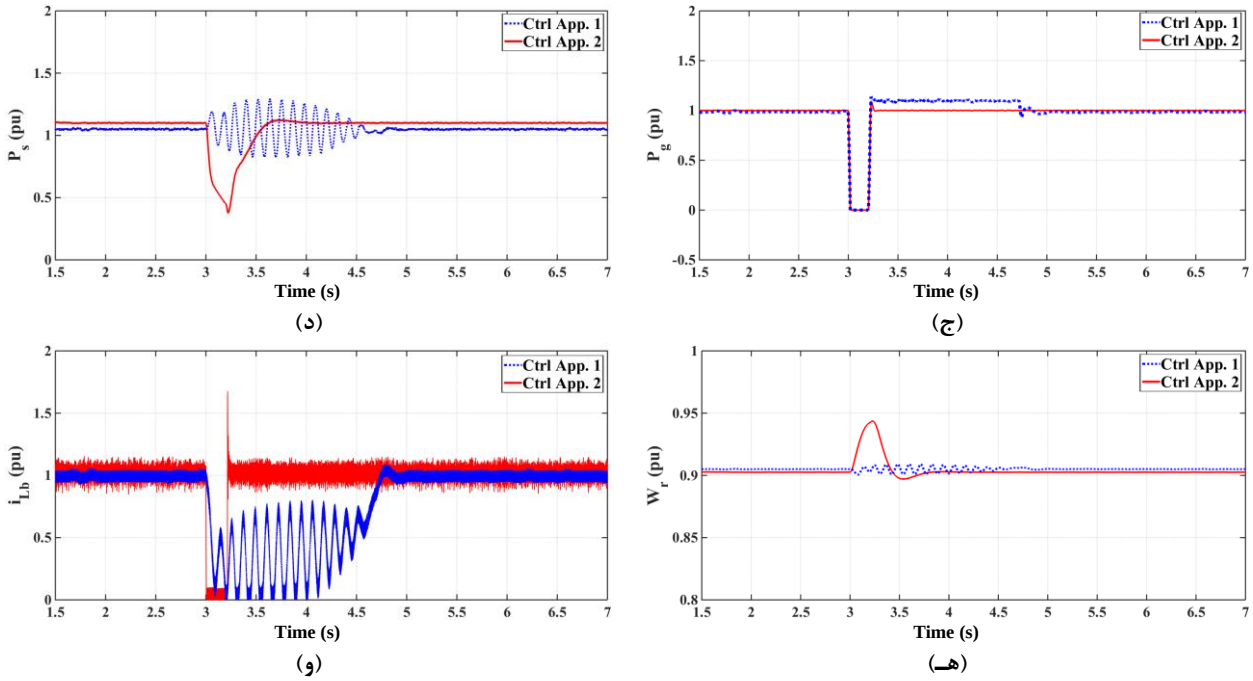
علت افزایش شدید v_{dc} در روش اول کنترلی را می‌توان با استفاده از شکل‌های (۲۱-ج) و (۲۱-د) توضیح داد که به ترتیب توان خروجی استاتور (P_s) و توان تزریقی به شبکه (P_g) را نشان می‌دهد. طبق شکل (۲۱-ج)، طی مدت زمان اتصال کوتاه (در بازه زمانی ۳ تا ۳/۲ ثانیه) P_g به مقدار صفر پریونیت می‌رسد. همزمان با این اتفاق، P_s در روش دوم از لحظه ۳ ثانیه تا زمان رفع خطا کاهش می‌یابد و این در حالی است که در روش اول این متغیر حول مقدار ۱ پریونیت به صورت نوسانی در می‌آید. از آنجا که تثبیت v_{dc} وابسته به برقراری تعادل بین P_s و P_g بوده و در روش دوم با وقوع اتصال کوتاه P_s کاهشی شده‌است، لذا v_{dc} در این روش در مقایسه با روش اول دارای مقدار پیک کمتر (۱/۲ پریونیت) و حالت گذرای کوتاه‌تر (۰/۲۵ ثانیه) خواهد بود.



شکل (۲۰): نتایج شبیه سازی در سناریوی دوم؛ الف) مقدار مؤثر ولتاژ شبکه، ب) توان اکتیو تزریقی به شبکه ، ج) مقدار مؤثر جریان تزریقی به شبکه ، د) سرعت شفت ژنراتور، هـ) ولتاژ باس DC ، و) جریان سلف مبدل باک



[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]



شکل (۲۱): نتایج شبیه‌سازی در سناریوی سوم؛ الف) ولتاژ شبکه، ب) ولتاژ باس DC، ، ج) توان اکتیو تزریقی به شبکه، د) توان خروجی استاتور، هـ) سرعت شفت ژنراتور ، و) جریان سلف مبدل باک

البته با توجه به شکل (۲۱-هـ) سرعت روتور ژنراتور در روش دوم به واسطه ی کاهش P_s طی مدت زمان وقوع اتصال کوتاه تا ۰/۹۴ پریونیت افزایش می‌یابد؛ زیرا تحت این شرایط مازاد توان تولیدی میکروتوربین موجب افزایش انرژی جنبشی شفت خواهد شد.

با توجه به شکل (۲۱-و)، جریان سلف مبدل باک در روش دوم کنترلی بلافاصله پس از برطرف شدن خطا با دینامیکی سریع به مقدار ماندگار می‌رسد اما در روش اول این جریان پس یک حالت نوسانی ۱/۷ ثانیه ای به حالت ماندگار میل می‌نماید.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، سیستم تولید میکروتوربین از طریق یکسوساز دیودی، مبدل باک و اینورتر به شبکه AC متصل گردید. برای کنترل مبدل باک و اینورتر منبع ولتاژ میکروتوربین دو روش معرفی شد و حلقه‌های کنترلی مربوط به هر یک از این روش‌ها بدست آمد. همچنین روش تنظیم کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی مربوط به حلقه‌های کنترلی مطرح گردید. در روش اول کنترلی وظیفه مبدل باک، تنظیم توان اکتیو تزریقی به شبکه و وظیفه اینورتر منبع ولتاژ، کنترل ولتاژ لینک DC است. در روش دوم کنترلی وظیفه مبدل باک و اینورتر منبع ولتاژ عکس روش اول می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی سیستم نشان می‌دهد که در روش اول کنترلی در طول وقوع اتصال کوتاه سه فاز، توان اکتیو خروجی ژنراتور حول مقدار مرجع نوسان می‌کند و ولتاژ خازن لینک DC به ۳/۵ برابر مقدار نامی می‌رسد؛ این در حالی است که در روش دوم کنترلی در حین وقوع خطا، توان اکتیو خروجی استاتور کاهشی می‌شود و ولتاژ لینک DC کمی افزایش می‌یابد. لذا عملکرد سیستم تولید میکروتوربین در روش دوم کنترلی از جهت قابلیت گذر از خطا بهتر از روش اول است.

ضمایم

جدول (۱): پارامترهای الکتریکی و مکانیکی سیستم تحت مطالعه [۳۷-۳۸]

میکروتوربین	$\omega_{nom} = 70000\ rpm$
	$P_{nom} = 400\ kW$
ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم	$R_s = 12.5\ m\Omega$
	$L_{sd} = L_{sq} = 0.165\ mH$
	$\lambda_{pm} = 0.24\ wb$
	$n_P = 2,\ J = 0.011\ kg.m^2$
مبدل باک	$R_b = 15\ m\Omega,\ L_b = 12\ mH$
	$C_b = 10\ mF$
خازن ورودی مبدل باک	$C_d = 1\ mF$
ولتاژ لینک DC	$v_{dc,nom} = 1100\ v$

جدول (۲): پارامترهای سیستم‌های کنترلی

ضرایب کنترل‌کننده سرعت	$K = 25,\ T = 0.1$
ضرایب کنترل‌کننده اینورتر منبع ولتاژ در روش اول	$K_p^{i_{gdq}} = 1,\ K_i^{i_{gdq}} = 50$
	$K_p^{v_{dc}} = 11,\ K_i^{v_{dc}} = 550$
ضرایب کنترل‌کننده اینورتر منبع ولتاژ در روش دوم	$K_p^{i_{gdq}} = 1,\ K_i^{i_{gdq}} = 50$
	$K_p^{P_s} = 5,\ K_i^{P_s} = 836$
ضرایب کنترل‌کننده مبدل باک در روش اول	$K_p^{i_L} = 2.5\times10^{-3},\ K_i^{i_L} = 3\times10^{-3}$
	$K_p^{P_s} = 0.1,\ K_i^{P_s} = 144$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]

ضرایب کنترل‌کننده مبدل باک در روش دوم	$K_p^{i_{L_1}} = 2.5\times10^{-3}, K_i^{i_{L_1}} = 3\times10^{-3}$
	$K_p^{v_{dc}} = 13, K_i^{v_{dc}} = 4176$

مراجع

[1] Al-Hinai, A., Feliachi A., "Dynamic model of a microturbine used as a distributed generator", in Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory, pp. 209-213, 2002.

[2] Xu, Z., Lu, Y., Wang, B., Zhao, L., Chen, C. and Xiao, Y., "Experimental evaluation of 100 kW grade micro humid air turbine cycles converted from a microturbine", Energy, Vol. 175, pp. 687-693, 2019.

[3] Gharehpetian, G. B. and Mousavi Agah, S. M., Distributed Generation Systems, Butterworth-Heinemann, 2017.

[4] Guda, S. R., Modeling, and power management of a hybrid wind-microturbine power generation system, MSc thesis, The Montana State University, Bozeman, Montana, 2005.

[5] Jain, A., Singh, B. P., Bhullar, S., and Verma, M. K., "Performance of hybrid wind-microturbine generation system in isolated mode", in 2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES), pp. 64-70, 2016.

[6] Keshtkar, H., Solanki, J., and Solanki, S. K., "Dynamic modeling, control and stability analysis of microturbine in a microgrid", in 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, pp. 1-9, 2014.

[7] Gaonkar, D. N., Pillai, G. N., and Patel, R. N., "Seamless Transfer of Microturbine Generation System Operation Between Grid-connected and Islanding Modes" , Electric Power Components and Systems, Vol. 37, no. 2, pp. 174-188, 2009.

[8] Wei, H., Ziping, W., Ming, N., Jianhua, Z., Yuanbo, G. and Chong, W., "Dynamic modelling and simulation of microturbine generation system for the parallel operation of microgrid", in 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, pp. 1-8, 2009.

[9] Saxena, M., Pachauri, R. and Chauhan, Y., "Torque control of microturbine based distributed generation system", in 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), pp. 1-6, 2016.

[10] Guo, X. and Guo, H., "Simulation and Control Strategy of a Micro-Turbine Generation System for Grid Connected and Islanding Operations", Energy Procedia, Vol. 12, pp. 368-376, 2011.

[11] Nayak, S. K. and Gaonkar, D. N., "Modeling and performance analysis of microturbine generation system in grid connected/islanding mode", in 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), pp. 1-6, 2012.

[12] Asgharian, P. and Noroozian, R., "Modeling and simulation of microturbine generation system for simultaneous grid-connected/islanding operation", in 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1528-1533, 2016.

[13] Saha, A. K., Chowdhury, S. P., Chowdhury, S. and Crossley, P. A., "Study of microturbine models in islanded and grid-connected mode", in 2008 43rd International Universities Power Engineering Conference, pp. 1-5, 2008.

[14] Nayak, S. K. and Gaonkar, D. N., "Performance of microturbine generation system in grid perturbation condition", in 2013 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), pp. 1-6, 2013.

[15] Yu, T., Tong, J. and Chan, K. W., "Study on microturbine as a back-up power supply for power grid black-start", in 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-6, 2009.

[16] Tao, Y. and Jia-Peng, T., "Auto disturbance rejection control of microturbine system", in 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-6, 2008.

[17] Cao, X. and Ye, J. "The Predictive Control of Microturbine Generation System", in 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, pp. 1-4, 2012.

[18] Jurado, F., Ortega, M. and Carpio, J., "Predictive control of microturbines using Hammerstein models", in MELECON 2006 – 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, pp. 873-876, 2006.

[19] Nayak, S. K., Gaonkar, D. N. and Shivarudraswamy, R., "Fuzzy Logic Controlled Microturbine Generation System for Distributed Generation" Energy Procedia, Vol. 14, pp. 1213-1219, 2012.

[20] Chalal, L., Dieulot, J.-Y., Dauphin-Tanguy, G. and Colas, F., "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] Colson, C. M., Wang, C., Nehrir, M. H., Guda, S. R. and Li, J., "Stand-alone Hybrid Wind-Microturbine Distributed Generation System: A Case Study", in 2007 39th North American Power Symposium, pp. 337-341, 2007.

[22] Wang, C., Li, J., Colson, C. M. and Nehrir, M. H., "Power management of a stand-alone hybrid wind-microturbine distributed generation system", in 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, pp. 1-7, 2009.

[23] Baudoin, S., Vechiu, I., Camblong, H., Vinassa, J.-M., and Barelli, L., "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.

[24] Kalantar, M. and Mousavi G, S. M., "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.

[25] Soliman, M., Puppala, A. K. and Safiuddin, M., "Dynamic analysis of microturbine/fuel cell for peak power shaving", in 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 13, 2006.

[26] Mousavi G, S. M., "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.

[27] Laili, M. S., Zakaria, Z. N., Halim, N. H. and Ibrahim, P., "Modelling and simulation of microturbine for a distribution system network with hybrid filter", in 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia, pp. 204-208, 2012.

[28] Fan W. and Zhou, Q., "Improved Droop Control Method for Micro-Turbine Generator Set", in 2018 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), Vol. 02, pp. 92-95, 2018.

[29] Guda, S. R., Wang, C. and Nehrir, M. H., "A Simulink-based microturbine model for distributed generation

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]

[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol.19 No.4 Winter2022

studies", in Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, pp. 269-274, 2005.

[۳۰] مویدی‌راد حجت، شمسی‌نژاد محمد علی، فرشاد محسن، "بهبود عملکرد درایو کنترل سرعت موتور القایی در محدوده‌ی سرعت‌های پایین و بالا با جبران ساز شار روتور"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، شماره دوم، صفحه‌های ۶۴-۵۹، ۱۳۹۱.

[۳۱] هادی‌زاده علی، هاشمی متین، پرنیانی مصطفی، "الگوریتمی نوین برای طراحی و پیاده‌سازی سخت‌افزاری شبیه‌ساز بلادرنگ ماشین‌های الکتریکی بر بستر FPGA به منظور تعامل بهینه در سیستم‌های سخت‌افزار در حلقه"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، شماره سوم، صفحه‌های ۵۹-۴۷، ۱۳۹۸.

[۳۲] رحمانی‌فرد جواد، جمالی‌آرند سعادت، "کنترل برداری بهینه موتور مغناطیس دائم با ساختار ترکیبی به منظور استفاده در خودروهای هیبریدی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، شماره اول، صفحه‌های ۳۶۵-۳۵۳، ۱۴۰۱.

[33] Yazdani A., and Iravani, R., Voltage Source Converters In Power Systems: Modeling, Control and Applications, John Wiley & Sons (USA), 2010.

[34] Barbosa, A. L. S., Barros, P. R., and Acioli Junior, G., "Identification and PI controller redesign in symmetrical optimum based design", in Control Applications (CCA), 2014 IEEE Conference on, pp. 421-426, 2014.

[35] Hebertt, S. R. and Ramón, S. O., Control Design Techniques in Power Electronics Devices, Springer-Verlag London, 2006.

[36] Ghanbari, T., Farjah, A., Bagheri, E. and Raoofat, M., "Application of Z-source sparse matrix converter for microturbine generators", in 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), pp. 283-288, 2018.

[37] Hasanzadeh, A., Edrington, C. S., Stroupe, N. and Bevis, T., "Real-Time Emulation of a High-Speed Microturbine Permanent-Magnet Synchronous Generator Using Multiplatform Hardware-in-the-Loop Realization", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, no. 6, pp. 3109-3118, 2014.

[38] Wu, Z., Dou, X., Chu, J. and Hu, M., "Operation and Control of a Direct-Driven PMSG-Based Wind Turbine System with an Auxiliary Parallel Grid-Side Converter", Energies, Vol. 6, no. 7, 2013.

زیرنویس‌ها

[1] Brayton
[2] Rowen
[3] Least Value Gate
[4] Feed-Forward
[5] Symmetrical Optimum Based Design

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1401.19.4.3.5]
[DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.139]