

ارائه روشی نوین در کنترل و تولید برق در شناورهای تندرو و امکان سنجی بهره گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر

حاتم عبدالرحیمی^{۱*}، داود عرب خابوری^۲، حسین محمدی^۳

۱- دانشجوی دکترا و مربی دانشگاه علوم و فنون دریایی امام خامنه‌ای (مدظله‌العالی)، hatam.abdolrahimi@gmail.com

۲- دکترای تخصصی، استاد دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳- مربی گروه برق، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه‌السلام)

چکیده:

هدف از این مقاله ارائه ساختاری متفاوت برای تغذیه روتور ژنراتور شناورهای تندرو می‌باشد که نسبت به دیزل ژنراتورهای رایج به دلیل حذف سیم‌پیچی‌های روتور ژنراتور و دیودهای یکسوساز و وریستورهای آن، دارای قابلیت اطمینان بیشتر و تلفات کمتری می‌باشد و به طبع آن، نیازمندی ساختار ژنراتور ارائه شده به تعمیرات و نگهداری بسیار ناچیز است. در ساختار ارائه شده می‌توان به جای استفاده از دیزل برای چرخاندن شفت ژنراتور در یک سرعت خاص برای تأمین فرکانس مطلوب، از انرژی‌های تجدید پذیر برای چرخاندن شفت ژنراتور در هر سرعتی استفاده نمود. همچنین ساختار ژنراتور ارائه شده به گونه‌ای می‌باشد که نیاز به کنترل فرکانس ندارد و در هر سرعتی از شفت ژنراتور، فرکانس مطلوب در خروجی ژنراتور تولید می‌گردد. در این مقاله از روش کنترل پیش‌بین، جهت تثبیت دامنه ولتاژ برق شناورها استفاده شده است که به دلیل پیش‌بینی متغیرها، حتی در شرایط تغییرات بار مصرفی و تغییرات مکانیکی سرعت شفت ژنراتور، مقادیر مرجع خود را با دقت بالایی دنبال می‌کنند.

واژه‌های کلیدی:

ژنراتور القایی دو سر تغذیه آبشاری بدون جاروبک، روش کنترلی پیش‌بین ولتاژی، برق شناورها

new control and generate power supply on high speed craft and the feasibility of using renewable energy

abdolrahimi, hatam^{1*}, Arab Khaburi, Davood², Mohammadi, Hossain³

1,3 Faculty of Sciences, Imam Hossein (AS) Officers and Guard Training University, Zibaknar, Rasht, Iran

2 Iran university of science and technology

Abstract:

The purpose of this paper is to provide a different structure for powering the rotor of fast floating generators, which is more reliable and less lost than conventional diesel generators due to the removal of generator rotor windings and rectifier diodes and varistors, and by its nature, the need The generator structure provided for maintenance is negligible. In the proposed structure, instead of using diesel to rotate the generator shaft at a certain speed to provide the desired frequency, nuclear fuels and renewable energy can be used to rotate the generator shaft at any speed. Also, the generator structure is presented in such a way that there is no need to control the frequency and at any speed of the generator shaft, the desired frequency is generated at the generator output. In this paper, the predictive control method is used to stabilize the voltage range of vessels, which due to the prediction of variables, even in conditions of load consumption and mechanical changes in the speed of the generator shaft follow their reference values with high accuracy.

Keyword:

brushless cascade doubly feed induction generator. Model predictive voltage control. power supply in high speed craft

امروزه در ایران برای تولید برق شناورها به دلیل راحتی و سادگی از دیزل ژنراتور استفاده می‌گردد. در دیزل ژنراتورها، شفت ژنراتور توسط یک موتور دیزل چرخانده می‌شود و روتور ژنراتور که سیم‌پیچی شده است توسط یک ژنراتور DC کوچک که روی شفت ژنراتور تعبیه شده است و در بین تکنسین‌های برق شناورها به «بچه ژنراتور» معروف است، تحریک می‌گردد. روی سیم‌پیچ‌های روتور ژنراتور جهت یکسوسازی جریان در روتور، از دیودهای یکسوساز و برای حفاظت از اضافه ولتاژهای احتمالی، از ورستور استفاده می‌شود که وجود دیود و ورستور قابلیت اطمینان دیزل ژنراتورها را تا حد زیادی پایین آورده و هزینه‌های تعمیر و نگهداری این ژنراتور را افزایش داده است.

با ایجاد جریان DC در سیم‌پیچی‌های روتور ژنراتور و چرخش شفت ژنراتور، ولتاژی در خروجی ژنراتور القا می‌گردد. جهت کنترل دامنه ولتاژ القا شده در خروجی ژنراتور از AVR^۱ و جهت کنترل فرکانس از گاورنر استفاده می‌گردد.

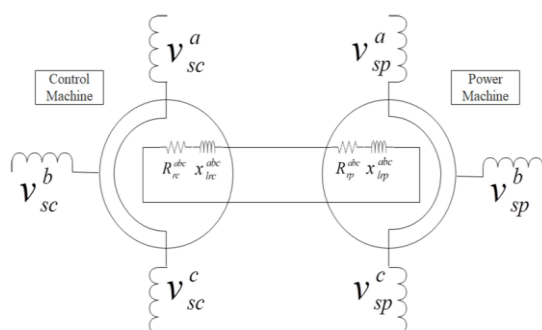
در این مقاله به جای استفاده از ژنراتور DC و به‌کارگیری دیود و ورستور در سیم‌پیچی روتور ژنراتور، از یک ماشین القایی به عنوان ماشین کنترل، برای تغذیه ژنراتور به عنوان ماشین توان استفاده شده است. به مجموع ماشین کنترل و ماشین توان، ژنراتور BCDFIG^۲ گفته می‌شود. بنابراین ژنراتور BCDFIG از دو ماشین القایی با نام‌های ماشین کنترل (CM^۳) و ماشین توان (PM^۴) تشکیل شده است؛ که روتورهای این دو ماشین به صورت الکتریکی و مکانیکی با یکدیگر کوپل شده‌اند[۱].

یکی از بزرگترین مشکلات موجود در منابع انرژی‌های تجدید پذیر، متغیر با زمان بودن این منابع انرژی می‌باشد. این امر تغییرات فرکانس و ولتاژ خروجی برق تولیدی از

این منابع را در پی دارد. بنابراین عملاً با توجه به دیزل ژنراتورهای موجود در شناورهای امروزی، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در تولید برق شناورها امکان‌پذیر نمی‌باشد. در قسمت‌های بعدی مقاله اثبات خواهد شد که با به‌کارگیری BCDFIG ها به‌عنوان ژنراتور شناورها، ولتاژ و فرکانس خروجی ژنراتور برخلاف دیزل ژنراتورهای رایج، دیگر وابسته به چرخش شفت ژنراتور در یک سرعت خاص نیست و BCDFIG ها می‌توانند در هر سرعتی از شفت ژنراتور، ولتاژ و فرکانس مطلوب شناور را تولید نمایند. بنابراین با به‌کارگیری این ساختار، امکان استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر برای تولید برق مطلوب شناورها در هر سرعتی از شفت ژنراتور، میسر می‌گردد.

ژنراتورهای BCDFIG ها مدل خاصی از BDFIG^۵ ها هستند [۲]–[۹]، که بجای استقرار سیم‌پیچی‌های توان و کنترل در یک قالب، از اتصال Cascade دو موتور القایی ایجاد شده‌اند که براحتی قابلیت اجرا و به‌کارگیری دارند. کنترل‌پذیری و قابلیت اطمینان بالا، به خاطر عدم استفاده از جاروبک و براحتی در cascade کردن دو موتور القایی مجزا، از مزایای بزرگ این BCDFIG می‌باشد [۱۰]، [۱۱].

شکل ۱ شماتیک اتصال آبشاری دو ماشین القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- اتصال آبشاری دو ماشین القایی

در حالت کلی، در کنترل سیستم‌های قدرت متصل به شبکه، کنترل توان اکتیو و راکتیو ژنراتور حائز اهمیت است در حالی که در شناورها، ثابت نگه داشتن ولتاژ و فرکانس خروجی ژنراتور در حین تغییرات بار مصرفی و حتی تغییرات سرعت مکانیکی شفت ژنراتور اهمیت پیدا می‌کند. بنابراین روش‌های کنترلی سیستم‌های قدرت

^۱ Automatic Voltage Regulation

^۲ Brushless Cascade Doubly Feed induction Generator

^۳ Control Machine

^۴ Power Machine

^۵ Brushless Doubly Feed induction Generator

متصل به شبکه را نمی‌توان به صورت مستقیم در مورد کنترل برق شناورها بکار برد.

از میان روش‌های کنترلی پیشرفته، روش کنترل پیش‌بین، یکی از روش‌های کنترلی است که اخیراً کاربردهای زیادی در صنعت پیدا کرده است. روش کنترل پیش‌بین انعطاف‌پذیری بالا، کنترل متغیرهای مختلف و پاسخ دینامیکی مناسبی به تغییرات اعمالی به سیستم دارد [۱۲]–[۱۵].

در این مقاله برای تثبیت ولتاژ و فرکانس خروجی ژنراتور BCDFIG شناورها و پاسخ دینامیکی سریع این ژنراتور در مقابل تغییرات جریانی بار مصرفی و تغییرات مکانیکی شفت ژنراتور، روش کنترل پیش‌بین ولتاژی (MPVC^۶) ارائه شده است که ولتاژ خروجی آینده ژنراتور را برحسب پارامترهای دیگر ماشین در تغییرات الکتریکی و مکانیکی اعمالی به سیستم، پیش‌بینی و ولتاژ مناسب را جهت تثبیت ولتاژ خروجی ژنراتور، به سیم‌پیچی‌های استاتور ماشین کنترل تعیین و اعمال می‌کند.

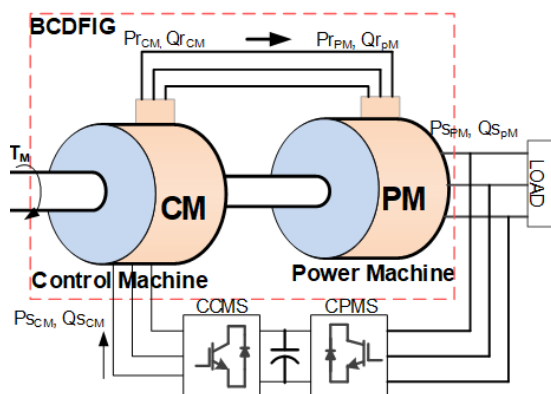
در این مقاله مدار معادل BCDFIG با اتصال الکتریکی و مکانیکی دو ماشین القایی به‌عنوان ماشین توان و ماشین کنترلی BCDFIG و بسط روابط ماشین‌های مذکور در دستگاه d-q ارائه می‌گردد. روتور BCDFIG به صورت مجموع روتور ماشین کنترل و روتور ماشین توان تحلیل می‌شود تا با این روش، مراحل اعمال ولتاژ به سیم‌پیچی‌های استاتور ماشین کنترل و القا جریان در سیم‌پیچی‌های روتور ماشین کنترل و ایجاد جریان در سیم‌پیچی‌های روتور ماشین توان به خاطر اتصال الکتریکی روتورهای ماشین توان و کنترل و در نهایت ایجاد ولتاژ در خروجی ماشین توان، قابل تحلیل و اندازه‌گیری باشد.

معادلات ارائه شده در M-File متلب شبیه‌سازی شده و سپس با اعمال روش کنترل پیش‌بین ولتاژی به BCDFIG، ژنراتور مربوطه در تغییرات جریانی بار مصرفی و تغییرات مکانیکی سرعت شفت ژنراتور، مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. آنگاه نشان داده خواهد شد که با استفاده از روش کنترلی پیشنهاد شده، BCDFIG پایداری ولتاژی و فرکانسی خود را در تغییرات فوق‌الذکر،

به نحوه مطلوبی، حفظ می‌کند که این موضوع نشان از درستی روش کنترلی ارائه شده دارد.

۲- مدل‌سازی

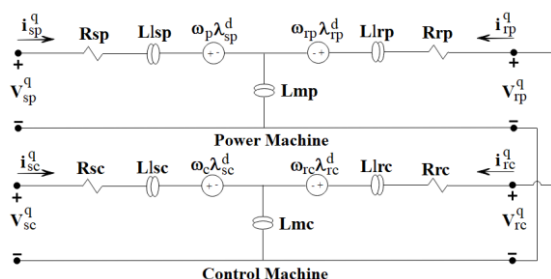
در ابتدا ساختار و نحوه عملکرد ژنراتور BCDFIG توضیح داده خواهد شد و در ادامه روابط ریاضی این ژنراتور ارائه می‌شود. شکل ۲ ساختار شماتیک ژنراتور BCDFIG را نشان می‌دهد.



شکل ۲- ساختار شماتیک ژنراتور BCDFIG

همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود این ژنراتور از دو ماشین القایی با نام‌های ماشین کنترل (CM) و ماشین توان (PM) تشکیل شده است؛ که روتورهای این دو ماشین به‌صورت مکانیکی از طریق شفت و سیم‌پیچی‌های روتور آن‌ها به صورت الکتریکی با یکدیگر کوپل شده‌اند. ماشین توان مستقیماً به برق شناور متصل است درحالی‌که ماشین کنترل از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت تغذیه می‌شود.

شکل‌های ۳ و ۴، مدار معادل BCDFIG که متشکل از دو ماشین القایی هستند را روی محورهای d-q نشان می‌دهند.



شکل ۳- مدار معادل BCDFIG روی محور q

^۶ Model Predictive Voltage Control

$$\frac{dv_{sp}^q}{dt} = \frac{R_L}{L_{mp}} \left[R_r i_{rp}^q + L_r \frac{di_{rp}^q}{dt} - L_{mc} \frac{di_{sc}^q}{dt} - \omega_{rp} (\lambda_{rc}^d - \lambda_{rp}^d) \right] \quad (7)$$

حال معادله (۷) را در معادله (۳) قرار می‌دهیم، با

$$\text{فرض اینکه } j2 = -L_{mp} + \frac{L_r L_{sp}}{L_{mp}}$$

$$\frac{di_{rp}^q}{dt} = \frac{1}{j2} \left[-j \omega_{sp} v_{sp}^q - \frac{L_{sp}}{L_{mp}} R_r i_{rp}^q + \frac{L_{sp} L_{mc}}{L_{mp}} \frac{di_{sc}^q}{dt} + \frac{L_{sp}}{L_{mp}} \omega_{rp} (\lambda_{rc}^d - \lambda_{rp}^d) + \omega_p \lambda_{sp}^d \right] \quad (8)$$

حال معادله (۸) را در معادله (۶) قرار می‌دهیم، با

$$\text{فرض } j3 = L_{sc} - \frac{L_{mc}^2 L_{sp}}{j2 L_{mp}}$$

$$\frac{di_{sc}^q}{dt} = \frac{1}{j3} \left[v_{sc}^q - R_{sc} i_{sc}^q - \frac{j1}{j2} L_{mc} v_{sp}^q - \frac{L_{mc}}{j2} \frac{L_{sp}}{L_{mp}} R_r i_{rp}^q + \frac{L_{mc}}{j2} \frac{L_{sp}}{L_{mp}} \omega_{rp} (\lambda_{rc}^d - \lambda_{rp}^d) + \frac{L_{mc}}{j2} \omega_p \lambda_{sp}^d - \omega_c \lambda_{sc}^d \right] \quad (9)$$

با ادامه رویه بالا برای محور d، نیز روابط به‌صورت زیر

خواهد بود:

$$\frac{dv_{sp}^d}{dt} = \frac{R_L}{L_{mp}} \left[R_r i_{rp}^d + L_r \frac{di_{rp}^d}{dt} - L_{mc} \frac{di_{sc}^d}{dt} + \omega_{rp} (\lambda_{rc}^q - \lambda_{rp}^q) \right] \quad (10)$$

$$\frac{di_{rp}^d}{dt} = \frac{1}{j2} \left[-j \omega_{sp} v_{sp}^d - \frac{L_{sp}}{L_{mp}} R_r i_{rp}^d + \frac{L_{sp} L_{mc}}{L_{mp}} \frac{di_{sc}^d}{dt} - \frac{L_{sp}}{L_{mp}} \omega_{rp} (\lambda_{rc}^q - \lambda_{rp}^q) - \omega_p \lambda_{sp}^q \right] \quad (11)$$

$$\frac{di_{sc}^d}{dt} = \frac{1}{j3} \left[v_{sc}^d - R_{sc} i_{sc}^d - \frac{j1}{j2} L_{mc} v_{sp}^d - \frac{L_{mc}}{j2} \frac{L_{sp}}{L_{mp}} R_r i_{rp}^d - \frac{L_{mc}}{j2} \frac{L_{sp}}{L_{mp}} \omega_{rp} (\lambda_{rc}^q - \lambda_{rp}^q) - \frac{L_{mc}}{j2} \omega_p \lambda_{sp}^q + \omega_c \lambda_{sc}^q \right] \quad (12)$$

۳- روش کنترل ولتاژ پیش‌بین MPC

با بدست آوردن دو معادله (۷) و (۱۰) برای محورهای

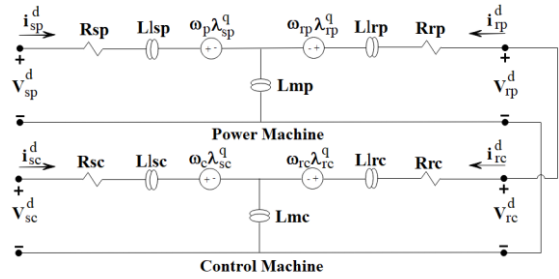
d و q نوبت آن می‌رسد که با استفاده از این معادلات

روش کنترل پیش‌بین ولتاژی پیاده‌سازی شود. برای این

کار باید معادلات مذکور با استفاده از تقریب مشتق اولر

به معادلات گسسته با زمان تبدیل شود. معادله‌ی تقریب

مشتق اولر در زیر آورده شده است.



شکل ۴- مدار معادل BCDFIG روی محور d

همان‌طور که واضح است، $v_{rp}^{dq} = v_{rc}^{dq}$ ، $i_{rp}^{dq} = -i_{rc}^{dq}$

و $i_{sp}^{dq} = -\frac{v_{sp}^{dq}}{R_L}$ با فرض اینکه داشته باشیم:

$$\begin{aligned} L_{sp} &= L_{lsp} + L_{mp} \\ L_{sc} &= L_{lsc} + L_{mc} \\ L_{rp} &= L_{lrp} + L_{mp} \\ L_{rc} &= L_{lrc} + L_{mc} \end{aligned} \quad (1)$$

معادلات مربوط به شاردر پیوندی استاتورها و

روتورهای ماشین توان و ماشین کنترل در دستگاه d-q

به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} \lambda_{sp}^{dq} &= L_{sp} i_{sp}^{dq} + L_{mp} i_{rp}^{dq} \\ \lambda_{rc}^{dq} &= L_{rc} i_{rc}^{dq} + L_{mc} i_{sc}^{dq} \\ \lambda_{rp}^{dq} &= L_{rp} i_{rp}^{dq} + L_{mp} i_{sp}^{dq} \\ \lambda_{sc}^{dq} &= L_{sc} i_{sc}^{dq} + L_{mc} i_{rc}^{dq} \end{aligned} \quad (2)$$

و معادلات ولتاژ استاتورها و روتورهای ماشین توان و

ماشین کنترل در دستگاه d-q به‌صورت زیر می‌باشد.

$$v_{sp}^{dq} = R_{sp} i_{sp}^{dq} + \frac{d\lambda_{sp}^{dq}}{dt} \pm \omega_p \lambda_{sp}^{dq} \quad (3)$$

$$v_{rp}^{dq} = R_{rp} i_{rp}^{dq} + \frac{d\lambda_{rp}^{dq}}{dt} \pm \omega_{rp} \lambda_{rp}^{dq} \quad (4)$$

$$v_{rc}^{dq} = R_{rc} i_{rc}^{dq} + \frac{d\lambda_{rc}^{dq}}{dt} \pm \omega_{rc} \lambda_{rc}^{dq} \quad (5)$$

$$v_{sc}^{dq} = R_{sc} i_{sc}^{dq} + \frac{d\lambda_{sc}^{dq}}{dt} \pm \omega_c \lambda_{sc}^{dq} \quad (6)$$

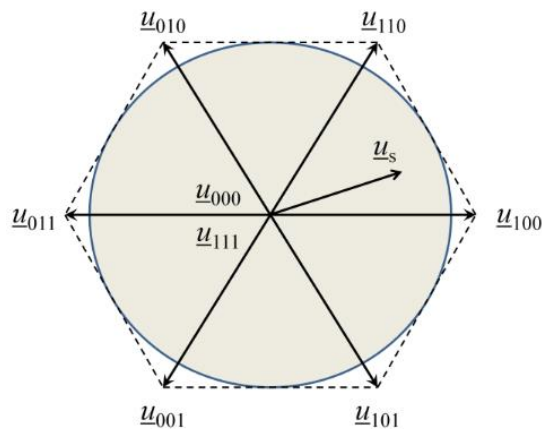
برای روش‌های کنترل پیش‌بین به معادله‌ای احتیاج

داریم، که نشان‌دهنده ارتباط مشتق ولتاژ استاتور ماشین

توان با سایر پارامترهای BCDFIG باشد.

از محور q شروع کرده و رابطه‌ی (۴) با رابطه (۵) برابر

$$\text{قرار می‌دهیم، با فرض } j1 = 1 + \frac{R_{sp}}{R_L}$$



شکل ۵- بردارهای ولتاژ استفاده شده در روش MPC

در این روش در هر گام، ولتاژ خروجی ژنراتور نمونه برداری می گردد و تمامی بردارهای نشان داده شده در شکل (۵) به استاتور ماشین کنترلی اعمال می گردد و در ابتدا جریان استاتور ماشین کنترل و بعد جریان روتور BCDFIG و در نهایت ولتاژ خروجی BCDFIG در لحظه (K+1) پیش بینی می گردد و با مراجع ولتاژ خروجی ژنراتور مقایسه می گردد و هر بردار ولتاژ اعمالی به استاتور ماشین کنترل که تابع هدف را کمینه کند در آن گام انتخاب شده و به استاتور ماشین کنترلی اعمال می گردد. از آنجایی که ولتاژ خروجی ژنراتور در هر لحظه پیش بینی می شود، در تغییرات ناگهانی الکتریکی و مکانیکی سیستم، روش کنترل پیش بین سرعت عمل بسیار بالایی در حفظ دامنه و فرکانس ولتاژ خروجی ژنراتور دارد که در ادامه نشان داده خواهد شد.

۴- شبیه سازی

معادلات بدست آمده در قسمت های قبل را در نرم افزار متلب به صورت M-File مدل می نماییم. مشخصات ژنراتورهای استفاده شده در این شبیه سازی در جدول ۱ نشان داده شده است. زمان نمونه برداری در این شبیه سازی یک میکرو ثانیه می باشد.

همان طور که از شکل ۶ مشخص است، فرض می گردد که سرعت مکانیکی شفت ژنراتور، از سرعت 100 rpm به 300 rpm افزایش می یابد و جریان بار مصرفی متصل به ژنراتور در سه برهه از زمان دچار افزایش ناگهانی 20 درصدی می شود. این تغییرات در شکل ۷ نشان داده شده است.

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (13)$$

که در آن k شماره ی نمونه برداری و T_s پله ی زمانی این نمونه برداری ها است. معادلات گسسته بدست آمده برای پیش بینی ولتاژ خروجی ژنراتور در لحظه (k+1)، با استفاده از معادلات (۷) و (۱۰) خواهیم داشت:

$$v_{sp}^q(k+1) = \frac{T_s R_L}{L_{mp}} [R_r i_p^q(k) + L_r i_p^q(k+1) - L_{mc} i_{sc}^q(k+1) - \omega_p(k) [\lambda_{rc}^d(k) - \lambda_p^d(k)]] + v_{sp}^q(k) \quad (14)$$

$$v_{sp}^d(k+1) = \frac{T_s R_L}{L_{mp}} [R_r i_p^d(k) + L_r i_p^d(k+1) - L_{mc} i_{sc}^d(k+1) + \omega_p(k) [\lambda_{rc}^q(k) - \lambda_p^q(k)]] \quad (15)$$

در معادله (۱۴) و (۱۵) مقادیر $i_{rp}^q, i_{sc}^q, i_{rp}^d, i_{sc}^d$ در لحظه (k+1) به راحتی با استفاده از تقریب اولر و معادلات (۸)- (۹) و (۱۱)- (۱۲) قابل استخراج است.

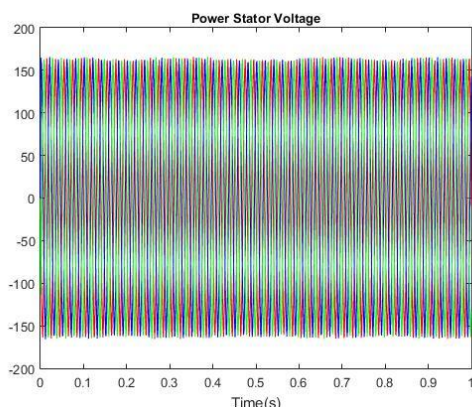
در روش MPVC با توجه به وضعیت کلیدها در اینورتر که ۸ حالت کلیدزنی را می دهند تصمیم گیری خواهد شد. این ۸ وضعیت در شکل (۵) ارائه گردیده است.

که در آن وضعیت های (000) و (111) درواقع یک حالت و بیانگر ولتاژ صفر هستند. همچنین عدد 1 در حالت وصل کلیدهای بالایی در فازهای مختلف اینورتر و عدد 0 نشان دهنده وصل کلیدهای پایینی اینورتر است. چگونگی عملکرد این روش بدین صورت است که با استفاده از بردار ولتاژهای فوق و قرار دادن هر یک از آنها در معادلات، ۸ مقدار مختلف برای ولتاژ خروجی ژنراتور، روی هر دو محور d و q بدست خواهد آمد. بنابراین تابع بهینه سازی g به صورت زیر تعریف می شود:

$$g = |v_{sp_ref}^q - v_{sp}^q(sw)| + |v_{sp_ref}^d - v_{sp}^d(sw)| \quad (16)$$

که در آن sw مربوط به حالت کلیدزنی است؛ که از 0 تا 7 متغیر است. با توجه به یکسان بودن ماهیت دو متغیر، که ولتاژ هستند دیگر نیازی به ضریب وزنی نیست.

بی تأثیر است که این موضوع، درستی و قدرت روش کنترلی ارائه شده را اثبات می‌کند.



شکل ۸- ولتاژ خروجی BCDFIG

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به جای ساختار تولید برق با استفاده از دیزل ژنراتورها در شناورها، ساختار جدیدی برای تولید برق در شناورها ارائه شد که نسبت به مدل‌های متداول دارای مزایای زیر می‌باشد:

- امکان استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر برای تولید برق شناورها

- حذف سیم‌پیچی روتور ژنراتور شناورها

- حذف دیودهای یکسوکننده و وریستور روتور ژنراتور شناورها

- حذف AVR شناورها

- عدم نیاز به کنترل فرکانس شناورها و حذف گاورنر

- حذف وابستگی فرکانس خروجی ژنراتور به سرعت شفت ژنراتور و تولید توان در هر سرعت دلخواه

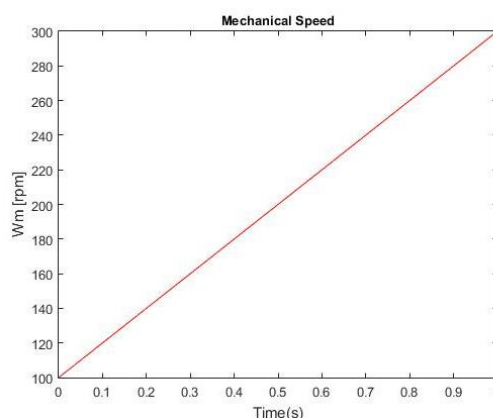
همچنین در این مقاله، روش کنترل پیش‌بین ولتاژی ارائه شد که عملکرد سریع و مطلوبی در ثابت نگه‌داشتن ولتاژ و فرکانس خروجی BCDFIG شناورها در تغییرات جریانی ناگهانی بار مصرفی و تغییرات مکانیکی سرعت شفت ژنراتور دارد. این موضوع، قدرت و درستی روش کنترلی ارائه شده را اثبات می‌کند.

روش کنترل پیش‌بین ولتاژی ارائه شده برخلاف روش‌های کنترلی متداول مانند روش کنترل برداری دارای مزایای زیر می‌باشد:

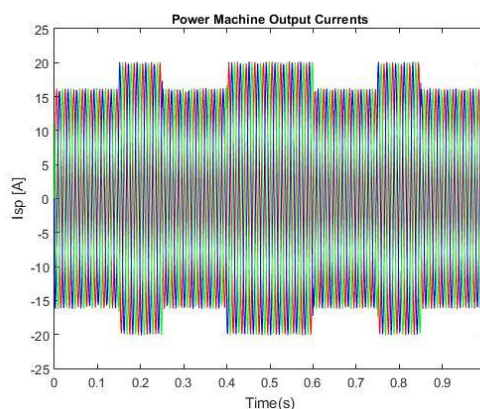
- حذف بلوک‌های PI و دردرسر حاصل از انتخاب ضرایب آن.

جدول ۱- ژنراتورهای استفاده شده در شبیه‌سازی

مشخصات	ماشین توان	ماشین کنترل
مقاومت استاتور (اهم)	۰,۳۳۳۲	۱,۸۳۷۲
مقاومت روتور (اهم)	۰,۳۳۷	۲,۴۲۶۱
اندوکتانس نشتی استاتور (هانری)	۰,۶۹۹۵	۱,۹۲۶۸
اندوکتانس نشتی روتور (هانری)	۰,۶۹۹۵	۱,۹۲۶۸
اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی (هانری)	۲۰,۸۱	۵۸,۴۳
توان نامی (کیلووات)	۹,۲	۳
تعداد قطب‌ها	۴	۴



شکل ۶- تغییرات سرعت مکانیکی شفت BCDFIG



شکل ۷- تغییرات جریانی بار مصرفی BCDFIG

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با اعمال روش کنترل پیش‌بین روی ژنراتور، در طی افزایش تغییرات جریانی بار مصرفی و افزایش سرعت شفت ژنراتور، دامنه ولتاژ خروجی ژنراتور، ثابت باقی می‌ماند. تغییرات فوق‌الذکر بر روی فرکانس خروجی ژنراتور نیز

- [6] S. Shao, E. Abdi, and R. McMahon, "Low-cost variable speed drive based on a brushless doubly-fed motor and a fractional unidirectional converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 1, pp. 317–325, 2011
- [7] S. Shao, E. Abdi, F. Barati, and R. McMahon, "Stator-flux-oriented vector control for brushless doubly fed induction generator," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 10, pp. 4220–4228, 2009
- [8] K. Protsenko and Dewei Xu, "Modeling and Control of Brushless Doubly-Fed Induction Generators in Wind Energy Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 1191–1197, May 2008
- [9] I. A. Gowaid, A. S. Abdel-Khalik, A. M. Massoud, and S. Ahmed, "Ride-Through Capability of Grid-Connected Brushless Cascade DFIG Wind Turbines in Faulty Grid Conditions—A Comparative Study," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 1002–1015, Oct. 2013
- [10] S. Bayhan, P. Kakosimos, and M. Rivera, "Predictive torque control of brushless doubly fed induction generator fed by a matrix converter," in *2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018)*, 2018
- [11] W. Xu, J. Gao, Y. Liu, and K. Yu, "Model predictive current control of brushless doubly-fed machine for stand-alone power generation system," in *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017
- [12] Y. Zhang and H. Yang, "Model-Predictive Flux Control of Induction Motor Drives With Switching Instant Optimization," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 3, pp. 1113–1122, Sep. 2015
- [13] R. Vargas, J. Rodriguez, C. A. Rojas, and M. Rivera, "Predictive Control of an Induction Machine Fed by a Matrix Converter With Increased Efficiency and Reduced Common-Mode Voltage," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 2, pp. 473–485, Jun. 2014

در واقع در روش برداری با وجود ۸ ضریب PI، برای رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب، ۸ انتخاب مناسب و سازگار با یکدیگر باید صورت می‌گرفت. که در این روش این بلوک‌های در دسترس حذف گردید.

- عدم نیاز به PWM در روش MPVC.

در این روش فرمان‌های کلیدزنی مبتنی بر تابع بهینه ساز، صورت می‌گیرد. نیازی به تولید موج حامل و مقایسه‌ی آن با مقدار مرجع نیست.

- نوسانات متعادل‌تر در حالت پایدار

در روش‌های کنترل پیش‌بین ولتاژی به دلیل پیش‌بینی متغیرها، مقادیر مرجع دقیق‌تری بدست می‌آید که نتیجه‌ی آن نوسانات متعادل‌تر در حالت پایدار حول مقدار مرجع است.

مراجع

- [1] H. Abdolrahimi and D. Arabkhaburi, "A Novel Model Predictive Voltage Control of Brushless Cascade Doubly-Fed Induction Generator in Stand-Alone Power Generation System," vol. 34, no. 05, pp. 901–907, 2021.
- [2] R. A. McMahon, P. C. Roberts, X. Wang, and P. J. Tavner, "Performance of BDFM as generator and motor," *IEE Proceedings-Electric Power Appl.*, vol. 153, no. 2, pp. 289–299, 2006
- [3] P. C. Roberts, R. A. McMahon, P. J. Tavner, J. M. Maciejowski, and T. J. Flack, "Equivalent circuit for the brushless doubly fed machine (BDFM) including parameter estimation and experimental verification," *IEE Proceedings-Electric Power Appl.*, vol. 152, no. 4, pp. 933–942, Feb. 2005
- [4] R. A. McMahon, X. Wan, E. Abdi-Jalebi, P. J. Tavner, P. C. Roberts, and M. Jagiela, "The BDFM as a Generator in Wind Turbines," in *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Aug. 2006
- [5] J. Poza, E. Oyarbide, I. Sarasola, and M. Rodriguez, "Vector control design and experimental evaluation for the brushless doubly fed machine," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 3, no. 4, pp. 247–256, 2009

- [14] G. Abad, M. Á. Rodríguez, J. Poza, M. A. Rodriguez, and J. Poza, "Two-level VSC-based predictive direct power control of the doubly fed induction machine with reduced power ripple at low constant switching frequency," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 570–580, Jun. 2008
- [15] Xiao-Bing Kong, Lin Wang, and X.-J. Liu. "Predictive control for DFIG-