

مدل سازی سیستم کنترلی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای با استفاده از مبدل VSI و روش فضای حالت

سید محمدحسن حسینی^۱

سینا اسلامی^۲

چکیده

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای نقش مؤثری در ذخیره‌سازی انرژی، پایداری و کنترل سیستم قدرت ایفا می‌کنند. در این تحقیق مدل سازی و شبیه‌سازی یک واحد دور متغیر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ۱۸۰ مگاواتی نیروگاه آزاد انجام شده است که در آن از مبدل‌های اینورتر منبع ولتاژ به جای روش قدیمی سیکلوکانورترها استفاده شده است. طرح اصلی تحقیق از طریق کنترل اینورترهای سه سطحی منبع ولتاژی بر اساس روش فضای حالت صورت می‌گیرد که هدف، کنترل مبدل سه سطحی منبع ولتاژ و نگهداری ولتاژ DC در یک مقدار ثابت است. در ساختار پیکربندی سیستم از یک مبدل سه فاز AC/DC/AC برای کنترل و تغییر ولتاژ و فرکانس استفاده شده است. در سیستم کنترلی مبدل منبع ولتاژ کلاسیک و مدل فضای حالت برای کنترل توان راکتیو، جریان و ولتاژ DC استفاده می‌شود. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار مطلب انجام شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که توان راکتیو کنترل شده با استفاده از روش فضای حالت منجر به بهبود زمان پاسخ‌گویی به توان راکتیو شبکه نسبت به روش کلاسیک می‌شود. همچنین کنترل جریان از روش فضای حالت ارائه شده عملکرد قابل قبولی را نسبت به کنترل کلاسیک دارد.

واژه‌های کلیدی

مبدل AC/DC/AC، منبع ولتاژ اینورتری (VSI)، مدل کنترلی فضای حالت.

*۱. عضو هیئت علمی گروه برق - قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، smhh110@azad.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق - قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

مقدمه

با توجه به افزایش تقاضا و محدودیت منابع سوخت سنتی (سوخت‌های فسیلی) و گسترده‌گی شبکه قدرت و با توجه به اهمیت پایداری شبکه و حفاظت از شبکه، نیاز به منابع انرژی تجدید پذیر احساس می‌شود لذا نقش نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای برای رسیدن به این هدف بسیار ضروری است (کو آنگ^۱ و همکاران، ۲۰۰۷). هم‌اکنون در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای و سایر نیروگاه‌های آبی که از مولد سنکرون با مبدل فرکانس استاتیکی استفاده می‌شود. موضوع کاربرد ماشین با فناوری سرعت متغیر مطرح است (کاوکابانی^۲ و همکاران، ۲۰۱۰). مزایای این نیروگاه‌ها عبارت‌اند از افزایش راندمان بهینه در تولید و مصرف، پایداری و تعادل شبکه و سرعت بالای پاسخگویی به نیاز شبکه در شرایط حساس (شامل سامانه‌های هیدرولیکی، الکتریکی و کنترلی). مطالعات مختلفی در ارتباط با سیستم هیدرولیکی نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای از جمله نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای با سرعت متغیر انجام شده است (فانگ^۳ و همکاران، ۲۰۰۸). در این مورد ژنراتورهای سنکرون و مغناطیس دائم اهمیت فوق‌العاده‌ای برای تولید الکتریسیته با استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر دارند (استیمر^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). از مهم‌ترین دستاوردهای نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای با سرعت متغیر امکان تغییر توان جذب‌شده از شبکه در حالت پمپی در محدوده مجاز (۳۰ درصد توان نامی) است که سبب کنترل فرکانس شبکه با بازده بالای پمپ می‌شود. (ایوانسکی و کوزارا^۵، ۲۰۰۸). همچنین در صورت بروز خطا در شبکه اینورتر قابلیت بهتری در کنترل نیروگاه و حذف اغتشاشات رخ داده در شبکه ایفا می‌کند که نتیجه افزایش قابلیت اطمینان است (پورتلو^۶ و همکاران، ۲۰۰۶).

در این تحقیق، کنترل‌کننده‌های ولتاژ و فرکانس برای اجرای آسان، در یک سیستم دیجیتالی از قبیل DSP طراحی شده‌اند. طرح اصلی تحقیق از طریق کنترل اینورترهای سه سطحی منبع ولتاژی بر اساس روش فضای حالت صورت می‌گیرد هدف اصلی، کنترل مبدل سه سطحی منبع ولتاژ و نگهداری ولتاژ DC در یک مقدار ثابت است. سیکلوکانورترها مبدل‌های مستقیمی هستند که از ترستورها به‌عنوان عناصر کلیدزنی

استفاده می‌کنند. فرکانس خروجی سیکلوکانورتر تقریباً ۳۳ درصد فرکانس ورودی است. به همین دلیل این مبدل مستقیم نمی‌تواند برای استارت ماشین به کار رود؛ اما مبدل ولتاژ VSI چنین محدودیتی ندارد و می‌تواند برای استارت ماشین در حالت موتور استفاده شود. برای این کاربرد، استاتور ماشین آسنکرون اتصال کوتاه می‌شود و روتور توسط سیستم سه فاز تغذیه می‌شود. در این حالت نیازی به SFC برای راه‌اندازی نیست. در این تحقیق، ابتدا از روش کلاسیک برای به دست آوردن تابع تبدیل کلی سیستم و محل قرار گرفتن قطب‌ها استفاده شده است و از روش فضای حالت برای کنترل توان راکتیو و ولتاژ DC استفاده می‌شود. در اصل برای پایداری کلی سیستم سعی در پایداری نقاط ناپایدار سیستم (قطب‌های ناپایدار به‌دست‌آمده از تابع کلی سیستم) شده است. بر این اساس دو هدف برای سیستم VSI در نظر گرفته شده است، ۱- نگهداری ولتاژ DC در یک مقدار مشخص و ۲- کنترل توان راکتیو در یک مقدار ثابت. این روش در مواردی که اصلاح ضریب قدرت با دقت بالا و پاسخ دینامیکی سریع نیاز است استفاده می‌شود. بر این اساس ابتدا ساختار کلی سیستم از جمله ساختار مبدل و مدل دینامیکی ماشین شرح داده شده است، سپس معادلات فضای حالت به‌کاررفته برای کنترل سیستم بیان شده و در پایان تابع تبدیل‌های موردنیاز به‌دست‌آمده است.

مواد و روش‌ها

ساختار کلی سیستم

در ابتدا مدل به دو بخش ترانسفورماتوری و ماشینی تقسیم شده و ساختار مربوط به هر قسمت تشریح گردیده است. شکل (۱) شمای کلی سیستم الکتریکی را نشان می‌دهد. هدف اصلی این بخش کنترل توان راکتیو از طریق مبدل‌های پشت به پشت با فرض ثابت ماندن ولتاژ DC بدون در نظر گرفتن توان اکتیو است. برای این منظور از روش پارک (تغییر مرجع ۳ فاز به محورهای d-q) استفاده شده است. محور d مربوط به توان اکتیو و ولتاژ DC و محور q مربوط به توان راکتیو است که با ژنراتور القایی دوسوتغذیه و اینورتر منبع ولتاژ سه سطحی در

⁴ Steimer

⁵ Iwanski & Koczara

⁶ Portillo

¹ Kuang

² Kawkabani

³ Fang

$$v_{bs}(t) = R_s i_{bs}(t) + \frac{d\psi_{bs}(t)}{dt} \quad (2)$$

$$v_{cs}(t) = R_s i_{cs}(t) + \frac{d\psi_{cs}(t)}{dt} \quad (3)$$

در روابط فوق R_s = مقاومت استاتور، $i_{as}(t)$ ، $i_{bs}(t)$ و $i_{cs}(t)$ = جریان فازهای مختلف استاتور و $v_{as}(t)$ ، $v_{bs}(t)$ و $v_{cs}(t)$ = ولتاژهای لحظه‌ای سه فاز و $\psi_{as}(t)$ ، $\psi_{bs}(t)$ و $\psi_{cs}(t)$ = شارهای الکتریکی استاتور.

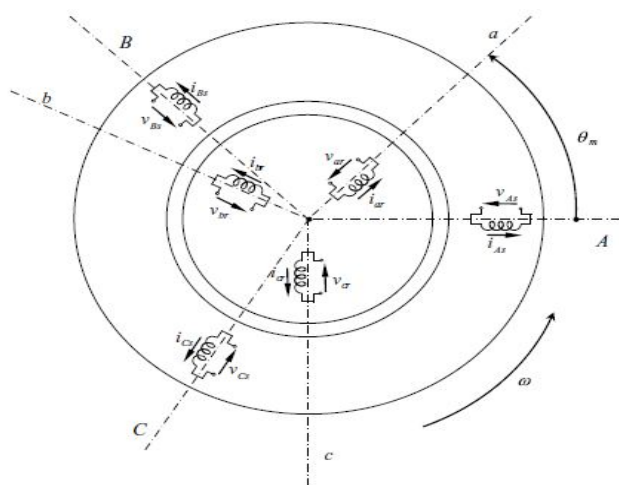
ω_s فرکانس زاویه‌ای سیستم است که به وسیله شبکه فشار قوی تحمیل می‌گردد. برای رتور داریم:

$$v_{ar}(t) = R_r i_{ar}(t) + \frac{d\psi_{ar}(t)}{dt} \quad (4)$$

$$v_{br}(t) = R_r i_{br}(t) + \frac{d\psi_{br}(t)}{dt} \quad (5)$$

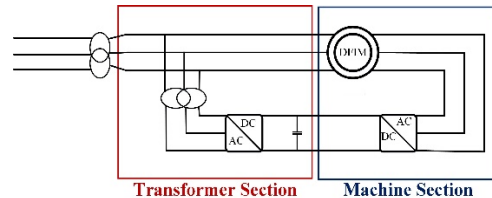
$$v_{cr}(t) = R_r i_{cr}(t) + \frac{d\psi_{cr}(t)}{dt} \quad (6)$$

که در آن R_r = مقاومت انتقالی از رتور به استاتور، $i_{ar}(t)$ ، $i_{br}(t)$ و $i_{cr}(t)$ = جریان‌های انتقالی با فازهای a و b و c از استاتور به رتور، $v_{ar}(t)$ ، $v_{br}(t)$ و $v_{cr}(t)$ = ولتاژهای انتقالی از استاتور به رتور و $\psi_{ar}(t)$ ، $\psi_{br}(t)$ و $\psi_{cr}(t)$ = شارهای الکتریکی رتور. تحت شرایط راه‌اندازی سیستم با حالت پایدار، امنه رتور شامل فرکانس زاویه‌دار و ثابت یا ω_r است. در این تحقیق همواره یک ساختار کلی از ماشین دو سو تغذیه با فرض انتقال پارامترها از سمت رتور به استاتور در نظر گرفته شده است.

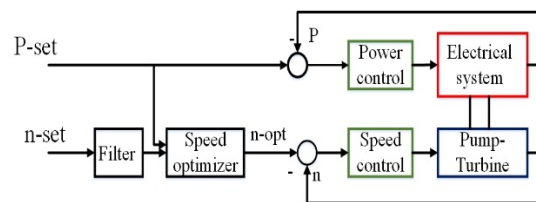


شکل (۳): سیم‌پیچی‌های ایده آل سه فاز (استاتور و رتور) ماشین دو سو تغذیه

سمت رتور مشخص شده است. همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است توان رآکتیو و ظرفیت ولتاژ توسط جریان اولیه ترانسفورماتور (در اینورتر سمت چپ) انجام می‌شود و مهم‌ترین نقش حالت بخش ماشینی کنترل سرعت و توان رآکتیو است. شکل (۲) ساختار کلی حالت ژنراتوری را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مدل الکتریکی نیروگاه سرعت متغیر



شکل (۲): ساختار کلی حالت ژنراتوری

بررسی ساختار VSC

کانستانتوپولوس^۱ و همکاران (۲۰۱۴)، به مطالعه مبدل با استفاده از فناوری‌های جدید، مانند مبدل‌های چند سطحی پرداخته‌اند. این توپولوژی‌های جدید در میان مزایای دیگر، اساساً موجب افزایش توان و ولتاژ به کار گرفته شده توسط مبدل می‌شوند. استراتژی کنترل به کار گرفته شده برای مبدل طرف شبکه دو هدف اصلی را که شامل کنترل ولتاژ باس و کنترل توان‌های اکتیو و رآکتیو (مبادله شده بین رتور ماشین و شبکه) است را دنبال می‌کند (دانیالی و همکاران، ۲۰۱۴).

مدل دینامیکی ماشین دو سو تغذیه

در شکل (۳) مدل استاندارد و ساده شده سیم‌پیچ‌های رتور و استاتور یک ماشین دو سو تغذیه و در شکل (۴) مدار معادل الکتریکی آن نشان داده شده است (کومار^۲، ۲۰۱۵). بر اساس مدل استاندارد فوق، می‌توان مقدار ولتاژهای لحظه‌ای استاتور و جریانات و شار الکتریکی دستگاه ژنراتور را توسط روابط زیر محاسبه نمود:

$$v_{as}(t) = R_s i_{as}(t) + \frac{d\psi_{as}(t)}{dt} \quad (1)$$

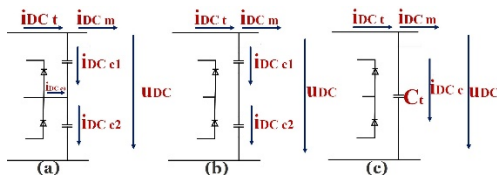
² Kumar

¹ Kanstantopoulos

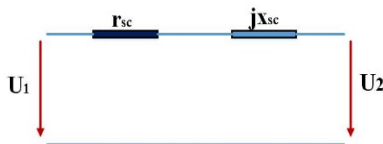
مدل سازی سیستم کنترلی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای با استفاده از مبدل VSI و روش فضای حالت ۱۵

بخش ترانسفورماتوری، i_{DCt} = مجموع جریان DC از طرف بخش مبدل ترانسفورماتوری، i_{DCm} = مجموع جریان DC ورودی به بخش ماشینی مبدل منبع ولتاژ سه سطحی، i_{DCc1} ، i_{DCc2} = جریان DC هر کدام از خازن‌ها و i_{DC0} = جریان DC مؤلفه صفر.

در ابتدا برای طراحی فرض می‌شود که $i_{DC0} = 0$ (که مربوط به بخش نامتعادلی ولتاژ خازن‌ها می‌شود)، بنابراین مقدار i_{DCc1} و i_{DCc2} برابر خواهند شد. سپس می‌توان مدار معادلمان را از شکل ۷.a به شکل ۷.c تغییر داد و با استفاده از مدار معادلی که از حذف جریان مغناطیس‌کنندگی به صورت شکل (۸) به دست می‌آید، مقادیر ولتاژ و جریان‌های لازم به دست خواهند آمد. شکل‌های (۷) و (۸) فرآیند این مسئله را نشان می‌دهد.



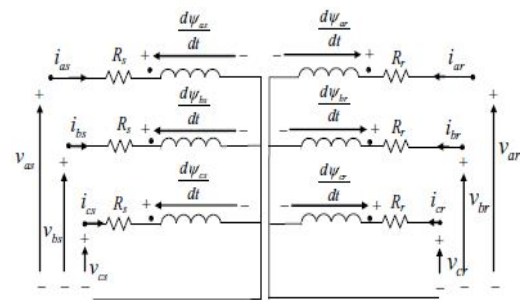
شکل (۷): مدار معادل با فرض $i_{DC0} = 0$ و برابر کردن i_{DCc1} و i_{DCc2}



شکل (۸): مدل پارامتری با حذف جریان مغناطیس‌کنندگی

معادلات پایه

ابتدا معادلات پایه به همراه فرض‌های به‌کاررفته در این مدار معادل ارائه و در ادامه معادلات مربوط به کنترل جریان و کنترل توان رآکتیو بیان می‌شود. سپس تابع تبدیل‌های به‌کاررفته در هر قسمت برای شبیه‌سازی در محیط برنامه به دست می‌آید. تمام قطب‌های به‌کاررفته در تابع تبدیل سیستم برای پایداری محاسبه شده است. سیستم در مرحله اول قبل از انتخاب کنترلرهای مناسب به صورت ناپایدار است که سعی می‌شود در اولین گام با کنترلر PID سیستم را به صورت مناسبی کنترل نمود. باید توجه داشت با توجه به اینکه سیستم، یک سیستم چند متغیره است برای کنترل آن بهتر



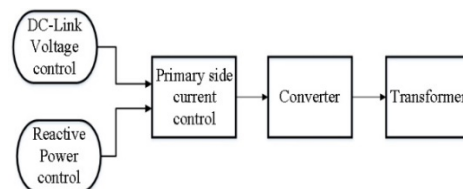
شکل (۴): مدار معادل الکتریکی ماشین دو سو تغذیه

معادلات فضای حالت سیستم

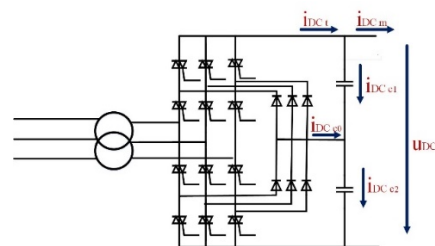
حصول بلوک دیاگرام‌ها در بخش‌های ترانسفورماتوری و ماشینی با استفاده از روش زیر امکان‌پذیر است:

(۱) روش کلاسیک و (۲) روش کنترل فضای حالت که هر دو روش دارای فرم یکسانی هستند. شکل (۵) بلوک تنظیم روند نمای در حالت کنترلی سیستم را نشان می‌دهد. در این روش‌ها از مدل پارک^۱ (گانیش و همکاران^۲، ۲۰۱۴) برای تغییر فرم ۳ فاز به محورهای ۲ فاز (d-q) استفاده می‌شود که از طریق قرار گرفتن بر روی فازور ولتاژ u_1 می‌توان در نظر گرفت:

$u_{1d} = 1$ و $u_{1q} = 0$. متغیرهای به‌کاررفته در این سیستم در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل (۵): تنظیم بلوک روند نمای سیستم



شکل (۶): معرفی پارامترهای سیستم

پارامترهای به‌کاررفته در این مدل عبارت‌اند از: i_1 ، u_1 = ولتاژ و جریان خط در سمت اولیه ترانسفورماتور، i_2 ، u_2 = ولتاژ و جریان خط در سمت ثانویه ترانسفورماتور، q = توان رآکتیو ناشی شده از بخش ترانسفورماتور، u_{DC} = ولتاژ DC در انتهای

مقادیر پارامترهای مدار معادل سیستم و استفاده از معادله (۸) می‌توان مقدار i_1 را محاسبه نمود که با استفاده از آن جریان خروجی بخش ترانسفورماتوری به دست خواهد آمد. با صرف نظر از تلفات برای توان اکتیو داریم:

$$P = U_{DCt} i_{DCt} = u_{1d} i_{1d} \quad (9)$$

$$q = u_{1d} i_{1q} \quad (10)$$

و در نهایت با استفاده از شکل (۶) مقدار جریان خروجی DC به دست آورده می‌شود.

$$i_{DCc} = i_{DCt} - i_{DCm} = C_t S U_{DC} \quad (11)$$

لازم به ذکر است که تمام پارامترها در شبیه‌سازی برای توان ۱۸۰ مگاواتی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای به کاررفته است.

هدف اصلی در این قسمت بعد از پیدا کردن روابط پایه در مدار معادل، به دست آوردن تابع تبدیل ابتدا به صورت روش کلاسیک و سپس پیدا کردن تابع تبدیل‌های لازم در روش فضای حالت و پیدا کردن قطب‌های آن جهت پایداری سیستم در شبیه‌سازی پایانی است. به همین دلیل کنترل جریان به وسیله کنترل توان راکتیو به دست خواهد آمد که در ادامه تحقیق به آن پرداخته می‌شود.

کنترل جریان

این روش شامل رگولاتورهای P و PI و I است که برای طراحی آن تابع سیستم در حالت حلقه باز است و یکی از مشکلات این روش این است که رگولاتورهای استاندارد می‌توانند یک قطب یا یک جفت از قطب‌ها را جبران کنند (در حالتی که در تابع تبدیل سیستم رگوله شده بیش از یک قطب وجود دارد). برای انجام این عمل ابتدا کنترل جریان به وسیله کنترل توان راکتیو به دست خواهد آمد و سپس به وسیله آن بخش ماشینی و ترانسفورماتوری حاصل خواهد شد.

بلوک دیگرام تابع انتقال برای کنترل جریان در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل $G_{i1}(s)$ سیستم رگوله شده قرار دارد که بخش ترانسفورماتوری آن به وسیله معادله (۸) تشریح می‌شود. $G_{pE1}(s)$ قسمت تبدیلی (قسمت مبدل سه سطحی منبع ولتاژ با ثابت‌های زمانی کوچک $(T_{pE1}(s))$) است؛ و در نهایت $G_{R1}(s)$ رگولاتور جریان که باید طراحی شود.

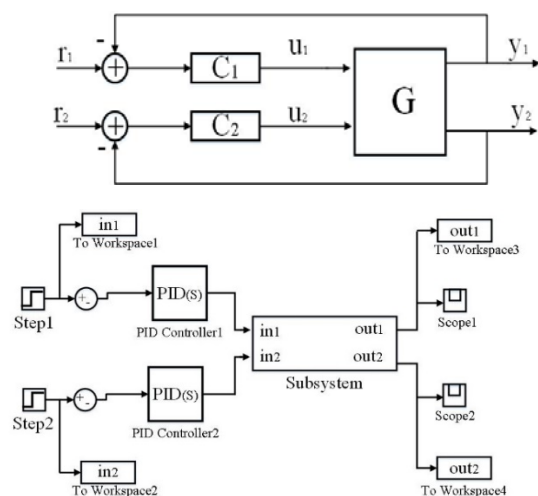
است که تأثیر ورودی و خروجی‌ها بررسی گردد. مرحله طراحی کنترلر در این سیستم با استفاده از روش کنترل غیرمتمرکز است به این صورت که پس از تعیین ورودی و خروجی مطلوب ابتدا ورودی و خروجی موردنظر کنترل شده و کنترلر بدون اعمال به ورودی و خروجی دیگر تنظیم می‌شود و سپس ورودی خروجی بعدی با حضور کنترلر اولی تنظیم می‌شود. به عبارت ساده‌تر با استفاده از یک کنترلر PID سعی می‌شود که خروجی از ورودی مرجع تبعیت نماید. در گام اول طراحی باید ورودی اول، خروجی اول را کنترل کند که به عنوان نمونه در شکل (۹) اصول و طراحی به کاررفته در ورودی و خروجی سیستم با کنترلر PID نشان داده شده است. در ابتدا برای به دست آوردن معادلات پایه با استفاده از مدار معادل ساده شده شکل (۹)، فرض بر این است که مقدار قاب مرجع بر روی ولتاژ U_1 قرار گرفته است و با استفاده از قرار گرفتن دو مؤلفه $u_{1d} = 0$ و $u_{1q} =$ زاویه مرجع حاصل از معادلات پارک به دست خواهد آمد.

$$u_n = u_1 \quad (7)$$

سپس معادلات لازم برای به دست آوردن ولتاژ و جریان با استفاده از شکل (۸) حاصل می‌شود که به وسیله آن می‌توان مقدار جریان DC خروجی از حالت اولیه ترانسفورماتوری را به دست آورد:

$$U_2 = -r_{sc} i_1 - s \frac{x_{sc}}{\omega_n} i_1 - j x_{sc} i_1 + u_n \quad (8)$$

که در این رابطه $\omega_n = 2\pi f_n$ و مقدار f_n مقدار فرکانس شروع به کار شبکه است. سپس با استفاده از

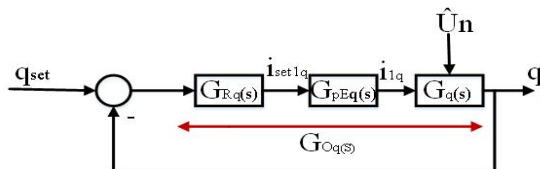


شکل (۹): اصول و طراحی به کاررفته در ورودی و خروجی سیستم با کنترلر PID در روش غیرمتمرکز

کنترل توان رآکتیو است (T_{peq}) و در نهایت تابع $G_{Rq}(s)$ رگولاتور ارائه شده برای کنترل توان رآکتیو است. با توجه به معادلات (۷) و (۱۰) می‌توان $G_q(s)$ را به صورت زیر به دست آورد.

$$G_q(s) = \frac{q}{i_q} = -u_{1d} \quad (۱۷)$$

با توجه به فرض اولیه در مدل پارک، مقدار $u_{1d} = 1$ در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۱): بلوک دیاگرام تابع انتقال برای کنترل توان رآکتیو

$\hat{U}_n =$ اغتشاشات است و مانند کنترل ولتاژ، تابع G_{pEq} به وسیله ثابت زمانی کنترل جریان (T_{pE1}) کنترل می‌شود.

$$G_{pEq}(s) = \frac{1}{1+sT_{pE1}} = \frac{1}{1+sT_{pEq}} \quad (۱۸)$$

به دلیل اینکه سیستم کنترل توان رآکتیو دارای رفتار تناسبی است، از جبران ساز انتگرالی I استفاده می‌شود.

$$G_{Rq}(s) = \frac{1}{sT_{iq}} \quad (۱۹)$$

بنابراین تابع کنترلی حلقه باز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$G_{Oq}(s) = \frac{1}{sT_{iq}} \frac{1}{1+sT_{pEq}} u_{1d} \quad (۲۰)$$

لینک DC

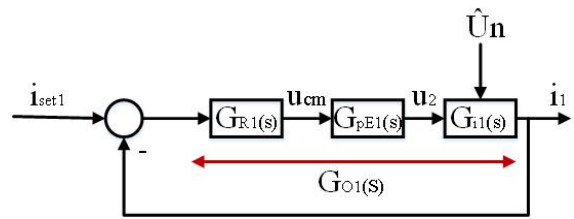
لینک DC با توجه به انرژی ذخیره‌شده در خازن (ترکیبی از چند خازن)، به حفظ یک ولتاژ ثابت در پایانه‌های آن تلاش می‌کند. شکل (۱۲) سیستم لینک DC را نشان می‌دهد. به منظور استخراج مدل لینک DC، ولتاژ باس DC باید محاسبه شود. این ولتاژ وابسته به جریان عبوری از خازن است:

$$V_{bus} = \frac{1}{C_{BUS}} \int i_c dt \quad (۲۱)$$

و جریان عبوری از خازن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i_c = i_{r_dc} - i_{gd} - i_{res} \quad (۲۲)$$

در رابطه فوق، i_{res} = جریان عبوری از مقاومت، i_{gd} = جریان DC از لینک DC به شبکه و i_{r_dc} = جریان DC از روتور به



شکل (۱۰): بلوک دیاگرام تابع انتقال برای کنترل جریان

با استفاده از معادله (۸) خواهیم داشت:

$$i_1 = - \frac{u_2}{r_{sc} + j f_1 x_{sc} + s \frac{x_{sc}}{\omega_n}} + \frac{\hat{U}_n}{r_{sc} + j f_1 x_{sc} + s \frac{x_{sc}}{\omega_n}} \quad (۱۲)$$

در این رابطه $\hat{U}_n =$ اغتشاشات و مقدار f_1 برحسب پریونیت است. بر همین اساس می‌توانیم مقدار تابع تبدیل بلوک دیاگرام $G_{i1}(s)$ را به دست آورد:

$$G_{i1}(s) = \frac{i_1}{u_2} \frac{-1}{r_{sc}} \frac{1}{1 + (j f_1 \omega_n + s) \frac{x_{sc}}{\omega_n r_{sc}}} \quad (۱۳)$$

$$G_{pE}(s) = \frac{u_2}{u_{cm}} = \frac{U_{DC}}{1 + s T_{pE1}} \quad (۱۴)$$

مقادیر مرجع توان اکتیو و رآکتیو با مقادیر محاسبه‌شده مقایسه و به کنترل‌کننده‌های هیستریزس اعمال می‌گردد. نتایج خروجی از مقایسه کننده‌های هیستریزس به همراه موقعیت شار استاتور به عنوان ورودی به جدول کلیدزنی اعمال می‌شود. سپس بردار ولتاژ مناسب توسط جدول کلیدزنی تعیین شده و سیگنال‌های مناسب به اینورتر اعمال می‌شود. در ادامه محاسبات رگولاتور باید بتواند قطب ایجادشده در تابع تبدیل کلی سیستم را که به صورت $(1 + (j f_1 \omega_n + s) \frac{x_{sc}}{\omega_n r_{sc}})$ است، جبران نماید.

$$G_{R1} = \frac{1 + (j f_1 \omega_n + s) T_{n1}}{s T_{i1}} \quad (۱۵)$$

در نهایت تابع تبدیل کلی سیستم به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$G_{O1} = \frac{1 + (j f_1 \omega_n + s) T_{n1}}{s T_{i1}} \frac{U_{DC}}{1 + s T_{pE1}} \frac{-1}{r_{sc}} \frac{1}{1 + (j f_1 x_{sc} + s) \frac{x_{sc}}{r_{sc} \omega_n}} \quad (۱۶)$$

کنترل توان رآکتیو

با توجه به مدل پارک و روند نمای ارائه شده برای کنترل جریان، مقدار توان رآکتیو در مدل سازی پارک بر روی محور q مدل خواهد شد. با توجه شکل (۱۱) و بلوک دیاگرام ارائه شده برای به دست آوردن تابع تبدیل توان رآکتیو، $G_q(s)$ مدل کلی سیستم تنظیم‌شده بر اساس معادله (۸) به دست خواهد آمد. $G_{pEq}(s)$ ، مجموع ثابت‌های زمانی ارائه شده در

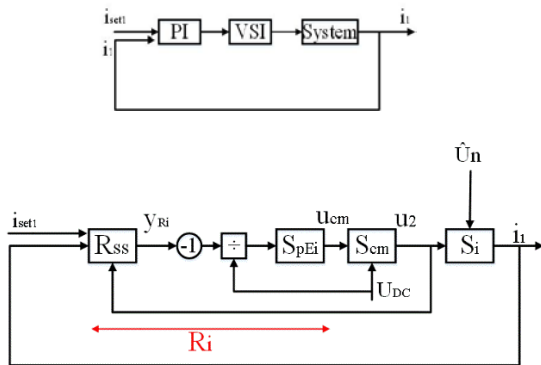
ضریب‌های پارامترها مقدار قطب‌های سیستم مشخص می‌شوند.

$$y_{Ri} = -k_f i_1 - k_u u_2 + k_{Ri} x_{Ri} + k_{wi} i_{set1} - k_{vi} \hat{u}_n \quad (25)$$

$$\frac{dx_{Ri}}{dt} = \frac{1}{T_E} (i_{set1} - i_1) \quad (26)$$

که T_E زمان اندازه‌گیری شده برای جبران ساز است. سپس مقدار ضرایب به دست آورده می‌شود.

$$k_i = \left[(4\rho_f^2 - w_n^2) T_{pEi} - \frac{1}{T_{sc}} - jw \left(1 - \frac{T_{pEi}}{T_{sc}} \right) \right] I_{sc} \quad (27)$$



شکل (۱۴): بلوک دیاگرام فضای حالت برای کنترل جریان با استفاده از جبران سازها

$$k_{Ri} = 2\rho_f^3 I_{sc} T_{pEi} T_E \quad (28)$$

با استفاده از معادلات سیستم در فضای حالت شبیه‌سازی سیستم انجام می‌شود.

$$L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + L\omega i_q + u_d - u_{ed} = -Ri_d + L\omega i_q + S_d u_{dc} - u_{ed} \quad (29)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - L\omega i_d + u_q - u_{eq} = -Ri_q - L\omega i_d + S_q u_{dc} - u_{eq} \quad (30)$$

$$C \frac{du_{ed}}{dt} = -i_{zd} + c\omega u_{eq} i_d \quad (31)$$

$$C \frac{du_{eq}}{dt} = -i_{zq} - c\omega u_{ed} + i_q \quad (32)$$

که در این روابط S_d و S_q توابع سوئیچینگ^۱ در محورهای d-q هستند و امپدانس^۲ Z مربوط به بار سه فاز و u_{dc} مربوط به ولتاژ DC است. اگر داشته باشیم: $x_1 = Li_d, x_2 = Li_q, x_3 = cu_{ed}, x_4 = cu_{eq}$ در این صورت معادلات (۲۹)، (۳۰)، (۳۱) و (۳۲) به صورت زیر خواهند بود:

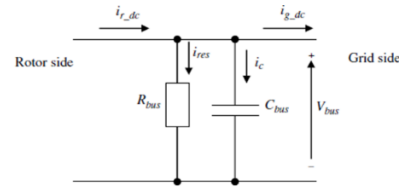
$$\frac{dx_1}{dt} = -Ri_d + L\omega i_q + u_d - u_{ed} = -R \frac{x_1}{L} + \omega x_2 + S_d u_{dc} - \frac{x_3}{C} \quad (33)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -Ri_q - L\omega i_d + u_q - u_{eq} = -R \frac{x_2}{L} - \omega x_1 + S_q u_{dc} - \frac{x_4}{C} \quad (34)$$

لینک DC. از سوی دیگر، جریان‌های DC می‌توانند از طریق جریان‌های DC خروجی مبدل‌ها محاسبه شوند:

$$i_{g_dc} = S_{a_g} i_{ag} + S_{b_g} i_{bg} + S_{c_g} i_{cg} \quad (23)$$

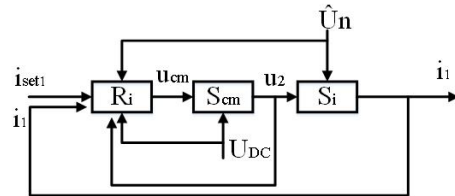
$$i_{r_dc} = -S_{a_r} i_{ar} - S_{b_r} i_{br} - S_{c_r} i_{cr} \quad (24)$$



شکل (۱۲): سیستم لینک DC

روش کنترل فضای حالت

در کنترل فضای حالت اغتشاش وارده به سیستم و اندازه‌های آن در بلوک جبران ساز برای جبران قطب‌های ایجادشده در تابع تبدیل سیستم استفاده می‌شود که از نظر دینامیکی پایداری و عملکرد بهتری دارد. در ابتدا حالت حلقه باز تابع عملکرد سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد و بعد از مشخص شدن قطب‌های سیستم، رگولاتورهای مناسب برای جبران این قطب‌ها در تابع تبدیل قرار می‌گیرند. اساس استفاده از روش کنترل فضای حالت، بر پایه منبع ولتاژ (VSI) فرکانس کنورترها است. بلوک دیاگرام کنترلی برای کنترل جریان از طریق فضای حالت در شکل (۱۳) ارائه شده است.



شکل (۱۳): بلوک دیاگرام فضای حالت برای کنترل جریان

S_i بلوک مربوط به سیستم تنظیم شده است که بر اساس معادله (۸) بیان شده است. \hat{u}_n اغتشاشات وارده به سیستم است و S_{cm} بلوک سیستم کنترلی را نشان می‌دهد که در اینجا کنترل بر مبنای منبع ولتاژ است. R_i جبران ساز جریان است که ساختار داخلی آن در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در این شکل R_{ss} بران ساز فضای حالت انتگرالی است. بلوک دیاگرام فضای حالت برای کنترل جریان با استفاده از جبران ساز در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با استفاده از

² Impedance

¹ Switching functions

- انتگرال گیر جریان عبوری از محور d-q
- مجموعه رگولاتور فضای حالت برای کنترل جریان
- حذف‌کننده نویز سمت ترانسفورماتوری
- تبدیل معکوس معادلات پارک برای ایجاد سیگنال فرمان
- متعادل‌سازی به‌منظور ایجاد سیگنال فرمان
- تولید پالس
- تنظیم فرکانس

$$\frac{dx_3}{dt} = -i_{zd} + c\omega u_{eq} + i_d = -i_{zd} + \omega x_4 + \frac{x_1}{L} \quad (35)$$

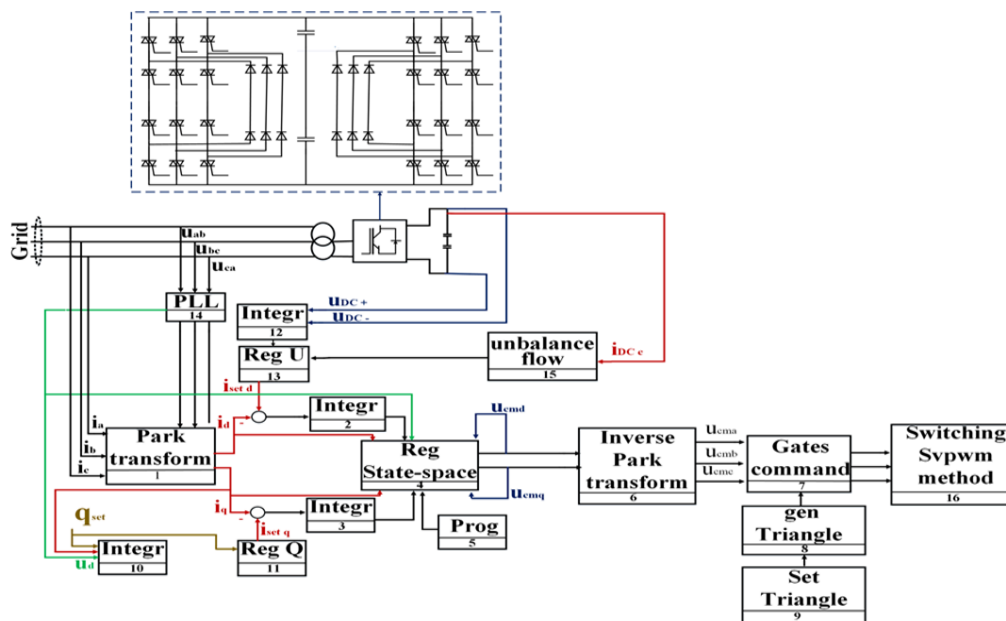
$$\frac{dx_4}{dt} = -i_{zq} - c\omega u_{ed} + i_q = -i_{zq} - \omega x_3 + \frac{x_2}{L} \quad (36)$$

البته می‌توان از فیدبک^۱ حالت تابع سیستم استفاده نمود که در این روش ورودی تابعی از جریان سلف‌ها و ولتاژ خازن‌ها است که قانون کنترلی سیستم را تشکیل می‌دهد.

ارائه نتایج

شبیه‌سازی برای یک واحد ۱۸۰ مگاواتی دور متغیر از نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد انجام شده است. پارامترهای لازم مدار در جدول (۱) ارائه شده‌اند. شکل (۱۵) ساختار کلی سیستم برای بخش ترانسفورمتری را نشان می‌دهد؛ که قسمت‌های مختلف آن عبارتند از:

- تبدیل پارک از سمت جریان اولیه
 - انتگرال گیر جریان در جهت محور d
- (گیت‌های ۱۳-۲۴)



شکل (۱۵): ساختار کلی کنترلی سیستم برای بخش ترانسفورماتوری

$$C = 0.3F$$

همچنین اغتشاش شبیه‌سازی شده دارای میانگین ۰/۸- با واریانس ۵ درصد است که با استفاده از تابع تصادفی به‌دست‌آمده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های زیر ارائه شده است. شکل (۱۶) کنترل توان راکتیو با استفاده از روش‌های فضای حالت و روش کلاسیک را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل حاکی از بهبود زمان پاسخ‌گویی به نیاز

اطلاعات عددی به‌کاررفته در این شبیه‌سازی بر اساس مقادیر نامی ترانسفورماتور پیرونیته شده‌اند. این مقادیر نامی عبارت‌اند از:

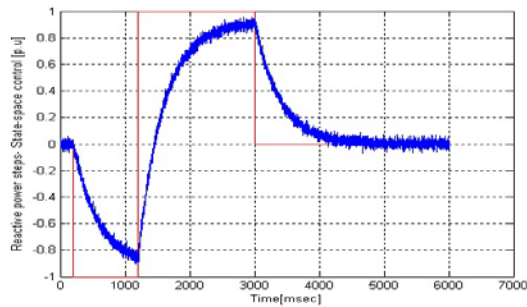
$$S_n = 23 \text{ MVA}$$

$$U_{DCn} = 4220 \text{ V}$$

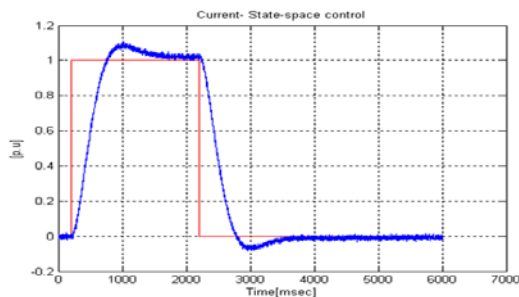
$$U_1 = 15750$$

$$U_2 = 2000$$

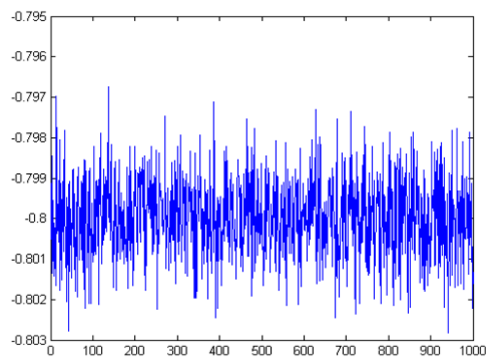
¹ Feedback



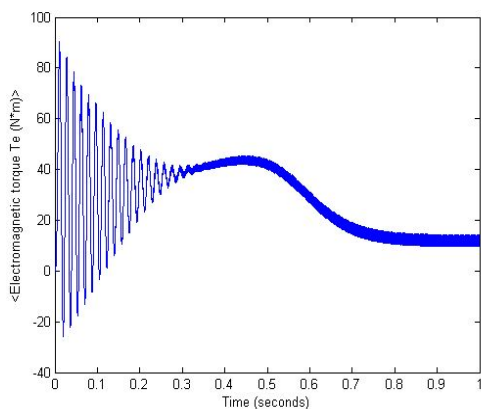
شکل (۱۶): کنترل توان رآکتیو با استفاده از روش کنترلی فضای حالت



شکل (۱۷): کنترل جریان با استفاده از روش کنترلی فضای حالت



شکل (۱۸): اغتشاش ورودی به سیستم با میانگین ۰.۸- و واریانس ۵ درصد



شکل (۱۹): گشتاور ایجادشده در ماشین القایی

توان رآکتیو شبکه با روش کنترل فضای حالت است. در شکل (۱۷) کنترل جریان از روش فضای حالت ارائه شده است که مقایسه نتایج حاکی از تفاوت اندک این روش با روش کلاسیک، باوجود کنترل بهتر توان رآکتیو در فضای حالت است.

جدول (۱): مقادیر مؤلفه‌های به‌کاررفته در شبیه‌سازی یک واحد

نیروگاه ۱۸۰ مگاواتی دور متغیر تلمبه ذخیره‌ای

مؤلفه	مقدار
Mutual Reactance (Pu)	۰/۵
Rotor Reactance (Pu)	۰/۱۰۱
Rotor Resistance (Pu)	۰/۰۱۴۵۳
Stator Reactance (Pu)	۰/۱
Rotor Resistance (Pu)	۰/۰۱۳۹۳
Rotor Voltage (kV)	۳
Stator Voltage (kV)	۱۸
Active Power (MW)	۱۸۰
Rotor inertia (tm^2)	۱۲۰۰
Coupling	$Yy0$
Apparent power (MVA)	۲۶۷

شکل (۱۸) اغتشاش شبیه‌سازی شده ورودی به سیستم (\hat{U}_n) را نشان می‌دهد. شکل‌های (۱۹) و (۲۰) به ترتیب گشتاور ایجادشده در ماشین القایی و جریان رتور ماشین القایی را نشان می‌دهند. در شکل (۲۱) ولتاژ حاصل از محور dq در استاتور ارائه شده است. اطلاعات نیروگاه تلمبه‌ای-ذخیره‌ای آزاد در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): اطلاعات کلی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد

Type of pump- turbine	فرانسسیس
Number of pump-turbine	۳
Number of pump-turbine with single speed	۲
Number of pump-turbine with variable speed	۱
Range of adjustable speed	۵٪ تا ۶۰٪
Rated rotating speed	۵۰۰ Rpm
Number of poles	۱۲
Rated frequency	۵۰ Hz
Maximum gross head	۴۷۱/۵m
Minimum gross head	۳۸۷/۵m

دو سو تغذیه دور متغیر افزایش یافته است اما سرعت، پایداری نیروگاه، راندمان کلی و جزئی نیروگاه بهبود یافته است.

منابع

19- Danayali S., Hosseini S. H and Gharehpetian G. B. (2014). "New Extendable single-stage Multi input DC-DC/AC Boost Converter." IEEE Transactions on power electronics. 2(29), 775-788.

20- Fang, H., Chen, L., Dlakavu, N. and Shen, Z. (2008). "Basic modeling and simulation tool for analysis of hydraulic transients in hydroelectric power plants." IEEE Transaction on Energy Conversion. 3(23), 834-841.

21- Ganesh, R., Kumar, R. and Kaviya, K. (2014). "Fuzzy Logic Controller for Doubly Fed Induction Generator Based Wind Energy Conversion System." International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 6(3), 13078-13087.

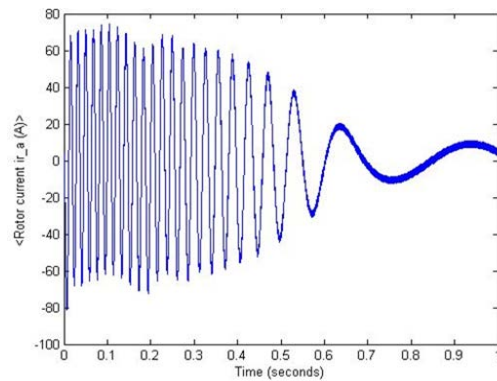
22- Iwanski, G. and Koczara, W. (2008). "DFIG-based power generation system with UPS function for variable-speed applications." IEEE Transaction Industrial Electronics. 8(55), 3047-3054.

23- Jen-Kuang, L., Ying L., Wen-Lung H. and Kao, W. S. (2007). "Modeling and Dynamic Simulations of Doubly Fed Adjustable-Speed Pumped Storage Units." IEEE Transaction on Energy Conversion. 2(22), 250-258.

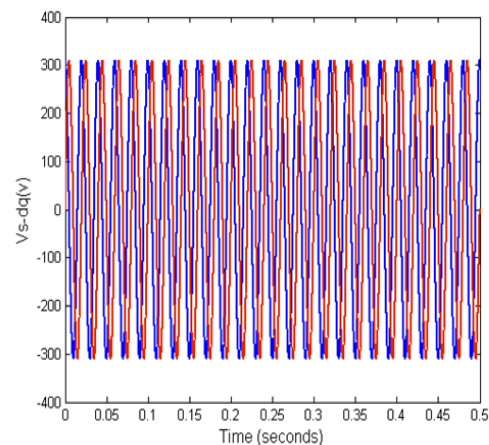
24- Kawkabani, B., Pannatier, Y., Nicolet, C and Simond J. (2010). "Investigation of strategies for variable-speed pumped-turbine units by using a simplified model of converters." IEEE Transaction Industrial electronics. 9(57), 3039-3049.

25- Konstantopoulos, G. C., Alexandridis, A. T. and Mitronikas, E. D. (2014). "Bounded nonlinear stabilizing speed regulator for VSI-fed induction motors in field-oriented operation." IEEE Transaction on Control System Technology. 3(22), 1112-1121.

26- Kumar, V. S. S. and Thukaram, D. (2015). "Accurate Steady-State Representation of a Doubly Fed Induction Machine." IEEE Transactions on Power Electronics. 10(30), 5370-5375.



شکل (۲۰): جریان رتور ماشین القایی



شکل (۲۱): ولتاژ حاصل از محور dq (V_s) در تبدیل سیستم

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یکی از واحدهای نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ۱۸۰ مگاواتی دور متغیر به کمک نرم‌افزار مطلب شبیه‌سازی شده است. در راستای اجرای این شبیه‌سازی، تمام بخش‌های ماشینی و ترانسفورماتوری لحاظ شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که توان رآکتیو کنترل فضای حالت در مقایسه با نتایج حاصل از کنترل کلاسیک حاکی از بهبود زمان پاسخ‌گویی به نیاز توان رآکتیو شبکه در کنترل فضای حالت است. همچنین کنترل جریان از روش فضای حالت، ارائه شده است که نشان‌دهنده تفاوت اندک این روش با روش کلاسیک با وجود کنترل بهتر توان رآکتیو در فضای حالت است. نتایج مدل‌سازی و شبیه‌سازی حاکی از قابلیت بهتر کنترل شبکه و دینامیک بالاست که در مقایسه با نیروگاه‌های دور ثابت قابلیت مانور و انعطاف بیشتری دارد. همچنین میزان اغتشاش ورودی به سیستم نیز کاهش یافته است. همچنین استفاده از تجهیز VSI به علت سرعت بالای پاسخ‌گویی با اصلاح برخی از محدودیت‌های آن (مانند کلید زنی) رو به افزایش است بنابراین گرچه هزینه‌های اولیه و بهره‌برداری واحدهای نیروگاه

27- Portillo, R. C., Prats, M. M., León, J. I., Sánchez J. A., Carrasco, J. M., Galván, E. and Franquelo L. G. (2006). "Modeling strategy for back-to-back three-level converters applied to high-power wind turbines." IEEE Transaction Industrial Electronics. 5(53), 1483–1491.

28- Steimer, P. K., Senturk, O., Aubert, S. and Linder, S. (2014). "Converter-fed synchronous machine for pumped hydro storage plants." IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp.4561-4567.

29- Xibo, Y., Jianyun, C. and Yongdong, L. (2011). "A Converter-Based Starting Method and Speed Control of Doubly Fed Induction Machine with Centrifugal Loads." IEEE Transactions on Industry Applications. 3(47), 1409-1418.

Modelling of Pumped Storage Power Plant Control System by Applying VSI and State Space Model

Syed Mohammad Hasan Hosseini¹

Sina Eslami²

Abstract

Pumped storage power plants play an important role in energy storage, power system stability and control of power system. This paper presents modeling and simulation of a 180 MW unit of Azad pumped storage power plant with variable speed machines. In this regard, voltage source inverters are used instead of traditional cyclo-converters. The main purpose of this research is to control of three level voltage source inverters base on state space model. The aims of this strategy are to control the voltage source inverters and maintain DC voltage at a constant value. Three phase AC/ DC/ AC converter are used in the system configuration structure in order to control and to change the voltage and frequency. Classic voltage source converter control system with state-space model have been applied to control reactive power, current and DC voltage. The simulation results have been achieved by using Matlab software. The simulation results have shown that the reactive power control with applying the state space model would improve the response time to the required reactive power network compared with classical methods. Also the current control with applying state-space method provided acceptable performance compared to classical control.

Keywords

AC/ DC/ AC converter, Voltage Source Inverter (VSI), State-space control

1. Faculty Member of Electrical Department, South of Tehran Branch, Islamic Azad university, smhh110@azad.ac.ir

2. MSc student, Electrical Department, South of Tehran Branch, Islamic Azad university.

Received: 2016/10/02

Accepted: 2017/03/15