

تحلیل رفتار دینامیکی و طراحی کنترل کننده برداری برای یک نیروگاه تلمبه ذخیره ای دور متغیر در مد بهره برداری ژنراتوری و موتوری

محسن علیزاده بیدگلی^۱ ناصر طالبی^۲ امیر احمری نژاد^۳

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
m.alizadeh.b@iausr.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
n.talebi@live.com

۳- استادیار- گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران
a.ahmarinejad@iauctb.ac.ir

چکیده: در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر بر خلاف نیروگاه‌های دور ثابت که ماشین سنکرون به کار گرفته می‌شود، از یک موتور-ژنراتور القایی از دو سو تغذیه به همراه یک مبدل پشت به پشت استفاده می‌شود. در این مقاله در ابتدا مدل ریاضی اجزا مختلف نیروگاه تلمبه ذخیره ای دور متغیر ارائه می‌شود. بخش‌های کنترلی، مبدل سمت ماشین و مبدل سمت شبکه، هر یک شامل دو مسیر کنترلی برای محورهای $d-q$ می‌باشند که هر مسیر شامل یک حلقه خارجی و یک حلقه داخلی است، لذا حلقه‌های داخلی و خارجی استخراج و تابع تبدیل هر یک از آن‌ها ارائه می‌شوند. برای تنظیم ضرایب کنترلی، تابع تبدیل حلقه باز و حلقه بسته بخش‌های کنترلی مختلف از مبدل‌های سمت ماشین و شبکه و همچنین پمپ-توربین استخراج و با رسم دیاگرام روت لوکاس و تنظیم مکان صفر و قطب‌های سیستم، پایداری آن تضمین می‌گردد. در نهایت به منظور صحت سنجی طراحی انجام گرفته، یک نیروگاه تلمبه ذخیره ای دور متغیر در محیط Matlab/Simulink/SimPowerSystem شبیه سازی و نتایج آن برای آزمون تغییر بار پله ای در دو مد بهره برداری موتوری ژنراتوری ارائه می‌شود. نتایج شبیه سازی صحت عملکرد سیستم کنترلی طراحی شده را تایید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر، ماشین القایی از دوسو تغذیه، کنترل برداری

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.177

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محسن علیزاده بیدگلی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - اتوبان خلیج فارس - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) - شهرری - دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در مورد منطق کنترلی PSHP دور متغیر، مراجع [۷]، [۸] روش‌هایی را برای استخراج سرعت بهینه در مد ژنراتوری و درجه ورودی بهینه در مد موتوری ارائه داده‌اند. در [۷] با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مقدار سرعت بهینه استخراج و نتایج عملی برای نمونه آزمایشگاهی PSHP دور متغیر ارائه شده است. ولی الگوریتم کنترلی و نحوه طراحی آن بررسی نشده است. منطق کلی کنترلی یک PSHP دور متغیر در مد ژنراتوری و مد موتوری در مرجع [۹] و نتایج پیاده سازی این الگوریتم کنترلی برای نیروگاه‌های PSHP دور متغیر واقع در ژاپن و آلمان به ترتیب در مراجع [۱۰] و [۱۱] ارائه شده‌اند. با این حال، در هیچ یک از مقالات ذکر شده نحوه طراحی و جزییات سیستم کنترلی مورد نظر یافت نمی‌شود. در مراجع [۱۲] نیروگاه‌های PSHP دور متغیر با ماشین DFIM و دور ثابت با ماشین سنکرون شبیه سازی شده و در پدیده‌هایی مثل نوسانات فرکانس مد محلی بین ژنراتورها، فرکانس بین ناحیه‌ای، مد پیچشی روی شفت ژنراتور، نوسانات آب در لوله مکش توربین، کنترل توان راکتیو و شرایط گذر از خطا بررسی و مقایسه شده‌اند. همچنین مرجع [۱۳] عملکرد توربین در سرعت فرار^۲ و مدهای ناپایدار آن را شبیه سازی و بررسی کرده است. ولی همه این مقالات فقط به معرفی کلی استراتژی کنترلی و ضرایب کنترلی اکتفا نموده‌اند و در خصوص نحوه تنظیم این ضرایب و محدوده پایداری آن‌ها نتایجی ارائه نشده است.

تنظیم ضرایب کنترلی تناسبی و انتگرالی در حلقه‌های مختلف بر اساس معیارهای قدر مطلق حاصلضرب خطا در زمان و همچنین بهینه مقارن در مرجع [۱۴] پیشنهاد شده است. از آنجا که تنظیم ضرایب کنترلی تناسبی و انتگرالی به مقادیر ماشین و شبکه بستگی داشته و تغییر آنها می‌تواند پاسخ طراحی شده برای سیستم را تحت تاثیر قرار دهد، لذا روش‌های مقاوم در برابر نامعینی از جمله روش‌هایی مانند کنترل تطبیقی مبتنی بر مدل مرجع^۴ [۱۵]، کنترل کننده برداری مبتنی بر مد لغزشی^۵ [۱۶]، کنترل کننده برداری مبتنی بر فیدبک خطی ساز^۶ [۱۷] و یا کنترل کننده برداری مبتنی بر بازگشت به عقب^۷ [۱۸] می‌توانند عملکرد کنترل برداری سنتی را بهبود دهند. همچنین در [۱۹] یک کنترل کننده غیر خطی برای گذر از خطا در نیروگاه تلمبه ذخیره ای دور متغیر طراحی شده است. با این حال، همانطور که قبلاً اشاره شد، یکی از متداول‌ترین روش‌های موجود برای

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای (PSHP)^۱ سنتی مثل نیروگاه سیاه بیشه در ایران با استفاده از موتور-ژنراتورهای سنکرون در لحظات کم باری با عملکرد در مد موتوری انرژی الکتریکی اضافی موجود در شبکه را به عنوان یک بار بزرگ مصرف کرده و آب موجود در سطح پایین دست را به سطح بالادست پمپ می‌کنند [۱]. این عملکرد باعث می‌شود تا نیروگاه بتواند در پیک بار با تولید انرژی به کمک نیروگاه‌های تولید کننده توان آمده و بتواند منحنی بار را اصلاح کند. همچنین با اضافه کردن یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای به شبکه، ظرفیت بسیار زیادی به مقدار ظرفیت مورد نیاز برای تنظیم فرکانس شبکه اضافه می‌شود. در حالیکه یک نیروگاه حرارتی تا ۵ درصد قدرت نامی‌اش می‌تواند به کنترل فرکانس کمک کند [۲]. طبق جدول ۱، در سال‌های اخیر ماشین‌های القایی از دوسو تغذیه (DFIM)^۲ [۳] با عملکرد در حالت دور متغیر توانسته‌اند تا حدودی در پروژه‌های جدید جای ماشین‌های سنکرون را گرفته و عملکرد نیروگاه را تا حدود زیادی بهبود بخشند. از جمله موارد اساسی برای استفاده از نیروگاه‌های دور متغیر می‌توان به این موارد اشاره کرد: ۱- بهبود بازدهی نیروگاه در مد ژنراتوری و به خصوص در بار کم ۲- توانایی مشارکت نیروگاه برای کنترل فرکانس در مد پمپی ۳- انعطاف بالای واحد در کنترل توان راکتیو در مدهای بهره‌برداری مختلف ۴- کاهش تلفات در مد بهره‌برداری کندانسوری با کاهش سرعت عملکرد.

بخش الکتریکی یک نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر شامل یک ماشین القایی روتور سیم پیچی شده و یک کانورتر پشت به پشت می‌باشد. این ماشین‌ها در نیروگاه‌های بادی دور متغیر نیز کاربرد دارند، که DFIM به کار رفته در نیروگاه‌های بادی و تلمبه ذخیره‌ای در سطح توان و به تبع آن سطح ولتاژ کانورتر و استراتژی کنترلی متفاوت می‌باشند. در مورد مدلسازی نیروگاه‌های مذکور، مدل‌هایی که برای DFIM در مقالات مختلف ارائه شده‌اند به مدل مرتبه ۵ و یا مدل مرتبه ۳ معروف هستند [۴]. همچنین مقالات متعددی در زمینه مدلسازی توربین‌های آبی منتشر شده است [۵]، [۶]. در این مقالات تجهیزات اصلی غیر الکتریکی به کار رفته مثل سطوح بالا و پایین دست، مخزن فشار شکن، لوله های عبور آب (پنستاک) و پمپ-توربین مدل شده‌اند.

جدول (۱): نمونه‌های نصب شده از نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر نصب شده در نقاط مختلف

نام واحد	توان پ/ت ^۱ (MW)	توان م/ت ^۲ (MVA)	نوع مبدل ^۳ (MVA)	نوع مبدل (MVA)	رنج سرعت (rpm)	کشور	سازنده ^۴	سال نصب
Narude	۲۲	۲۲	-	۲۲	۲۱۰-۱۹۰	ژاپن	H	۱۹۸۷
Yagisawa	۸۲×۲	۸۵×۲	۱	۸۵×۲	۱۵۶-۱۳۰	ژاپن	T	۱۹۹۰
Takami	۱۰۵	۱۴۰	۲	۲۴/۳	۲۵۴-۲۰۹	ژاپن	M	۱۹۹۲
Ohkawachi	۳۹۲×۱	۳۹۵×۱	۱	۷۲	۳۹۰-۳۳۰	ژاپن	H	۱۹۹۳
	۴۰۰×۱	۳۹۵×۱			۴۰۰-۲۴۰			
Shiobara	۳۳۰	۳۶۰	۱	۵۱/۱	۳۹۴-۳۵۶	ژاپن	T	۱۹۹۵
Okukiyotsu	۳۴۰	۳۴۵	۲	۳۱/۵	۴۵۰-۴۰۸	ژاپن	T	۱۹۹۶
Yanbaru	۳۰	۳۱/۵	۲	۳/۹۶	۴۷۷-۴۲۳	ژاپن	T	۱۹۹۹

۲۰۰۳	V	آلمان	۳۴۷-۳۰۰	-	۱	۳۳۱×۲	۳۳۰×۲	Goldisthal
۲۰۰۵	-	ژاپن	۵۰۰	۵۰۰		۵۰۰		Kazunogawa
۲۰۰۸	ABB,M	اسلوونی	۶۳۶-۵۷۶	۱۹۵	۳	۱۹۵	۱۸۵	Avce
۲۰۰۸	M,H	ژاپن	۶۲۴-۵۷۶	۳۵۰.۳۷۰	۱.۳	۳۷۰.۳۵۰	۳۳۰.۳۴۰	Omarugawa
۲۰۱۵	T	ژاپن	-	۲۳۰	۲	۲۳۰	۲۲۸	Kyogoku
۲۰۱۵	A	سوئیس	۵۳۰-۴۷۰	-	۳	-	۲۰۵×۴	Linth-Limmern
۲۰۱۷	A	سوئیس	۴۵۹-۳۹۹	۱۷۰×۶	۳	۱۷۰×۶	۱۵۷×۶	Nant de Drance
۲۰۱۷	T	ژاپن	۵۲۰-۴۸۰	۴۷۵×۲	۲	۴۷۵×۲	۴۷۵×۲	Kazunogawa
۲۰۱۷	A	هند	۲۵۶-۲۱۴	۳۰۵×۴	۲	۳۰۶×۴	۲۵۰×۴	TEHRI
۲۰۲۰	-	آمریکا	-	۱۳۳×۳	۲	۱۳۳×۳	۱۳۳×۳	Iowa Hill

۱ توان پمپ-توربین (MW)

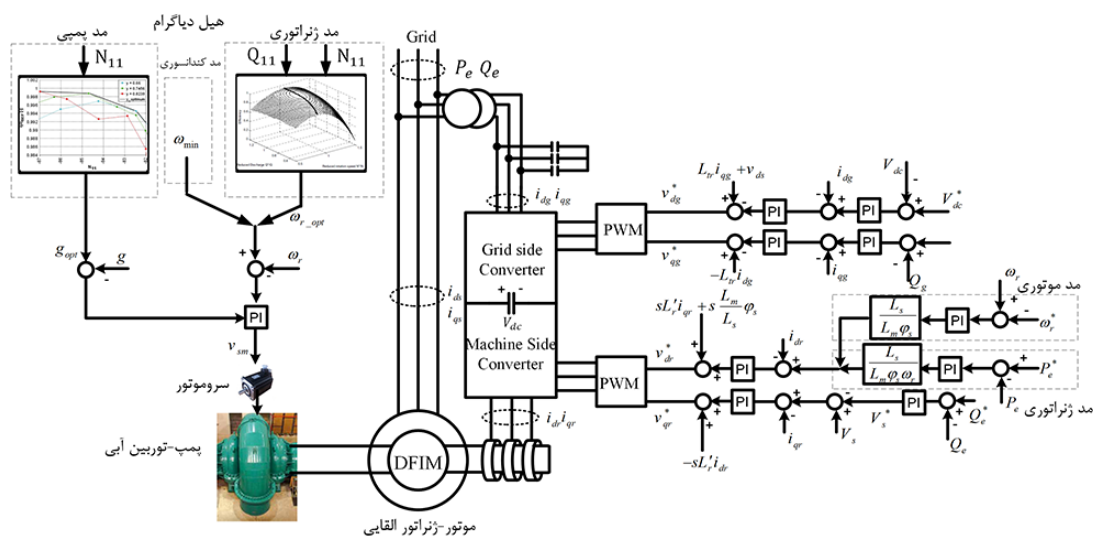
۲ توان موتور-ژنراتور

۳ نوع مبدل الکترونیک قدرت ۱-converter-Cyclo, ۲-VSI, back to back (VSI), ۳-GTO, back to back (VSI), ۴-IGCT, full converter (VSI)

۴ کارخانه سازنده: H. HITACHI, T. TOSHIBA, M. MITSUBISHI, V. VATECH, A. ALSTOM

جدول (۲): مقایسه کارهای انجام گرفته در مقالات منتشر شده جدید و مقاله فعلی

مرجع	سال	مزایا	معایب
[۱۲]	۲۰۱۰	مقایسه دو نیروگاه PSHP دور متغیر و دور ثابت از نظر فنی	عدم بررسی مد پمپی، عدم ارائه جزئیات سیستم کنترلی
[۲۰]	۲۰۱۰	ارائه سیستم کنترل کننده برداری برای یک PSHP دور متغیر برای مدهای ژنراتوری و پمپی و شبیه سازی	عدم بررسی جزئیات طراحی کنترل کننده، شبیه سازی با مدل ساده شده مبدل
[۲۱]	۲۰۱۲	طراحی سیستم MPPT برای PSHP دور متغیر با سایز کوچک	عدم طراحی کنترل کننده
[۲۲]	۲۰۱۶	مزایا و معایب استفاده از PSHP دور متغیر و دور ثابت	عدم دیدگاه فنی و جزئیات سیستم کنترلی
[۲۳]	۲۰۱۷	طراحی مناسب سیستم گروبار در PSHP دور متغیر به منظور افزایش پایداری گذرا در یک اتصال به شبکه ضعیف	عدم ارائه جزئیات کنترل کننده در شرایط دائمی، عدم بررسی مد پمپی
[۲۴]	۲۰۱۷	بررسی عملکرد دینامیکی PSHP دور متغیر در مد پمپی	عدم ارائه طراحی کنترل کننده در مد ژنراتوری
[۲۵]	۲۰۱۸	بررسی حالت راه اندازی و ترمز PSHP دور متغیر	عدم ارائه طراحی کنترل کننده در حالت دائمی
[۲۶]	۲۰۱۸	بررسی مروری ادوات الکترونیک قدرت برای استفاده در PSHP دور متغیر	عدم دیدگاه فنی و جزئیات سیستم کنترلی
[۵]	۲۰۱۹	بررسی مزایای PSHP دور متغیر برای کاهش نوسانات توربین بادی	عدم توضیح و جزئیات طراحی کنترل کننده برداری برای PSHP و عدم بررسی مد پمپی
[۲۷]	۲۰۲۰	بررسی تاثیر قابلیت اطمینان استفاده از سیستم قدرت ترکیبی PSHP و توربین بادی به صورت همزمان (به صورت سیستم HVDC)	عدم طراحی کنترل کننده و جزئیات مدل، در نظر نگرفتن مد پمپی، بررسی، عدم بررسی PSHP مبتنی بر DFIM
[۲۸]	۲۰۲۰	مروری بر مقالات منتشر شده برای قسمت های مختلف PSHP دور متغیر	عدم ارائه مشخصات فنی و جزئیات سیستم کنترلی
[۲۹]	۲۰۲۱	طراحی سیگنال کمکی گسترده به منظور افزایش پایداری سیگنال کوچک	عدم توضیح و جزئیات طراحی کنترل کننده برداری برای PSHP و عدم بررسی مد پمپی
[۱]	۲۰۲۱	بررسی مقایسه پایداری حالت گذرا برای PSHP دور متغیر و دور ثابت	عدم توضیح و جزئیات طراحی کنترل کننده برداری برای PSHP و عدم بررسی مد پمپی
مقاله فعلی	۲۰۲۱	طراحی کنترل کننده برداری برای یک PSHP دور متغیر برای مدهای ژنراتوری و پمپی و شبیه سازی PSHP با مدل دقیق، بررسی هر دو مد پمپی و ژنراتوری	عدم طراحی کنندهای غیر خطی



شکل (۱): شمای کلی از تجهیزات الکتریکی به کار رفته در یک واحد تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر و کنترل کننده آن

$$\begin{aligned} h_d &= \left(\frac{Q}{G}\right)^2 \\ h_f &= f_p Q^2 \\ h_s &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

که Q دبی آب ورودی به توربین، G دریچه ورودی توربین پریونیت شده، f_p ضریب اصطکاک تلفات هد هستند. همچنین بقیه پارامترها به صورت زیر تعریف می شوند.

$$G = A_t g \quad A_t = \frac{1}{(G_n - G_{nl})}$$

در انتها توان مکانیکی P_m تولید شده توسط توربین به صورت (۳) قابل تعریف است.

$$P_m = \eta_T p_{rT} h_d (q - q_{nl}) \quad (3)$$

که q_{nl} دبی آب ورودی به توربین در حالت بی باری بوده، η_T بازدهی توربین و p_{rT} یک ضریب ثابت برای تبدیل مبنای توربین به ژنراتور است که به صورت (۴) تعریف می شود.

$$p_{rT} = \frac{P_{nT}(MW)}{S_{nM}(MVA)} \quad (4)$$

که P_{nT} توان نامی توربین و S_{nM} توان ظاهری نامی ماشین است.

۲-۲- پمپ

در این بخش نحوه مدل کردن یک پمپ و بدست آوردن نقطه کار آن با توجه به نوع پمپ و سیستمی که در آن مورد استفاده قرار می گیرد بررسی و ارائه خواهد شد. نقطه کار یک پمپ همیشه از تلاقی منحنی مشخصه سیستمی که در آن نصب شده و منحنی مشخصه خود پمپ بدست می آید. معادله (۵) رابطه حاکم بر یک پمپ را براساس سرعت، دبی آب خروجی پمپ و هد خالص بین پمپ و سطح بالادستی نشان می دهد [۶]. معادله (۶) رابطه بین هد خالص سیستم که از مجموع بین هد اصطکاک و هد استاتیکی بدست می آید را با دبی خروجی پمپ نشان می دهد.

$$h_d = a_2 q^2 + a_1 \omega_r |q| + a_0 \omega_r \quad (5)$$

$$h_d = h_s + (f_e + f_g) q^2 \quad (6)$$

ضرایب a_2, a_1, a_0 ضرایب ثابتی هستند که بسته به نوع پمپ متفاوت بوده و برای تخمین منحنی پمپ به کار برده می شوند. همچنین ضرایب f_g و f_e به ترتیب ضرایب اصطکاک تلفات هد و تلفات در اثر بستن دریچه ورودی است. در انتها می توان مکانیکی مصرف شده توسط پمپ را توسط معادله نشان داد [۶].

سیستم کنترلی مبدل های پشت به پشت در کاربرد دور متغیر، استفاده از دو کنترل کننده برداری مجزا برای مبدل سمت ماشین و سمت شبکه می باشد [۱۹]. این کنترل کننده به دلیل سادگی و پیاده سازی ساده همچنان در سیستم های عملی به وفور استفاده می شود. در نهایت با توجه به جدول ۲ و پیشینه تحقیق مشخص گردید تاکنون مقاله ای به طور مشخص برای تنظیم ضرایب کنترلی تناسبی و انتگرالی در حلقه های مختلف برای یک نیروگاه PSHP مبتنی بر DFIM وجود ندارد. از این رو در این مقاله سعی می شود حلقه های داخلی و خارجی کنترل کننده برداری در یک نیروگاه PSHP دور متغیر استخراج و تابع تبدیل هر یک از آن ها ارائه شوند. همچنین برای تنظیم ضرایب کنترل کننده، تابع تبدیل حلقه باز و حلقه بسته بخش های کنترلی مختلف MSC^A ، GSC^A و پمپ-توربین ارائه و با رسم دیاگرام روت لوکاس و تنظیم مکان صفر و قطب های سیستم، پایداری آن تضمین شود.

در بخش دوم مدلسازی بخش های مختلف نیروگاه PSHP دور متغیر ارائه می شود. در بخش سوم یک کنترل کننده برداری برای یک نیروگاه PSHP با استفاده از مدلسازی انجام گرفته در بخش دوم طراحی می شود. در بخش چهارم نتایج شبیه سازی برای نیروگاه PSHP ۳۸۰ مگاوات آمپری ارائه می شود. در نهایت در بخش پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات ارائه می شود.

۲- مدلسازی

در این بخش مدل ریاضی قسمت های مختلف هیدرولیکی و الکتریکی برای طراحی کنترل کننده یک واحد PSHP دور متغیر ارائه می شوند. ساختار کلی یک PSHP دور متغیر در مدهای کاری مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۱- توربین

مدل اجزای پنستاک، سروموتور برای کنترل دریچه ورودی توربین، توربین (مدل غیر خطی IEEE) در این بخش ارائه می شود. با در نظر گرفتن ستون آب به صورت غیر الاستیک، مشخصه های پنستاک توسط معادلات اساسی زیر تعیین می شوند [۶].

$$\dot{q} = \frac{1}{T_w} (h_s - h_d - h_f) \quad (1)$$

که h_s ارتفاع استاتیک آب، h_d ارتفاع آب در ورودی توربین، h_f تلفات ارتفاع به دلیل وجود اصطکاک می باشد. همچنین T_w زمان شروع آب که طبق تعریف مدت زمان مورد نیاز برای آب در ارتفاع نامی h_n می باشد تا در پنستاک از حالت سکون به سرعت نامی U_n برسد. همچنین h_s ، h_d و h_f از روابط زیر بدست می آیند [۶].

$$\frac{L_{tr}}{\omega_b} \frac{di_{dg}}{dt} = -R_{tr} i_{dg} + L_{tr} i_{qg} - v_{dg} + v_{ds} \quad (10)$$

$$\frac{L_{tr}}{\omega_b} \frac{di_{qg}}{dt} = -R_{tr} i_{qg} - L_{tr} i_{dg} - v_{qg} \quad (11)$$

از طرفی دینامیک ولتاژ خازن لینک dc نیز از تعادل توان وارد شده از دو طرف مبدل سمت ماشین و شبکه نتیجه می شود [۳۰].

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{P_r}{V_{dc}} + \frac{P_g}{V_{dc}} \quad (12)$$

که P_g و P_r به ترتیب توان اکتیو سمت روتور و شبکه هستند و به صورت زیر تعریف می شوند.

$$P_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}, P_g = v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg}$$

۳- طراحی کنترل کننده برداری

۳-۱- مد ژنراتوری

در مد ژنراتوری کنترل کننده نیروگاه به سه قسمت مجزا تقسیم می شود.

۱- کنترل کننده MSC، ۲- کنترل کننده GSC، ۳- کنترل کننده توربین آبی (گاورنر). در مد ژنراتوری گاورنر در یک واحد PSHP دور متغیر وظیفه کنترل سرعت ژنراتور را بر عهده دارد. MSC کنترل توان تولیدی توسط واحد (مشارکت در کنترل فرکانس شبکه) و همچنین ولتاژ استاتور (کنترل توان راکتیو) را بر عهده دارد. کنترل کننده GSC نیز دارای وظایف کنترل ولتاژ خازن لینک dc و توان راکتیو مبادله شده از این مبدل را بر عهده دارد.

۳-۱-۱- کنترل کننده مبدل سمت ماشین

به طور کلی و با عدم صرف نظر کردن متغیرهای مشتق شار استاتور در محورهای dq و معادله (۸) برای مدار روتور به صورت (۱۳) باز نویسی می شود. همچنین توان اکتیو و راکتیو ژنراتور بر اساس رابطه (۱۴) قابل تعریف است [۱۹].

$$\begin{cases} v_{nd} = \left(R_r + \frac{L'_r}{\omega_b} \frac{d}{dt} \right) i_{nd} - s L'_r i_{nq} - s \underbrace{\frac{L_m}{L_s} \varphi_{sq} + \frac{L_m}{\omega_b L_s} \frac{d \varphi_{sd}}{dt}}_{E'_{nd}} \\ v_{nq} = \left(R_r + \frac{L'_r}{\omega_b} \frac{d}{dt} \right) i_{nq} + s L'_r i_{nd} + \underbrace{\frac{L_m}{\omega_b L_s} \frac{d \varphi_{sq}}{dt}}_{E'_{nq}} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{e-g} = \omega_r \frac{L_m}{L_s} \varphi_s i_{dr} \quad (14)$$

$$Q_{s-g} = -\frac{V_s^2}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} V_s i_{qr}$$

$$P_m = \frac{P_{rp}}{\eta_p} h_d q = \frac{P_{rp}}{\eta_p} (a_2 q^3 + a_1 \omega_r q |q| + a_0 q \omega_r^2) \quad (7)$$

که η_p بازدهی پمپ و P_{rp} یک ضریب ثابت برای تبدیل مبنای پمپ به موتور است که به صورت زیر تعریف می شود.

$$P_{rp} = \frac{P_{np} (MW)}{S_{nM} (MVA)}$$

که P_{np} توان نامی توربین و S_{nM} توان ظاهری نامی ماشین است.

۳-۲- مدلسازی ماشین DFIM

در یک ماشین القایی روتور سیم پیچی شده دو سیم پیچ سه فاز موجود است که سیم پیچ استاتور به ولتاژ شبکه و سیم پیچ روتور با ولتاژ اعمالی توسط مبدل سمت ماشین تغذیه می شود. در سیستم یکایی برای جهت قراردادی موتوری (جهت جریان به سمت داخل ماشین) معادلات ماشین در دستگاه مرجع چرخان با سرعت سنکرون به صورت زیر تعریف می شوند [۳۰].

$$V_{sdq} = R_s i_{sdq} + j \varphi_{sqd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d \varphi_{sdq}}{dt} \quad (8)$$

$$V_{rdq} = R_r i_{rdq} + j s \varphi_{rqd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d \varphi_{rdq}}{dt}$$

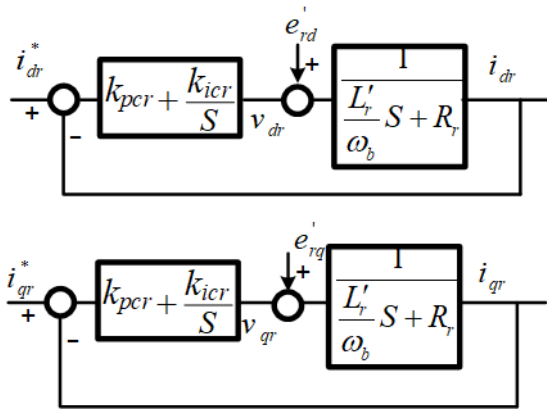
که

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases}$$

۴-۲- مدل ترانس تحریک و ولتاژ خازن لینک dc

برای مدل کردن قسمت مبدل سمت شبکه معمولاً به دلیل وجود اندوکتانس در مسیر مبدل شبکه (اندوکتانس ناشی ترانس تحریک در PSHP) از دینامیک جریان عبوری از اندوکتانس ها برای مدل کردن مبدل ها استفاده می شود و از دینامیک مبدل برای طراحی کنترل کننده صرف نظر می شود. البته همین موضوع را در مورد مبدل سمت ماشین نیز می توان مشاهده کرد. با نوشتن رابطه حلقه ولتاژ کرشلف (KVL) در بین ولتاژ مبدل و ولتاژ شبکه جریان عبوری از ترانس بدست می آید که با تبدیل این معادله به فضای dq معادلات زیر نتیجه خواهند شد. شایان توجه است که جهت جریان انتخابی از شبکه به ترانس تحریک مثبت فرض می شود [۳۰].



شکل (۲): حلقه کنترلی داخلی برای مبدل سمت ماشین

برای تنظیم ضرایب کنترلی تناسبی و انتگرالی از روش تقریب درجه اول برای کنترل حلقه بسته در حلقه جریان استفاده می‌شود. همانطور که در روش‌های طراحی کنترل کلاسیک از کنترل خطی یافت می‌شود، در این روش در ابتدا با انتخاب صفر PI قطب مورد نظر در سیستم را حذف کرده یا به عبارت دیگر صفر کنترل کننده بر اساس پهنای باند حلقه باز (β_{ol-i}) انتخاب می‌شود و سپس با استفاده از پهنای باند حلقه بسته (β_{cl-i}) مورد نظر برای حلقه جریان، ضرایب کنترلی محاسبه می‌شود. براین اساس می‌توان نوشت [۳۰]:

$$\frac{k_{ier}}{k_{pcr}} = \frac{\omega_b R_r}{L_r'} = \beta_{ol-i} \quad (18)$$

در سیستم‌های عملی برای پیاده‌سازی معمولاً پهنای باند بر اساس دو خاصیت انتخاب می‌شود. ۱- هر چه پهنای باند بزرگتر انتخاب شود سرعت پاسخ بیشتر خواهد بود (دنباله روی متغیر تحت کنترل از سیگنال مرجع بهتر است) ۲- با انتخاب پهنای باند بالا نویز و فرکانس‌های هارمونیک توسط سیستم فیلتر نخواهند شد. همچنین تجهیزات گرانتری برای پیاده‌سازی یک سیستم با پهنای باند بالا مورد نیاز است. لذا معمولاً فرکانس پهنای باند یک سیستم حلقه بسته حدود (۰/۲-۰/۱) از فرکانس سوئیچ زنی انتخاب می‌شود. در این مطالعه فرکانس سوئیچ زنی مبدل‌ها ۲۰ kHz انتخاب شده‌اند که بر این اساس ضرایب کنترلی به صورت (۱۹) محاسبه خواهند شد. مقدار اندوکتانس حالت گذرای روتور (L_r') $0.52 \left(L_r' \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \right) \right)$ بدست می‌آید.

همچنین در این مقاله مقادیر پهنای باند حلقه باز β_{ol-i} و حلقه بسته جریان β_{cl-i} (حدود ۵٪ برابر f_{sw}) به ترتیب ۱/۵ rad/sec و ۱۰۰۰ rad/sec در نظر گرفته شده‌اند، که k_{ier} و k_{pcr} به ترتیب از رابطه (۱۹) مقدار ۲/۵ و ۳/۱۴ بدست می‌آیند.

E_{rd}' و E_{rq}' در رابطه (۱۳) ولتاژهای القا شده روی سیم پیچ روتور هستند که شامل دو قسمت حالت دائمی (قسمت اول رابطه (۱۵)) و بخش گذرا (قسمت دوم رابطه (۱۵)) می‌باشند. بخش حالت دایمی آنها توسط سیگنال پیشخور اضافه شده به کنترل کننده جبران شده، ولی بخش گذرای آن که ناشی از تغییرات سریع در شار استاتور می‌باشد در مدار حلقه بسته جریان باقی خواهد ماند. جملات $-sL_r' i_{rd}$ و $sL_r' i_{rq}$ به ترتیب به عنوان کوپلینگ در محورهای dq نامیده می‌شوند.

$$E_{rd}' = -s \frac{L_m}{L_s} \phi_{sq} + \frac{L_m}{\omega_b L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \quad (15)$$

$$E_{rq}' = 0 + \frac{L_m}{\omega_b L_s} \frac{d\phi_{sq}}{dt}$$

بر اساس (۱۴) می‌توان گفت برای کنترل توان اکتیو و راکتیو توسط ولتاژهای محور dq از MSC، دو حلقه کنترلی پشت سرهم استفاده می‌شود. یعنی

$$P_{e-g} \propto i_{dr} \longrightarrow i_{dr} \propto v_{dr}$$

$$Q_{s-g} \propto i_{qr} \longrightarrow i_{qr} \propto v_{qr}$$

حلقه اول یا حلقه داخلی، حلقه کنترل جریان‌های روتور در محور dq می‌باشد که ورودی آن‌ها جریان روتور مرجع و خروجی آن ولتاژ روتور می‌باشد. معمولاً در مراجع این حلقه با نام حلقه سریع نامیده می‌شود. حلقه کنترلی دوم یا خارجی که حلقه کند نامیده می‌شود دارای ورودی توان اکتیو و راکتیو (ولتاژ استاتور) و خروجی آن جریان روتور مرجع می‌باشد [۱۹].

مجموع ولتاژ القا شده روی سیم‌پیچ روتور در حالت دایمی و کوپلینگ در محورهای مختلف را ترتیب به نام اغتشاشات روی محور d یعنی d_d و روی محور q یعنی d_q نامیده می‌شوند.

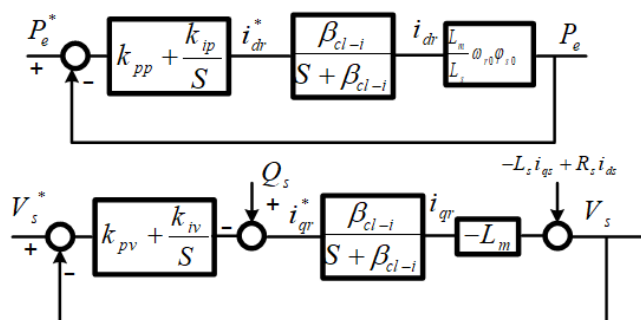
$$\left(\frac{L_r'}{\omega_b} S + R_r \right) i_{rd} = v_{rd} + \underbrace{sL_r' i_{rq} + s \frac{L_m}{L_s} \phi_{sq}}_{d_d} \quad (16)$$

$$\left(\frac{L_r'}{\omega_b} S + R_r \right) i_{rq} = v_{rq} - \underbrace{sL_r' i_{rd}}_{d_q}$$

با جبران سازی کامل اغتشاشات تعریف شده در محورهای dq یعنی (d_d و d_q)، تابع تبدیل i_{dr}/v_{dr} و i_{qr}/v_{qr} به صورت یک تابع درجه اول به صورت (۱۷) بدست خواهد آمد.

$$\frac{i_{dr}}{v_{dr}} = \frac{i_{qr}}{v_{qr}} = \frac{1}{\frac{L_r'}{\omega_b} S + R_r} \quad (17)$$

حلقه‌های کنترل جریان با در نظر گرفتن ولتاژ القایی روی سیم پیچ روتور در محورهای dq در حالت گذرا با عبارت e_{rd}' و e_{rq}' در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.



شکل (۴): حلقه کنترلی خارجی برای مبدل سمت ماشین

مجدداً با انتخاب صفر PI قطب مورد نظر در تابع تبدیل حلقه بسته جریان را حذف کرده و سپس با استفاده از پهنای باند حلقه بسته توان اکتیو (β_{cl-p}) و پهنای باند حلقه بسته ولتاژ (β_{cl-v})، ضرایب کنترلی محاسبه می‌شوند. یادآور می‌شود، پهنای باند حلقه بسته حلقه خارجی باید حدود ۱۰ درصد از پهنای باند حلقه بسته حلقه داخلی تعیین شود [۳۰] یعنی ۲۰۰ rad/sec. برای این اساس رابطه (۲۱) برای تعیین ضرایب کنترلی را می‌توان نوشت.

$$\begin{cases} \frac{k_{ip}}{k_{pp}} = \beta_{cl-i} \rightarrow 165 \\ k_{pp} \frac{L_m}{L_r} \omega_{r0} \phi_{i0} \beta_{cl-i} = \beta_{cl-p} \end{cases} \rightarrow 0.105 \quad (21)$$

طبق معادلات بدست آمده در (۲۱) k_{pi} و k_{pp} به ترتیب ۱۵/۷ و طراحی می‌شوند. همین مراحل برای حلقه کنترل ولتاژ نیز تکرار و ضرایب بدست آورده می‌شود.

$$\begin{cases} \frac{k_{iv}}{k_{pv}} = \beta_{cl-i} \\ k_{pv} \beta_{cl-i} L_m = 0.1 \beta_{cl-i} \end{cases} \quad (22)$$

طبق معادلات (۲۲)، k_{pi} و k_{pp} به ترتیب ۰/۲ و ۴ طراحی می‌شوند.

۳-۱-۲- کنترل کننده مبدل سمت شبکه

بلوک دیاگرام کنترل کننده حلقه داخلی و خارجی GSC به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند. مشابه بخش قبل در MSC، برای کنترل ولتاژ لینک dc و توان راکتیو توسط ولتاژهای محور dq از GSC، دو حلقه کنترلی پشت سرهم استفاده می‌شود [۳۰]. دینامیک GSC در محیط لاپلاس توسط معادلات (۲۳) و (۲۴) بیان می‌شوند.

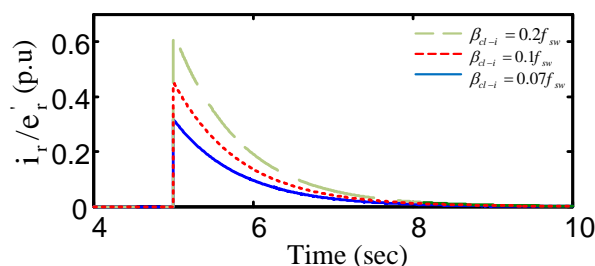
$$\left(\frac{L_{tr}}{\omega_b} S + R_{tr} \right) i_{dg} = -v_{dg} + \underbrace{L_{tr} i_{qg}}_{d_d} + v_{ds} \quad (23)$$

$$\begin{cases} k_{pcr} = \frac{L_r' \beta_{cl-i}}{\omega_b} \\ k_{icr} = k_{pcr} \beta_{ol-i} = k_{pcr} \frac{\omega_b R_r}{L_r'} \end{cases} \quad (19)$$

از طرفی تابع تبدیل حلقه بسته جریان روتور نسبت به ولتاژ القایی در حالت گذرا که در حین اغتشاشات ناگهانی بوجود می‌آید نیز به صورت (۲۰) بدست می‌آید.

$$\frac{i_{rd}}{e_{rd}} = \frac{i_{rq}}{e_{rq}} = \frac{S}{\frac{L_r}{\omega_b} (S + \beta_{ol-i})(S + \beta_{cl-i})} \quad (20)$$

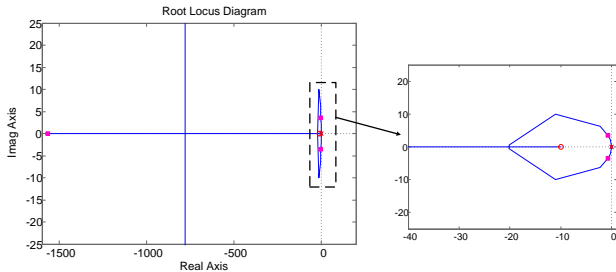
در تابع تبدیل (۲۰) می‌توان دید که پاسخ جریان روتور روی محورهای dq به پهنای باند حلقه باز، حلقه بسته و مقدار راکتانس حالت گذرا در سیم پیچ روتور (L_r') بستگی دارد. شکل (۳) پاسخ پله برای تابع تبدیل ولتاژ حالت گذرای القا شده در روتور و جریان روتور را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است هرچه پهنای باند حلقه بسته جریان روتور کمتر باشد، اثر اغتشاش (ولتاژ القایی روی سیم پیچ روتور) بر جریان روتور کمتر خواهد بود. لذا بین سرعت پاسخ سیستم و تاثیر اغتشاشات روی جریان روتور می‌بایست مصالحه‌ای برقرار شود.


 شکل (۳): پاسخ جریان روتور در مقابل اغتشاش ناگهانی از e_r'

با طراحی انجام شده می‌توان تابع تبدیل حلقه بسته جریان را به صورت $\frac{\beta_{cl-i}}{S + \beta_{cl-i}}$ که شبیه یک فیلتر پایین گذر با فرکانس گذر β_{cl-i} تخمین زد. در این صورت حلقه‌های کنترلی توان اکتیو و راکتیو را می‌توان به صورت شکل (۴) نشان داد. حلقه‌های داخلی جریان در کنترل توان اکتیو و ولتاژ استاتور شبیه یک فیلتر پایین گذر عمل می‌کنند و برای عملکرد مناسب حلقه‌های به این صورت، پهنای باند حلقه بسته ۱۰ درصد فرکانس گذر فیلتر انتخاب می‌شود، لذا پهنای حلقه بسته توان اکتیو و ولتاژ استاتور و یا به عبارتی حلقه‌های خارجی باید ۱۰٪ پهنای باند حلقه بسته جریان داخلی انتخاب شود [۳۰].

تبدیل مجدداً باز نویسی می شود. در نهایت مقادیر ضرایب کنترلی حلقه ولتاژ لینک dc به صورت (۲۹) نوشته می شوند.

$$\xi = \frac{V_s k_{pvdc}}{2CV_{dc0}\omega_n} \rightarrow \begin{cases} k_{pvdc} = \frac{2\xi\omega_n CV_{dc0}}{V_s} = 6.6 \\ \omega_n = \sqrt{\frac{V_s k_{ivdc}}{CV_{dc0}}} \rightarrow k_{ivdc} = \frac{CV_{dc0}\omega_n^2}{V_s} = 740 \end{cases} \quad (27)$$



شکل (۷): بلوک دیاگرام روت لوکاس برای صفر و قطبهای کنترل کننده حلقه بسته در مبدل سمت شبکه

تابع تبدیل حلقه بسته ولتاژ لینک dc نسبت به مقدار اغتشاش توان روتور نشان داده شده در شکل (۶) که در حین اغتشاش ناگهانی وجود می آید نیز به صورت (۲۸) بدست می آید:

$$\frac{V_{dc}}{(-P_r/V_{dc0})} = \frac{S^2(S + \beta_{cl-i})}{S^3 + \beta_{cl-i}S^2 + \frac{V_s k_{pvdc}\beta_{cl-i}}{CV_{dc0}}S + \frac{V_s k_{ivdc}\beta_{cl-i}}{CV_{dc0}}} \quad (28)$$

با تحلیل تابع تبدیل نشان داده شده و همچنین بلوک دیاگرام روت لوکاس برای صفر و قطبهای کنترل کننده حلقه بسته نشان داده شده در شکل (۷) به چند نکته می توان اشاره کرد.

- کاهش پهنای باند حلقه داخلی جریان و به تبع آن کاهش پهنای باند خارجی تاثیر اغتشاشات روی توان سمت روتور روی لینک dc را افزایش می دهد.
- با ثابت بودن پهنای باند حلقه داخلی جریان، کاهش پهنای باند حلقه خارجی تاثیر اغتشاش روی خروجی را افزایش می دهد.

در نهایت از تابع تبدیل حلقه بسته توان راکتیو می توان مقادیر ξ و ω_n را به صورت زیر نوشت.

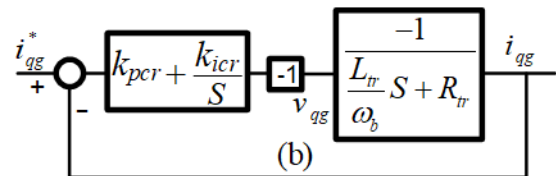
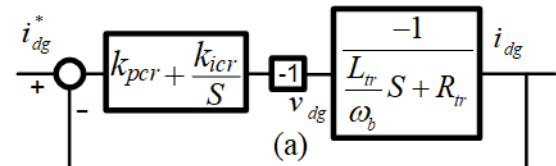
$$\begin{cases} \frac{k_{iq}}{k_{pq}} = \beta_{cl-i} \\ k_{pq}\beta_{cl-i}V_{s0} = 0.1\beta_{cl-i} \end{cases} \quad (29)$$

همانطور که گفته شد، فرکانس ω_n باید حدود ۱۰ درصد از پهنای باند حلقه بسته جریان روتور (حلقه داخلی) تعیین شود یعنی ۱۵۷ rad/sec. طبق معادلات بدست آمده در بالا برای k_{iq} و k_{pq} به ترتیب ۰/۱ و ۲۵ طراحی می شوند.

$$\left(\frac{L_{tr}}{\omega_b} S + R_{tr} \right) i_{qg} = -v_{qg} - L_{tr} \frac{di_{qg}}{dt} \quad (24)$$

با جبران سازی کامل اغتشاشات نشان داده شده در حالت دائمی در روابط (۲۳) و (۲۴) یعنی d_d و d_q تابع تبدیل i_{dtr}/v_{dtr} به i_{qtr}/v_{qtr} بدست آورده می شود.

$$\frac{i_{dtr}}{v_{dtr}} = \frac{i_{qtr}}{v_{qtr}} = \frac{-1}{\frac{L_{tr}}{\omega_b} S + R_{tr}} \quad (25)$$

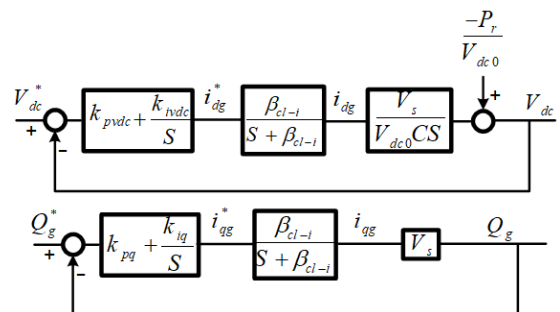


شکل (۵): حلقه کنترلی داخلی برای مبدل سمت شبکه

با استفاده از روش تقریب ارائه شده در قسمت قبل برای طراحی کنترل کننده حلقه های کنترلی MSC، ضرایب کنترلی حلقه های GSC نیز طراحی می شوند. همانطور که گفته شد ابتدا از حلقه کنترل جریان شروع شده است.

$$\begin{cases} k_{pcr} = \frac{L_{tr}\beta_{cl-i}}{\omega_b} = \frac{L_{tr}}{\omega_b} (0.1f_{sw}) \\ k_{icr} = k_{pcr}\beta_{ol-i} = k_{pcr} \frac{\omega_b R_{tr}}{L_{tr}} \end{cases} \quad (26)$$

با انتخاب فرکانس سوئیچ زنی مبدل ها (f_{sw}) ۲/۵ kHz و L_{tr} و R_{tr} به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۰۵ پریونیت باشند آنگاه مقدار ضرایب تنظیم کننده برای k_{icr} و k_{pcr} به ترتیب ۰/۷۵ و ۷/۸ طراحی می شوند.



شکل (۶): حلقه کنترلی خارجی برای مبدل سمت شبکه

برای سادگی و کاهش مرتبه تابع تبدیل بدست آمده در حلقه ولتاژ لینک dc از قطب حلقه داخلی شکل (۶) صرف نظر کرده و تابع

در این قسمت کنترل کننده توربین یا به عبارتی گاورنر توربین را تنظیم می‌کنیم. لازم به ذکر است جزئیات مدل استفاده برای شبیه سازی در نرم افزار مطلب در [۲۸] موجود است. حلقه سروموتور با در نظر گرفتن $T_a=0.07$ و $k_a=10/3$ در حالت مدار باز دارای یک قطب با فرکانس زیاد است که می‌توان از آن در حلقه مکانیکی توربین صرف نظر کرد. از این رو تابع تبدیل حلقه بسته مدار سروموتور را می‌توان به صورت $\frac{k_a}{k_a + S}$ نوشت. همچنین مدل خطی شده یک پمپ-توربین

The figure consists of two plots side-by-side. The left plot is the Root Locus Diagram, showing the complex plane with the Real Axis (horizontal) and Imag Axis (vertical). The locus starts at poles at approximately -4.2 and -2.2, and ends at a zero at -0.5. A dashed box labeled 'Drive Train' encloses the poles and zero. A dashed box labeled 'Turbine' encloses the pole at -2.2. A dashed box labeled 'PI Regulator' encloses the pole at -4.2. The right plot is the Bode Diagram, showing the magnitude and phase plots versus Frequency (rad/sec) on a logarithmic scale. The magnitude plot (top) has a peak at approximately 0.351 rad/sec. The phase plot (bottom) has a phase margin of 21.6 degrees at the same frequency. The plots are labeled with 'G.M.: 9.19 dB', 'Freq.: 0.351 rad/sec', 'Stable loop', and $(\gamma^* = \gamma)$.

از شکل (۹) به چند نکته می‌توان دست یافت.

۴- همانطور که مشخص است چون سیستم غیر مینیمم فاز است، با افزایش بیش از اندازه ضرایب بهره تنظیم کننده قطب سمت راست پدیدار شده و سیستم ناپایدار خواهد شد. از این رو در طراحی آن باید دقت شود.

۵- بررسی مدل حلقه بسته سیستم نشان می‌دهد که به ازای $0 < k_{pw} < 0.4$ و $0 < k_{iw} < 0.4$ سیستم پایدار است، که در این مطالعه مقادیر به ترتیب ۲ و ۰/۲ انتخاب شده‌اند.

برخلاف مد ژرأتوری، در مد موتوری کنترل کننده نیروگاه به دو قسمت مجزا تقسیم می شود:

۱- کنترل کننده مبدل سمت ماشین ۲- کنترل کننده مبدل
سمت شبکه

در مد موتوری بر خلاف مد ژنراتوری، کنترل سرعت چرخش موتور و کنترل توان مصرف شده توسط موتور بر عهده مبدل سمت ماشین می‌باشد. مبدل سمت ماشین با کنترل دور چرخش موتور می‌تواند توان مصرفی توسط موتور و به کنترل فرکانس شبکه کمک کند. همچنین کنترل توان راکتیو و یا ولتاژ استاتور نیز بر عهده مبدل سمت ماشین است. کنترل کننده مبدل سمت شبکه شبیه مد ژنراتوری دارای وظایف کنترل ولتاژ خازن واسط و توان راکتیو مبادله شده از این مبدل می‌باشد.

در وهله اول برای شناسایی و یادآوری روابط بین اهداف و ابزار کنترلی این روابط را از مدلسازی قسمت قبل مجدداً بازنویسه می‌کنیم.

$$T_{e_m} = -\frac{L_m}{L_s} \varphi_s i_{dr} \rightarrow$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - s \frac{L_m}{L_s} \varphi_{qs} - s L_r' i_{qr} + \frac{L_r'}{\omega_p} \frac{di_{dr}}{dt}$$

$$Q_{s-g} = \frac{V_s^2}{L_s} + \frac{L_m}{L_s} V_s i_{qr} \rightarrow$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + s L_r' i_{dr} + \frac{L_r'}{\omega_b} \frac{di_{qr}}{dt}$$

$$\omega_r \propto T_{e\ m} \propto i_{dr} \longrightarrow i_{dr} \propto v_{dr}$$

$$Q_{s\ m} \propto i_{gr} \longrightarrow i_{gr} \propto v_{gr}$$

بر اساس روابط دیده شده می‌توان گفت برای کنترل سرعت روتور و توان راکتیو توسط ولتاژهای محور d, q از مبدل سمت ماشین، دو حلقه کنترلی پشت سرهم استفاده می‌شود. حلقه اول یا حلقه داخلی حلقه کنترل جریان‌های روتور در محور d, q می‌باشد که ورودی آن‌ها

دور متغیر برای تزریق توان اکتیو سریع به شبکه دارای تغییراتی در سرعت خواهد بود. با کاهش سیگنال مرجع توان اکتیو، سرعت روتور شروع به زیاد شدن می‌کند، که بتواند توان قبلی موجود در شبکه را توسط انرژی اینرسی در خود ذخیره سازد. در عوض در هنگام افزایش آنی سیگنال مرجع توان اکتیو، انرژی اینرسی موجود در شفت روتور به صورت لحظه ای به شبکه تزریق شده و کاهش سرعت را تجربه خواهد کرد. لذا در هر دو مورد واحد دور ثابت اگرچه تغییر سرعتی را تجربه نمی‌کند ولی در عوض پاسخ بسیار کندی را به تغییر توان اکتیو در شبکه خواهد شد. البته تغییرات سرعت در واحد دور متغیر به دلیل دور متغیر بودن آن تا جایی که دور از محدوده تغییرات دور سیستم تجاوز نکند، به هیچ وجه مشکلی برای سیستم پیش نمی‌آورد. قابل ذکر است که مقدار تغییرات سرعت در طول تغییرات توان اکتیو می‌تواند تعیین کننده برای انتخاب ساینز بزرگتر برای مبدل سمت شبکه باشد. همچنین با تعیین تغییرات کمتر برای سیگنال مرجع می‌توان از افزایش بیش از اندازه سرعت جلوگیری کرد.

اگر چه ولتاژ استاتور در هر دو نوع PSHP (دور متغیر و دور ثابت) تفاوت زیادی را ندارند، با این حال نکته دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد در مورد توان راکتیو مبادله شده بین دو نوع PSHP است. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، توان راکتیو در واحد دور ثابت مثبت (تولید شده به سمت شبکه) می‌باشد، ولی در واحد دور متغیر منفی است (مصرفی). علت این موضوع در این است که PSHP مجهز به ماشین القایی از دو سو تغذیه دارای فیلتر LC در مبدل سمت شبکه می‌باشد. از آنجائیکه روش به کار گرفته شده کنترل ولتاژ است، لذا در حالت دائمی واحد اقدام به جذب توان راکتیو نموده است. برای جلوگیری از این امر نیاز است تا روش به کار گرفته شده به روش کنترل ضریب توان تغییر داده شود. همچنین در PSHP دور متغیر به دلیل آسنکرون بودن ماشین، توان راکتیو برای مغناطیس شدن ماشین مورد نیاز است، که بر اساس طراحی می‌تواند ماشین از سمت شبکه و استاتور و یا از سمت روتور و مبدل سمت شبکه جریان مغناطیس شوندگی خود را تامین کند. این موضوع قبلاً توضیح داده شده است ولی خالی از لطف نیست که دوباره یادآوری شود که جریان مغناطیس شوندگی از سمت شبکه می‌تواند شبکه را متحمل افت ولتاژهای گذرای و یا حتی دائمی سازد و به همین صورت برای تامین این جریان از طریق مبدل سمت شبکه ظرفیت این مبدل باید افزایش یابد. در این مطالعه سیستم کنترلی طراحی شده برای آزمایش، از نوع ولتاژ کنترل با تامین جریان مغناطیس شوندگی از سمت شبکه می‌باشد. لذا در این مطالعه ماشین از سمت روتور مغناطیسی می‌شود.

جریان روتور مرجع و خروجی آن ولتاژ روتور می‌باشد. معمولاً در مراجع از این حلقه با نام حلقه سریع نامیده می‌شود. حلقه کنترلی دوم یا خارجی که حلقه کند نامیده می‌شود دارای متغیرهای کنترلی آن سرعت روتور/ توان راکتیو (ولتاژ استاتور) و خروجی آن جریان روتور مرجع می‌باشد.

۳-۲-۲- کنترل کننده مبدل سمت شبکه

کنترل کننده مبدل سمت شبکه در مد موتوری و ژنراتوری هیچ تفاوتی را ندارند، لذا معادلات نیز در اینجا برقرار هستند.

۳-۲-۳- کنترل کننده پمپ

دریچه ورودی پمپ در مد موتوری فقط بر اساس حداکثر بازدهی پمپ تعیین شده و در کنترل پارامترهای دیگر تاثیری ندارد. لذا مقدار ولتاژ سروموتور طبق رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$v_{sm_P} = k_{pg} (G^* - G) + k_{ig} \int (G^* - G) \quad (32)$$

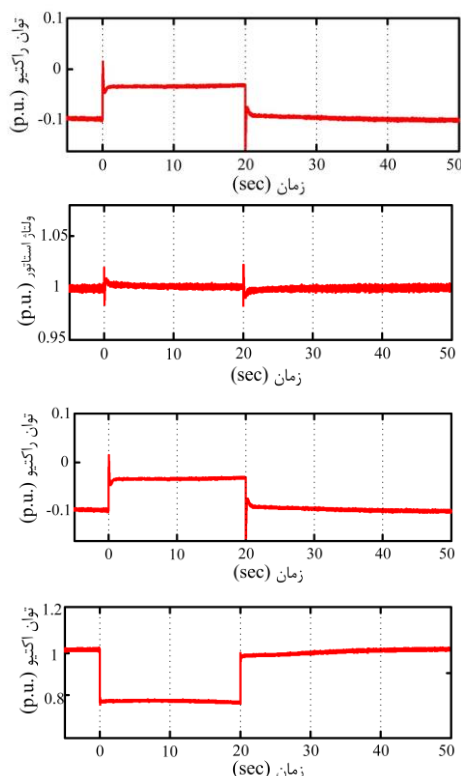
۴- مطالعه مقایسه ای در نیروگاه های تلمبه ذخیره ای دور متغیر و دور ثابت و شبیه سازی آنها

۴-۱- کنترل فرکانس

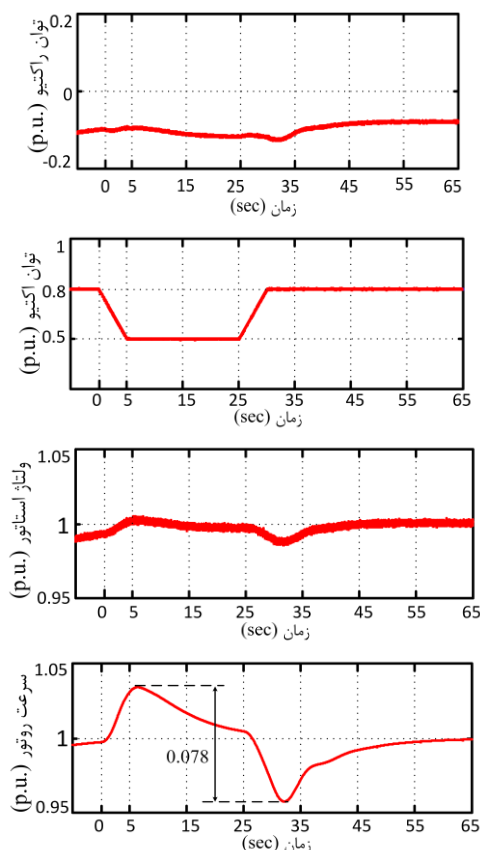
یکی از اهداف اصلی نیروگاه های تلمبه ذخیره ای از هر نوع کنترل فرکانس شبکه توسط تعادل بین عرضه و تقاضای انرژی در شبکه های بزرگ و یکپارچه می‌باشد. علاوه بر آن این واحدها باید بتوانند با در نظر گرفتن ذخیره گردان (عملکرد در کمتر از توان نامی) بتوانند به تغییرات بار ناگهانی پاسخ سریعی داشته باشند. لذا در این بخش پاسخ های دینامیکی تغییرات بار در هر دو واحد دور متغیر و دور ثابت شبیه سازی و تحلیل خواهند شد.

۴-۱-۱- مد ژنراتوری

از آنجائیکه مشخصات فنی و ساختار هر دو نیروگاه در بخش ۲ و ابتدای همین بخش به طور کامل گفته شد، لذا در توضیح آنها خودداری خواهد شد. در یک واحد دور متغیر توان اکتیو توسط مبدل سمت ماشین انجام می‌شود، در حالیکه توان اکتیو در واحدهای دور ثابت توسط گاورنر و توسط دریچه هدایت توربین کنترل می‌شود. از این رو می‌توان پیش بینی کرد که سرعت پاسخ به تغییرات توان اکتیو در واحدهای دور متغیر بسیار بیشتر از سرعت عملکرد واحدهای دور ثابت خواهد بود. شکل (۱۰) تغییر شیب در توان اکتیو مرجع برای هر دو نیروگاه را نشان می‌دهد. در این آزمایش فرمان افزایش و کاهش سیگنال مرجع توان اکتیو به اندازه ۰/۲ p.u. طی مدت زمان ۵ ثانیه صادر می‌شود. همانطور که در شکل (۱۰) مشخص است، واحد دور ثابت هیچ تغییر سرعتی را طی این آزمایش تجربه نمی‌کند، ولی واحد



شکل (۱۱): پاسخ‌های تست تغییر پله‌ای توان ورودی در مد موتوری برای یک واحد دور متغیر



شکل (۱۰): مقایسه پاسخ‌های تست تغییر پله‌ای بار در مد ژنراتوری برای واحدهای دور ثابت و دور متغیر

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل یک واحد تلمبه ذخیره‌ای دور متغیر در مدهای کاری ژنراتوری و موتوری برای بخش‌های مختلف مکانیکی و الکتریکی ارائه شد. بر این اساس یک کنترل کننده برداری برای مدهای موتوری و ژنراتوری و برای سه بخش متفاوت مبدل سمت ماشین، مبدل سمت شبکه و پمپ-توربین طراحی شد. برای تنظیم پارامترهای کنترلی با استفاده از خطی سازی تابع تبدیل حلقه باز و حلقه بسته بخش‌های کنترلی مختلف (GSC, MSC توربین) استخراج و با رسم دیاگرام روت لوکاس و تنظیم مکان صفر و قطب‌های سیستم پایداری آنها تعیین می‌شود.

از نتیجه شبیه‌سازی‌های انجام شده در نرم افزار Matlab/Simulink/SimPowerSystem موارد زیر قابل بیان است.

۱- کنترل کننده‌های سمت ماشین و شبکه از نوع کنترل کننده برداری با دو حلقه داخلی و خارجی هستند، در حالیکه کنترل کننده پمپ-توربین از نوع تک حلقه‌ای از نوع تناسبی-انتگرالی می‌باشد.

۲- مطابق پاسخ جریان روتور روی محورهای dq، هرچه پهنای باند حلقه بسته جریان روتور کمتر باشد، اثر اغتشاش (ولتاژ القایی روی سیم پیچ روتور) بر جریان روتور کمتر خواهد بود. این موضوع می‌تواند برای عبور از خطای یک DFIM مفید باشد.

۴-۱-۲- مد موتوری

تست دیگری که معمولاً برای نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای (البته دور متغیر) در مد موتوری نیاز است، عملکرد و پاسخ ماشین به تغییر توان اکتیو و شرکت در کنترل فرکانس در مد موتوری می‌باشد. از آنجایی که واحدهای دور ثابت دارای این ویژگی نیستند، لذا چنین تستی نیز موضوعیت نخواهد داشت. همانطور که در بخش دوم برای کنترل کننده واحدهای دور متغیر در مد موتوری توضیح داده شد، یک واحد دور متغیر و یا به عبارتی ماشین القایی از دو سو تغذیه برای تغییر توان اکتیو خود در این مد با تغییر سرعت مرجع می‌تواند به نقطه کار جدید که توان اکتیو جدیدی را مصرف می‌کند برسد. طبق قانون وابستگی تغییرات سرعت در یک موتور-پمپ با مکعب (توان سوم) نسبت سرعت تغییر داده شده تغییر می‌کند، لذا بر اساس بازه تغییرات سرعت ماشین از سرعت سنکرون مقدار تغییر توان اکتیو در مد موتوری تعیین می‌شود. برای نمونه در این آزمایش یک تغییر پله‌ای در سرعت مرجع با مقدار 0.08 p.u. (۰/۰۸ به ۱/۰۴ و بالعکس) انجام خواهد شد که در شکل (۱۱) نشان داده است [۲۰].

- speed pump-turbine units', in Proceedings of the 24th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2008, vol. 1, no. CONF, pp. 1-14.
- [9] T. Kuwabara, A. Shibuya, H. Furuta, E. Kita, and K. Mitsuhashi, 'Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pumped storage unit for Ohkawachi Power Station', IEEE Trans. Energy Convers., vol. 11, no. 2, pp. 376-382, 1996, doi: 10.1109/60.507649.
- [10] J. K. Lung, Y. Lu, W. L. Hung, and W. S. Kao, 'Modeling and dynamic simulations of doubly fed adjustable-speed pumped storage units', IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 2, pp. 250-258, 2007, doi: 10.1109/tec.2006.875481.
- [11] K. Grotenburg, F. Koch, I. Erlich, and U. Bachmann, 'Modeling and Dynamic Simulation of Variable Speed Pump Storage Units Incorporated Into the German Electric Power System', Eur. Conf. Electron. Appl., pp. 1-10, 2001.
- [12] A. C. Padoan et al., 'Dynamical behavior comparison between variable speed and synchronous machines with PSS', IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 3, pp. 1555-1565, 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2039586.
- [13] T. Staubli, C. Widmer, T. Tresch, and M. Sallaberger, 'Starting pump-turbines with unstable characteristics', Hydro 2010, 2010.
- [14] G. D. Marques and D. M. Sousa, 'Understanding the doubly fed induction generator during voltage dips', IEEE Trans. Energy Convers., vol. 27, no. 2, pp. 421-431, 2012.
- [15] M. S. Carmeli, F. Castelli-Dezza, M. Iacchetti, and R. Perini, 'Effects of mismatched parameters in MRAS sensorless doubly fed induction machine drives', IEEE Trans. power Electron., vol. 25, no. 11, pp. 2842-2851, 2010.
- [16] J. Soltani, A. F. Payam, and M. A. Abbasian, 'A speed sensorless sliding-mode controller for doubly-fed induction machine drives with adaptive backstepping observer', in 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006, pp. 2725-2730.
- [17] A. F. Payam and M. Jalalifar, 'An Input-Output Feedback Linearization Controller for Doubly-Fed Induction Machine Drives', in 2007 IEEE International Multitopic Conference, 2007, pp. 1-5.
- [18] S. Drid, M. Tadjine, and M. Naït-Saïd, 'Robust backstepping vector control for the doubly fed induction motor', IET Control Theory Appl., vol. 1, no. 4, pp. 861-868, 2007.
- [19] M. A. Bidgoli, H. A. Mohammadpour, and S. M. T. Bathae, 'Advanced Vector Control Design for DFIM-Based Hydropower Storage for Fault Ride-Through Enhancement', IEEE Trans. Energy Convers., vol. 30, no. 4, pp. 1449-1459, 2015.
- [20] Y. Pannatier, B. Kawkabani, C. Nicolet, J.-J. Simond, a. Schwery, and P. Allenbach, 'Investigation of Control Strategies for Variable-Speed Pump-Turbine Units by Using a Simplified Model of the Converters', IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 9, pp. 3039-3049, 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2037101.
- [21] L. Belhadji, S. Bacha, I. Munteanu, A. Rumeau, and D. Roye, 'Adaptive MPPT applied to variable-speed microhydropower plant', IEEE Trans. Energy Convers., vol. 28, no. 1, pp. 34-43, 2013, doi: 10.1109/TEC.2012.2220776.
- [22] M. Valavi and A. Nysveen, 'Variable-speed operation of hydropower plants: Past, present, and future', Proc. - 2016 22nd Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2016, vol. PP,

۳- مطابق پاسخ جریان روتور روی محورهای dq، کاهش پهنای باند حلقه داخلی جریان و به تبع آن کاهش پهنای باند خارجی تاثیر اغتشاشات روی توان سمت روتور روی لینک dc را افزایش می‌دهد.

۴- با ثابت بودن پهنای باند حلقه داخلی جریان، کاهش پهنای باند حلقه خارجی تاثیر اغتشای روی خروجی را افزایش می‌دهد.

۵- چون کنترل کننده پمپ-توربین در مد توربین غیر مینیمم فاز است، با افزایش بیش از اندازه ضرایب بهره تنظیم کننده قطب سمت راست پدیدار شده و سیستم ناپایدار خواهد شد. از این رو در طراحی آن باید دقت شود.

در انتها با توجه به اینکه ماهیت PSHP یک سیستم غیرخطی می‌باشد، پیشنهاد می‌شود با استفاده از کنترل کننده‌های غیرخطی مرسوم معایب ذکر شده در کنترل برداری برطرف گردند.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدرانی خود را از حمایت مالی و دیگر حمایت های دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری در انجام این مطالعه در قالب طرح تحقیقاتی مصوب به شماره قرارداد ۱۳۲۴ مورخ ۱۳۹۷/۰۷/۲۱ اعلام نمایند.

مراجع

- [1] M. A. Bidgoli, S. Atrian, W. Yang, and F. M. Gonzalez-Longatt, 'Transient Stability Assessment of Power System Incorporating DFIM-Based Pumped Storage Hydropower and Wind Farm', in Modelling and Simulation of Power Electronic Converter Dominated Power Systems in PowerFactory, Springer, 2021, pp. 131-152.
- [2] P. Donalek, 'Application of Adjustable-Speed Machines in Conventional and Pumped-Storage Hydro Projects', United States, 1995.
- [3] M. Khosravi, A. M. HOSSEINI, and S. JAVADI, 'Double-Fed Induction Generator Optimization to Improve the Performance of Variable Speed Wind Turbine Using Finite Element Metho', 2018.
- [4] H. A. Mohammadpour and E. Santi, 'Modeling and control of gate-controlled series capacitor interfaced with a DFIG-based wind farm', IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 2, pp. 1022-1033, 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2347007.
- [5] W. Yang and J. Yang, 'Advantage of variable-speed pumped storage plants for mitigating wind power variations: Integrated modelling and performance assessment', Appl. Energy, vol. 237, pp. 720-732, 2019.
- [6] J. Liang and R. G. Harley, 'Pumped storage hydro-plant models for system transient and long-term dynamic studies', IEEE PES Gen. Meet. PES 2010, pp. 1-8, 2010, doi: 10.1109/PES.2010.5589330.
- [7] J. Fraile-Ardanuy, J. R. Wilhelmi, J. J. Fraile-Mora, and J. I. Pérez, 'Variable-speed hydro generation: operational aspects and control', IEEE Trans. energy Convers., vol. 21, no. 2, pp. 569-574, 2006.
- [8] Y. Pannatier et al., 'Transient behavior of variable

پیوست:

R	مقاومت	P	توان حقیقی
L	اندوکتانس	Q	توان موهومی
i	جریان	S	توان ظاهری
V	ولتاژ	h	ارتفاع
s	لغزش	q	دبی آب ورودی توربین
S	لاپلاس	T	گشتاور الکتریکی
ω	سرعت زاویه‌ای چرخش	k	ضریب ثابت کنترلی
δ	زاویه توان ماشین	e	سیگنال خطا
D	ثابت میرایی روتور	α	فاز ولتاژ تونن
f, m	ضرایب ثابت ماتریس حالت و ورودی	H	ثابت اینرسی ماشین
F, M	ماتریس حالت و ورودی	β	پهنای باند
x, u	متغیر حالت و سیگنال ورودی	g	درصد بازشدن دریچه ورودی

r	روتور	p	سهم اکتیو
s	استاتور	q	سهم راکتیو
b	مبنا	0	نقطه کار

ds, qs	محور dq سیم پیچ استاتور	tr	ترانس تحریک
dr, qr	محور dq سیم پیچ روتور	N	تعداد دور سیم پیچ

m	مغناطیس کنندگی	t	توربین
-----	----------------	-----	--------

G	ژنراتور	GSC	مدل سمت شبکه
-----	---------	-------	--------------

M	موتور	MSC	مدل سمت ماشین
-----	-------	-------	---------------

e	الکتریکی	n	نامی
-----	----------	-----	------

g	شبکه	pp	تناسبی حلقه توان
-----	------	------	------------------

cl	حلقه بسته	ip	انتگرالی حلقه توان
------	-----------	------	--------------------

ol	حلقه باز	p_v	تناسبی حلقه ولتاژ
------	----------	-------	-------------------

cr	حلقه جریان	iv	انتگرالی حلقه ولتاژ
------	------------	------	---------------------

pcr	تناسبی حلقه جریان	p_q	تناسبی حلقه توان راکتیو
-------	-------------------	-------	-------------------------

icr	انتگرالی حلقه جریان	i_q	انتگرالی حلقه توان راکتیو
-------	---------------------	-------	---------------------------

$pvdc$	تناسبی حلقه ولتاژ	p_g	تناسبی حلقه دریچه
--------	-------------------	-------	-------------------

no. october, pp. 640–646, 2016, doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732593.

[23] V. Azbe and R. Mihalic, 'Transient stability of a large doubly-fed induction machine in a pumped-storage plant', *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 142, pp. 29–35, 2017.

[24] A. Joseph, K. Desingu, R. R. Semwal, T. R. Chelliah, M. Ieee, and D. Khare, 'Dynamic Performance of Pumping Mode of 250 MW Variable Speed Hydro-Generating Unit Subjected to Power and Control Circuit Faults', vol. 1, no. c, pp. 1–11, 2017.

[25] A. Joseph, R. Selvaraj, T. R. Chelliah, and S. V. A. Sarma, 'Starting and Braking of a Large Variable Speed Hydro-Generating Unit Subjected to Converter and Sensor Faults', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 9994, no. i, pp. 1–11, 2018.

[26] A. Joseph and T. R. Chelliah, 'A review of power electronic converters for variable speed pumped storage plants: Configurations, operational challenges, and future scopes', *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 1, pp. 103–119, 2018.

[27] B. Xu, H. Li, P. E. Campana, B. Hredzak, and D. Chen, 'Dynamic regulation reliability of a pumped-storage power generating system: Effects of wind power injection', *Energy Convers. Manag.*, vol. 222, no. May, p. 113226, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113226.

[28] K. R. Vasudevan, V. K. Ramachandaramurthy, G. Venugopal, J. B. Ekanayake, and S. K. Tiong, 'Variable speed pumped hydro storage: A review of converters, controls and energy management strategies', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110156.

[29] M. A. Bidgoli, D. Ganjali, W. Yang, and S. Atrian, 'Small Signal Stability Improvement of Pumped Storage Hydropower Using Wide Area Signal Considering Wind Farm', in *Wide Area Power Systems Stability, Protection, and Security*, Springer, 2021, pp. 249–271.

[30] M. Rahimi and M. Parniani, 'Dynamic behavior analysis of doubly-fed induction generator wind turbines - The influence of rotor and speed controller parameters', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 464–477, 2010, doi: 10.1016/j.ijepes.2009.09.017.

پیوست اول: پارامترهای ماشین القایی از دو سو

تغذیه و پمپ-توربین

جدول پ-۱: پارامترهای یک واحد با DFIM توان ۳۸۱ MVA در

مبنای یکایی					
C	F	V_{den}	$4/54 \text{ kV}$	L_s	$4/26$
s	$\pm/\%$	S_n	$381/1 \text{ MVA}$	L_r	$4/272$
H	$\sqrt{V_s}$	S_{ns}	$361/0.7 \text{ MVA}$	R_s	$0/0.0174$
f	60 Hz	S_{n-RSC}	$49/25 \text{ MVA}$	R_r	$0/0.02$
P	16	S_{n-GSC}	$26/93$	L_m	4

پمپ-توربین آبی

$4/41 \text{ m}$	D_{ref}
343 MW	P_n
450 rpm	N_n
$54/38 \text{ m}^3/\text{sec}$	Q_n
$70.9/2 \text{ m}$	H_n

لینک dc	لینک dc	لینک dc	لینک dc
انتگرالی حلقه ولتاژ	انتگرالی حلقه ولتاژ	انتگرالی حلقه ولتاژ	انتگرالی حلقه ولتاژ
ig	ig	ig	ig
ورودی توربین	ورودی توربین	ورودی توربین	ورودی توربین
انتگرالی حلقه دریچه	انتگرالی حلقه دریچه	انتگرالی حلقه دریچه	انتگرالی حلقه دریچه
$ivdc$	$ivdc$	$ivdc$	$ivdc$
تناسبی حلقه سرعت	تناسبی حلقه سرعت	تناسبی حلقه سرعت	تناسبی حلقه سرعت
$p\omega$	$p\omega$	$p\omega$	$p\omega$
انتگرالی حلقه سرعت	انتگرالی حلقه سرعت	انتگرالی حلقه سرعت	انتگرالی حلقه سرعت
$i\omega$	$i\omega$	$i\omega$	$i\omega$
سیم پیچ دمپر محور d	سیم پیچ دمپر محور d	سیم پیچ دمپر محور d	سیم پیچ دمپر محور d
kd	kd	kd	kd
سیم پیچ دمپر محور q	سیم پیچ دمپر محور q	سیم پیچ دمپر محور q	سیم پیچ دمپر محور q
kq	kq	kq	kq
سیم پیچ تحریک	سیم پیچ تحریک	سیم پیچ تحریک	سیم پیچ تحریک
fd	fd	fd	fd
i-امین ژنراتور	i-امین ژنراتور	i-امین ژنراتور	i-امین ژنراتور
$i-th$	$i-th$	$i-th$	$i-th$

زیر نویس ها

¹Pumped storage hydropower plant

²Doubly fed induction machine (DFIM)

³Runaway speed

⁴Model reference adaptive control

⁵Sliding mode control

⁶Feedback linearization

⁷Backstepping control

⁸Machine side controller

⁹Grid side controller

