



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه برق- قدرت

تعیین پارامترهای دینامیکی و گذرای یک ماشین سنکرون با استفاده از FE

دانشجو: امیر حسن نیا خیبری

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۸۷

تقدیم به:

پدر و مادرم

آنها که سالها رنج و سفتی را به امید شکوفایی گلهای زندگی‌شان به جان فریدند و سعادت و کمال مرا آرزو کردند. آنان که عمر ارزشمندشان با عشق به فرزندان می‌گذرد و مظهر ایثار، عشق، صبر و شکیبایی هستند. و آنان که هرگز بی‌ان فداکاری‌شان ممکن نیست.

برادر بزرگوارم آقای مهندس وحید حسن‌نیا

او که همیشه راهنما و پشتیبانم در تمام عمر و رفیق دوران سفتی‌ها بود.

خواهر عزیزم خانم دکتر الهام حسن‌نیا

که همواره غمخوار و مونس من در تنگنای زندگی بود.

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم تا از راهنمایی‌های ارزشمند استاد ارجمند جناب آقای دکتر دارابی عمیقاً تشکر نمایم. بی‌شک اتمام این پایان‌نامه بدون زحمات دلسوزانه ایشان امکان‌پذیر نبود. همچنین از تمامی اساتید گروه برق دانشگاه صنعتی شاهرود که از راهنمایی‌های آنان بهره‌مند بودم، تشکر می‌کنم. از همه دوستان عزیز که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری رساندند، مخصوصاً آقایان مهندس ممدرفضا میرزایی، مهندس امید لیمی و مهندس ممدمسین صادقی تشکر ویژه دارم.

تعهد نامه

اینجانب **امیر حسن نیا خیبری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **برق - قدرت** دانشکده **مهندسی برق و رباتیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تعیین پارامترهای دینامیکی و گذرای یک ماشین سنکرون با استفاده از FE** تحت راهنمایی **دکتر احمد دارابی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۸۷/۱۱/۶

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده:

امروزه مطالعات دینامیکی سیستم‌های قدرت به منظور بررسی حالات گذرا و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم هنگام بروز اغتشاشات مختلف، اهمیت زیادی یافته است. از اینرو مدل‌سازی دینامیکی اجزای شبکه قدرت بسیار حائز اهمیت می‌باشد. ژنراتورهای سنکرون بعنوان قلب تپنده هر سیستم قدرت، اهمیت ویژه‌ای در مطالعات دینامیکی سیستم دارند. تاکنون تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی دینامیکی ماشین‌های سنکرون صورت گرفته که عمدتاً بر مدل دو محوری ماشین متمرکز هستند. رفتار دقیق این مدل‌ها وابستگی شدیدی به تعیین دقیق پارامترهای دینامیکی ماشین در محورهای طولی و عرضی دارد. در طی دهه‌های اخیر، روش‌های تعیین این پارامترها بسیار توسعه یافته و پیشرفت‌های چشمگیری داشته‌اند. این پارامترها همواره با انجام آزمایش‌های دشوار و پرهزینه بر روی ژنراتورهای شبکه بدست آمده‌اند. از سوی دیگر تقریباً تمامی روش‌های بکار گرفته شده در این مساله، همراه با خطاهای متعدد در فرآیند آزمایش و برداشت اطلاعات هستند. از اینرو همواره کاهش این خطاها و هزینه آزمایش‌ها و دستیابی به نتایج دقیق‌تر از موضوعات مورد علاقه محققان و متخصصان شبکه بوده است. در این پایان‌نامه، مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌های تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین‌های سنکرون مورد بحث و بررسی قرار گرفته و الگوریتم‌های جدیدی برای استخراج نتایج ارائه شده است. شبیه‌سازی مدلی بسیار دقیق از ماشین سنکرون در محیط MATLAB/Simulink، نیاز به انجام آزمایش‌های عملی بر روی ماشین واقعی را مرتفع ساخته ضمن آنکه خطاها و هزینه‌های اجتناب‌ناپذیر آزمایش را کاهش می‌دهد. این مدل بسیار دقیق، با تحلیل مدل اجزای محدود ماشین و استخراج ماتریس اندوکتانس‌های فضایی رتور و استاتور بدست آمده است. با استفاده از روش اجزای محدود، تمامی اندوکتانس‌های خودی و متقابل رتور و استاتور ماشین به همراه هارمونیک‌های موثر آنها با دقت بسیار بالا تعیین شده و در شبیه‌سازی مدل ماشین بکار گرفته شده است. رفتار مدل شبیه‌سازی شده، بسیار نزدیک به رفتار واقعی ماشین است.

کلمات کلیدی: ماشین سنکرون، پارامترهای دینامیکی، روش اجزای محدود.

مقالات مستخرج از پایان نامه

- [1] A. Hassannia, A. Darabi, M. Alshamali, "Estimation of Dynamic Parameters of a Synchronous Generator using Genetic Algorithm", Accepted for Publication in IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering (ISEE), Vol. 4, No. 4, June 2009.
- [2] A. Hassannia, A. Darabi, A. Madadi, "A Multi Variable Fuzzy-Based Frequency Control System for a Hydraulic Power Plant", Proceeding of International Conference on Electrical Engineering, Okinawa, Japan, July 2008.
- [3] A. Darabi, S.A. Soleamani, A. Hassannia, "Fuzzy Based Digital Automatic Voltage Regulator of a Synchronous Generator with Unbalanced Loads", American journal of Engineering and Applied Science, Vol. 4, No. 4, pp. 280-286, 2008.
- [4] A. Hassannia, A. Darabi, "Parallel Frequency Controllers for a Hydraulic Power Plant Equipped with Kaplan Turbine", Under review at International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, June 2009.

[5] احمد دارابی، مهدی سعدی، امیر حسن‌نیا خیبری و تیمور قنبری، "تشخیص قطع شبکه اصلی در ژنراتورهای جاسازی شده شبکه‌های توزیع با استفاده از شاخص امپدانس‌های توالی شبکه"، نشریه فناوری و آموزش، شماره پنجم، ۱۳۸۷.

[6] امیر حسن‌نیا خیبری و احمد دارابی، "تخمین پارامترهای دینامیکی ژنراتور سنکرون با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی ولتاژ قطع بار"، تحت بررسی در نشریه مهندسی برق و کامپیوتر ایران (علمی-پژوهشی).

[7] احمد دارابی، سید علی سلیمانی، امیر حسن‌نیا خیبری و محمد شریف تورانی، "تأثیر فیدبک‌های ولتاژ در عملکرد تنظیم کننده ولتاژ خودکار یک ژنراتور سنکرون در سیستم توزیع نامتعادل"، بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی سیستم‌های قدرت، تهران، آذر ۱۳۸۷.

[8] امیر حسن‌نیا خیبری و احمد دارابی، "تعیین اندوکتانس‌های طولی و عرضی ماشین سنکرون با شبیه‌سازی آزمایش لغزش"، تحت بررسی در هفدهمین کنفرانس سراسری مهندسی برق ایران.

[9] امیر حسن‌نیا خیبری و احمد دارابی، "استراتژی جدید کنترلی بمنظور میرایی نوسانات مکانیکی توربین کاپلان در نیروگاه آبی"، تحت بررسی در هفدهمین کنفرانس سراسری مهندسی برق ایران.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
فصل دوم: ماشین‌های سنکرون و پارامترهای آن	۷
۱-۲. ساختار فیزیکی ماشین سنکرون	۹
۱-۱-۲. ساختار روتور و استاتور	۹
۲-۱-۲. سیم‌بندی‌های ماشین	۹
۲-۲. معادلات ریاضی حاکم بر ماشین سنکرون	۱۰
۳-۲. پارامترهای ماشین سنکرون	۱۵
۱-۳-۲. پارامترهای اساسی ماشین	۱۶
۲-۳-۲. پارامترهای عملیاتی	۱۶
۳-۳-۲. پارامترهای دینامیکی	۱۸
۴-۲. مفهوم گذرایی و عملکرد دینامیکی ماشین سنکرون	۱۸
۵-۲. محاسبهٔ راکتانس‌های ماشین	۲۰
۱-۵-۲. راکتانس‌های سنکرون	۲۰
۲-۵-۲. راکتانس‌های گذرا	۲۱
۳-۵-۲. راکتانس‌های زیرگذرا	۲۱
۶-۲. محاسبهٔ ثابت‌های زمانی ماشین	۲۲
۱-۶-۲. ثابت زمانی‌های گذرا	۲۳
۲-۶-۲. ثابت زمانی‌های زیرگذرا	۲۳
فصل سوم: تحلیل ساختار ماشین با استفاده از FE	۲۶
۱-۳. مدل‌سازی ماشین در محیط FEMM	۲۸
۲-۳. تحریک سیم‌پیچ رتور	۳۰
۳-۳. تحریک سیم‌پیچ استاتور	۳۳

فصل چهارم: شبیه‌سازی ماشین سنکرون در فریم اصلی ۳۸

۴۰	شبیه‌سازی حالت ژنراتوری ماشین سنکرون	۱-۴
۴۰	ژنراتور سنکرون	۱-۱-۴
۴۲	کنترل کننده ولتاژ و سیستم تحریک	۲-۱-۴
۴۴	گاورنر و توربین	۳-۱-۴
۴۵	بار الکتریکی	۴-۱-۴
۴۷	حالت موتور ماشین سنکرون	۲-۴
۴۷	موتور سنکرون	۱-۲-۴
۴۸	رتور و بار مکانیکی	۲-۲-۴
۴۹	منبع تغذیه	۳-۲-۴

فصل پنجم: تعیین راکتانس‌های سنکرون ماشین ۵۲

۵۴	مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه ماشین سنکرون	۱-۵
۵۶	آزمایش لغزش	۲-۵
۵۶	شبیه‌سازی آزمایش لغزش	۱-۲-۵
۵۸	خطاهای رایج در آزمایش لغزش	۲-۲-۵
۶۱	تعیین راکتانس‌های سنکرون از آزمایش لغزش	۳-۲-۵
۶۲	آزمایش موتور رلوکتانسی	۳-۵
۶۳	شبیه‌سازی موتور رلوکتانسی	۱-۳-۵
۶۵	آزمایش حداکثر جریان پس‌فاز	۴-۵

فصل ششم: روش‌های کلاسیک تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین ۶۸

۷۰	آزمایش اتصال کوتاه ناگهانی سه‌فاز	۱-۶
۷۰	شبیه‌سازی آزمایش اتصال کوتاه سه‌فاز	۱-۱-۶
۷۱	تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی	۲-۱-۶
۷۵	الگوریتم ژنتیک	۳-۱-۶
۷۷	استخراج پارامترهای دینامیکی ماشین	۴-۱-۶
۸۱	آزمایش قطع بار دینامیکی	۲-۶

۸۱	شبيه‌سازی آزمایش	۱-۲-۶
۸۲	تحليل نتايج و انطباق منحنی	۲-۲-۶
۸۴	استخراج پارامترها با الگوریتم ژنتیک	۳-۲-۶
فصل هفتم: روش‌های مدرن حالت ایستای تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین.....۸۷		
۸۹	آزمایش افول جریان مستقیم	۱-۷
۹۴	شبيه‌سازی آزمایش افول جریان مستقیم	۱-۱-۷
۹۷	آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا	۲-۷
۱۰۱	شبيه‌سازی آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا	۱-۲-۷
فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۶		
۱۰۷	نتیجه‌گیری	۱-۸
۱۰۹	پیشنهاداتی جهت تکمیل و ادامه کار	۲-۸
۱۱۲	ضمیمه	
۱۱۴	مراجع	

فهرست جداول و اشکال

- شکل ۱-۲: مدارهای استاتور و رتور ماشین سنکرون..... ۱۱
- شکل ۲-۲: مدارهای معادل ماشین سنکرون براساس تئوری پارک..... ۱۵
- شکل ۳-۲: توزیع شار در ماشین‌های سنکرون قطب برجسته..... ۱۹
- شکل ۴-۲: مدارهای معادل ماشین سنکرون در حالت ماندگار..... ۲۰
- شکل ۵-۲: مدارهای معادل ماشین سنکرون در دوره گذرا..... ۲۱
- شکل ۶-۲: مدارهای معادل ماشین سنکرون در دوره زیرگذرا..... ۲۲
- شکل ۷-۲: مدارهای معادل ماشین جهت استخراج ثابت زمانی‌های گذرای مدار باز..... ۲۳
- شکل ۸-۲: مدارهای معادل ماشین جهت استخراج ثابت زمانی‌های زیرگذرای مدار باز..... ۲۴
- شکل ۱-۳: ساختار رتور و استاتور ماشین مورد مطالعه..... ۲۸
- شکل ۲-۳: مش بندی ماشین و توزیع شار آن در جریان نامی..... ۲۸
- شکل ۳-۳: تغییر مش بندی مدل ماشین هنگام چرخش رتور..... ۲۹
- شکل ۴-۳: عدم تغییر مش بندی مدل ماشین هنگام چرخش رتور..... ۲۹
- شکل ۵-۳: توزیع شار درون ماشین در زوایای مختلف رتور..... ۳۱
- جدول ۱-۳: نتایج بدست آمده از مدل FE با تحریک سیم‌پیچ رتور..... ۳۲
- شکل ۶-۳: منحنی انطباق یافته و نقاط بدست آمده از مدل FE برای L_{fa} ۳۳
- جدول ۲-۳: پارامترهای منحنی اندوکتانس L_{fa} ۳۳
- جدول ۳-۳: نتایج بدست آمده از مدل FE با تحریک سیم‌پیچ فاز a استاتور..... ۳۴
- شکل ۷-۳: توزیع شار درون ماشین در زوایای مختلف رتور..... ۳۵
- شکل ۸-۳: منحنی انطباق یافته و نقاط بدست آمده از مدل FE برای L_{aa} ۳۶
- شکل ۹-۳: منحنی انطباق یافته و نقاط بدست آمده از مدل FE برای L_{ab} ۳۶
- جدول ۴-۳: پارامترهای منحنی اندوکتانس L_{aa} ۳۶
- جدول ۵-۳: پارامترهای منحنی اندوکتانس L_{ab} ۳۷
- شکل ۱-۴: بلوک دیاگرام سیستم قدرت شامل ژنراتور سنکرون..... ۴۰

شکل ۴-۲: شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون.....	۴۱
شکل ۴-۳: مدار سیم‌پیچ تحریک.....	۴۲
شکل ۴-۴: شبیه‌سازی مدار تحریک.....	۴۲
شکل ۴-۵: بلوک دیاگرام تنظیم کننده خودکار ولتاژ.....	۴۳
شکل ۴-۶: شبیه‌سازی تنظیم کننده خودکار ولتاژ.....	۴۳
شکل ۴-۷: شبیه‌سازی گاورنر، توربین و رتور.....	۴۵
شکل ۴-۸: طرح کلی شبیه‌سازی سیستم قدرت شامل ژنراتور سنکرون.....	۴۶
شکل ۴-۹: بلوک دیاگرام سیستم قدرت شامل موتور سنکرون.....	۴۷
شکل ۴-۱۰: شبیه‌سازی موتور سنکرون.....	۴۸
شکل ۴-۱۱: شبیه‌سازی رتور و بار مکانیکی.....	۴۹
شکل ۴-۱۲: شبیه‌سازی منبع تغذیه موتور سنکرون.....	۴۹
شکل ۴-۱۳: طرح کلی شبیه‌سازی سیستم قدرت شامل موتور سنکرون.....	۵۰
شکل ۵-۱: مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه در یک ماشین سنکرون.....	۵۴
شکل ۵-۲: شبیه‌سازی ژنراتور برای تعیین مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه.....	۵۵
شکل ۵-۳: مقادیر موثر ولتاژ و جریان در ترمینال ژنراتور.....	۵۶
شکل ۵-۴: شبیه‌سازی آزمایش لغزش.....	۵۷
شکل ۵-۵: کمیت‌های بدست آمده از شبیه‌سازی آزمایش لغزش.....	۵۷
شکل ۵-۶: تصور معمول از ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ تحریک و ولتاژ و جریان فاز a در اغلب مراجع.....	۵۹
شکل ۵-۷: مقادیر RMS ولتاژ و جریان فاز a و امپدانس تعیین شده از حاصل تقسیم آنها.....	۶۱
شکل ۵-۸: کمیت‌های مختلف سیستم در حین افزایش بار مکانیکی.....	۶۴
جدول ۵-۱: کمیت‌های سیستم در دو بار مکانیکی مختلف.....	۶۴
شکل ۵-۹: کمیت‌های مختلف سیستم در حین تغییر جریان تحریک.....	۶۶
شکل ۶-۱: جریان‌های اتصال کوتاه ماشین.....	۷۱
جدول ۶-۱: پارامترهای دینامیکی ماشین با انطباق بر جریان اتصال کوتاه.....	۷۳
شکل ۶-۲: جریان اتصال کوتاه فاز a و جریان محاسبه شده توسط پارامترهای گروه I.....	۷۳

- شکل ۳-۶: جریان اتصال کوتاه فاز a و جریان محاسبه شده توسط پارامترهای گروه II ۷۴
- شکل ۴-۶: جریان اتصال کوتاه فاز a و جریان محاسبه شده توسط پارامترهای گروه III ۷۴
- شکل ۵-۶: جریان اتصال کوتاه فاز a و جریان محاسبه شده توسط پارامترهای گروه IV ۷۴
- شکل ۶-۶: الگوریتم ژنتیک ۷۶
- جدول ۲-۶: پارامترهای دینامیکی ماشین با استفاده از تابع شایستگی جدید ۷۹
- شکل ۷-۶: جریان‌های شبیه‌سازی شده و محاسبه شده در فاز a ۷۹
- شکل ۸-۶: جریان‌های شبیه‌سازی شده و محاسبه شده در فاز b ۸۰
- شکل ۹-۶: جریان‌های شبیه‌سازی شده و محاسبه شده در فاز c ۸۰
- شکل ۱۰-۶: جریان‌های شبیه‌سازی شده و محاسبه شده در سیم‌پیچ تحریک ۸۰
- شکل ۱۱-۶: ولتاژ فاز a در حین وصل و قطع بار 1 pu و 0.8 پس فاز ۸۱
- شکل ۱۲-۶: جریان‌های d و q هنگام قطع و وصل بار 1 pu و 0.8 پس فاز ۸۳
- جدول ۳-۶: پارامترهای دینامیکی حاصل از قطع بار 1 pu و 0.8 پس فاز و الگوریتم ژنتیک ۸۵
- شکل ۱۳-۶: ولتاژهای شبیه‌سازی شده و محاسبه شده فاز a هنگام قطع بار 1 pu و 0.8 پس فاز ۸۵
- شکل ۱۴-۶: جریان‌های d و q هنگام قطع و وصل بار 1 pu و 0.6 پس فاز ۸۶
- جدول ۴-۶: پارامترهای دینامیکی حاصل از قطع بار 1 pu و 0.6 پس فاز و الگوریتم ژنتیک ۸۶
- شکل ۱-۷: مدار ماشین سنکرون در آزمایش افول جریان مستقیم ۹۰
- شکل ۲-۷: مدار معادل ماشین در دوره افول جریان ۹۰
- شکل ۳-۷: مدار معادل ماشین در حوزه لاپلاس ۹۰
- شکل ۴-۷: جریان‌های نرمال محاسبه شده و شبیه‌سازی شده نزولی استاتور هنگامیکه رتور در محور d قرار دارد ۹۵
- جدول ۱-۷: پارامترهای انطباق منحنی برای محور طولی ۹۵
- جدول ۲-۷: پارامترهای واسطه برای محور طولی ۹۵
- جدول ۳-۷: پارامترهای دینامیکی محور طولی ۹۶
- شکل ۵-۷: جریان‌های نرمال محاسبه شده و شبیه‌سازی شده نزولی استاتور هنگامیکه رتور در محور q قرار دارد ۹۶
- جدول ۴-۷: پارامترهای منحنی و پارامترهای واسطه برای محور عرضی ۹۶
- جدول ۵-۷: پارامترهای دینامیکی محور عرضی ۹۷

- شکل ۶-۷: چگونگی اتصالات ماشین در آزمایش پاسخ فرکانسی محور طولی..... ۹۸
- شکل ۷-۷: چگونگی اتصالات ماشین در آزمایش پاسخ فرکانسی محور عرضی..... ۹۹
- شکل ۸-۷: مدل شبیه سازی شده ماشین سنکرون در آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا..... ۱۰۱
- جدول ۶-۷: توابع عملیاتی بدست آمده از آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا..... ۱۰۲
- شکل ۹-۷: مقادیر شبیه سازی شده و محاسبه شده برای اندازه اندوکتانس عملیاتی محور طولی..... ۱۰۳
- شکل ۱۰-۷: مقادیر شبیه سازی شده و محاسبه شده برای زاویه اندوکتانس عملیاتی محور طولی..... ۱۰۳
- جدول ۷-۷: پارامترهای انطباق منحنی در محور طولی..... ۱۰۳
- جدول ۸-۷: پارامترهای دینامیکی محور طولی..... ۱۰۴
- شکل ۱۱-۷: مقادیر شبیه سازی شده و محاسبه شده برای اندازه اندوکتانس عملیاتی محور عرضی..... ۱۰۴
- شکل ۱۲-۷: مقادیر شبیه سازی شده و محاسبه شده برای زاویه اندوکتانس عملیاتی محور عرضی..... ۱۰۵
- جدول ۹-۷: پارامترهای انطباق منحنی در محور عرضی..... ۱۰۵
- جدول ۱۰-۷: پارامترهای دینامیکی محور عرضی..... ۱۰۵
- جدول ۱-۸: پارامترهای دینامیکی بدست آمده از روش‌های مختلف..... ۱۰۷

فصل اول

مقدمه

ژنراتورهای سنکرون منابع عمده‌ی تامین انرژی الکتریکی در سیستم‌های قدرت می‌باشند. مسأله‌ی پایداری سیستم‌های قدرت به عنوان یکی از شاخص‌های بهره‌برداری امن، به طور عمده وابسته به حفظ حالت سنکرونیزه بین ماشین‌های بهم پیوسته سیستم می‌باشد. این پایداری به عملکرد سیستم قدرت در برابر اغتشاشاتی مانند اتصال کوتاه، تغییرات لحظه‌ای بار، قطع خطوط انتقال، تغییرات شدید تولید و... بستگی دارد. از این رو درک مشخصه‌ها و مدل‌سازی دقیق رفتار ژنراتورهای سنکرون اهمیت قابل توجهی در مطالعه سیستم‌های قدرت دارد.

بروز اغتشاشات در سیستم قدرت عموماً اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین بهبود پایداری دینامیکی سیستم جهت کاهش خروج‌های ناخواسته، افزایش قابلیت اطمینان سیستم و بهره‌برداری بهینه از ظرفیت‌های موجود شبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حالات مختلف بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت به هم پیوسته تحت تاثیر پدیده‌های برنامه‌ریزی شده‌ای همانند توزیع اقتصادی بار، تغییر توپولوژی سیستم، تعمیرات نگهداری و... و نیز پدیده‌های ناخواسته‌ای همانند صاعقه، قطع و وصل بارها، قطع خطوط انتقال، خروج واحدهای تولیدی و... دائماً در حال تغییر می‌باشد. این تغییر دائمی در حالت سیستم قدرت سبب بروز حالات گذرا و دینامیک در خطوط انتقال، ترانسفورماتورها و ژنراتورها می‌گردد. در نتیجه برای تعیین حاشیه بهره‌برداری پایدار و امن، همچنین میزان قابلیت اطمینان سیستم، لازم است دینامیک سیستم قدرت مدل شود. به منظور مطالعه دینامیک سیستم‌های قدرت، مدل‌سازی مناسب تمامی اجزای آن لازم است. یکی از مهمترین این اجزاء، ژنراتورهای سنکرون می‌باشند که از محدوده‌ی عملکرد دینامیکی وسیعی برخوردار بوده و لازم است در بررسی‌های دینامیکی از دقیق‌ترین مدل‌های آن استفاده شود.

تاکنون روش‌های مختلفی جهت مدل‌سازی و تعیین پارامترهای ژنراتور سنکرون مورد استفاده قرار گرفته است که به تدریج با پیشرفت علم و تکنولوژی کامل‌تر شده و توانسته‌اند با دقت بالاتری رفتار ژنراتور سنکرون را مدل‌سازی نمایند. اساس روش‌های مطالعه رفتار ژنراتورهای سنکرون در اواخر قرن نوزدهم میلادی ریشه دارد. مفاهیم کلیدی تبدیل متغیرهای استاتور به قالب مرجع استاتور با سرعت

سنکرون، توسط بلوندل^۱ و پارک^۲ مطرح شدند که تا امروز نیز اساس مطالعات ماشین‌های سنکرون می‌باشند. برخی از این مفاهیم مطرح شده، از آن زمان تا سه دهه اخیر دست نخورده باقی مانده بودند. اگر چه گسترش مدل‌های ارائه شده جهت ماشین‌های سنکرون و استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر از نظر تئوری ممکن بوده است، اما به دلیل وجود برخی از محدودیت‌ها همانند محدودیت ظرفیت محاسباتی کامپیوترها، عملاً گسترش مدل ژنراتورهای سنکرون محقق نشده است. با ظهور کامپیوترهای دیجیتال، در این زمینه نیز تحولی اساسی شکل گرفت و مطالعات مبسوط‌تری جهت مدل‌سازی و تعیین پارامترهای ژنراتور سنکرون صورت پذیرفت. روند تحولات شکل گرفته را می‌توان بطور خلاصه بصورت زیر مرور کرد:

به دنبال مطرح شدن تئوری ولتاژ ثابت پشت راکتانس توسط کراری^۳ در سال ۱۹۲۳، در سال ۱۹۲۸ پارک و روبرتسون^۴ راکتانس‌ها و ثابت‌های زمانی محور طولی و عرضی را تعریف کرده و به دنبال آن مفاهیم رژیم‌های کندگذر و تندگذر را در رابطه با شارها، ولتاژها و جریان‌ها مطرح ساختند. این حالت‌ها در هنگام وقوع تغییرات ناگهانی در پارامترهای الکتریکی به وقوع می‌پیوستند. با توجه به ایده‌های فوق و این فرض که با در نظر گرفتن راکتانس‌های پراکندگی سیم‌بندی‌های استاتور، میدان و بدنه رتور می‌توان یک راکتانس متقابل بین رتور و استاتور تعریف نمود، موضوع اصلی مدار معادل محور مستقیم (محور d) مطرح شد.

در سال ۱۹۲۹، پارک مفاهیم محورهای d و q را به منظور بسط تبدیلات dqo که خود آن را عنوان کرده بود، مطرح ساخت [1]. در سال ۱۹۳۱، کیلگور^۵ مقاله‌ای مبسوط راجع به فاکتورهای موثر در محاسبه راکتانس‌های ماشین سنکرون ارائه داد [2]. این مقاله براساس ویژگی‌های فیزیکی و هندسی استاتور و رتور بنا شده بود. شروین رایت^۶ در همان سال روش‌های تعیین مشخصات انواع ژنراتورهای

¹ Blondel

² Park

³ Crary

⁴ Robertson

⁵ Kilgore

⁶ Sherwin Wright

سنکرون و مقادیر گذرا را از طریق آزمایش، فرمول‌بندی کرده و منتشر ساخت. این کار اساس تصویب اولین روش آزمایش ژنراتور سنکرون در سال ۱۹۴۵ گردید.

در اوایل دهه ۱۹۶۰ همزمان با افزایش کاربرد ابزارها و تکنیک‌های محاسباتی در تحلیل سیستم‌های قدرت، پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه آنالیز سیستم‌های قدرت منجر به توانا تر شدن مهندسان در تجزیه و تحلیل پایداری سیستم‌های قدرت بزرگ گردید. به دنبال این امر نیاز به مدل‌سازی دقیق‌تر ماشین‌های سنکرون بیشتر احساس شده و مساله مدل‌سازی سیم‌پیچی‌های میراکننده ماشین نیز مورد بررسی قرار گرفت. تا آن زمان مشخصات ماشین را با استفاده از آزمایش‌های اتصال کوتاه بدست می‌آوردند و مدل‌های معرفی شده نیز بر این اساس استوار بودند [3]. بنابراین برای مدل‌سازی ماشین، صرفاً از مدل محور d استفاده می‌شد و هیچ مدلی برای محور عرضی (محور q) در نظر گرفته نمی‌شد. مشکل دیگر این بود که هیچ‌گونه روش مناسبی برای تعیین پارامترهای محور q وجود نداشت و با آزمایش‌های موجود تنها پارامترهای محور d در دسترس بودند، در صورتیکه مقادیر محور q دارای تاثیر بسزایی بر روی عملکرد ماشین می‌باشند.

در طی سالهای ۱۹۶۰ الی ۱۹۸۰ آزمایش‌های گوناگونی جهت پاسخگویی به سوالاتی از قبیل اهمیت پارامترهای مربوط به محور عرضی و همچنین درجه دقت مورد نیاز برای پارامترهای ماشین و یا مرتبه مدل بکار رفته برای ماشین انجام گردید که از عمده‌ترین آنها می‌توان به آزمایش‌های نیروگاه North Fleet در سال ۱۹۶۹ و تحقیقات انجام شده توسط موسساتی نظیر ¹EPR، ²NEPCC و موسسه Ontario-Hydro اشاره کرد.

این آزمایش‌ها در نهایت به نتایج زیر منجر گردیدند:

الف) در شبیه‌سازی رفتار ماشین در شرایط گذرا و دینامیک، استخراج و دسترسی به اطلاعات صحیح از پارامترهای ماشین به همان اندازه درجه مدل انتخابی اهمیت دارد. این مطلب در رابطه با پارامترهای مربوط به محور عرضی، قابل ملاحظه‌تر می‌باشد.

¹ Electric Power Research Institute

² North East Power Coordinating Council

ب) در تعیین پارامترهای ماشین همواره آزمایش‌هایی که منجر به تغییرات کوچک در مقادیر ولتاژ و جریان‌های ماشین گردند، لزوماً اطلاعات و پارامترهای مناسب جهت بررسی اغتشاشات کوچک را در دسترس قرار نداده و پارامترها بسته به نوع مطالعه باید اصلاح شوند. تصحیح مشابهی در مورد اغتشاشات بزرگ نیز لازم است.

ج) در شبیه‌سازی رفتار واقعی توربو ژنراتورهای با رتور قطب برجسته، اهمیت پارامترهای مربوط به محور عرضی، لزوم بدست آوردن این پارامترها را از طریق آزمایش جداگانه‌ای ایجاب می‌نماید. بدین ترتیب بود که آزمایش‌های جدیدتری نظیر آزمایش باربرداری دینامیکی، پاسخ فرکانسی و افول جریان مستقیم در سال‌های بعد از ۱۹۸۰ جایگاه ویژه‌ای را در تعیین پارامترهای ماشین‌های سنکرون پیدا نمودند [4][5][6][7][8].

برای اولین بار در تحقیقات نیروگاه انتاریو، آزمایش‌های پاسخ فرکانسی بکار گرفته شدند [6]. تکنیک‌های پاسخ فرکانسی طی سال‌ها برای توصیف ریاضی اجزا الکتریکی در سیستم‌های کنترل پذیرفته شده بودند. دلیل استفاده از این تکنیک‌ها برای ماشین‌های سنکرون این بود که روش پاسخ فرکانسی می‌توانست پاسخ ژنراتور را تحت یک مجموعه از شرایط متغیر بصورت ایده‌آل توضیح دهد. با توجه به اینکه انجام این آزمایش‌ها تحت شرایط در حال کار مسایل عدیده‌ای از جمله حضور طولانی مدت اغتشاشات در سیستم را پیش می‌آوردند، بدست آوردن مقادیر پارامترهای ژنراتور سنکرون با استفاده از روش پاسخ فرکانسی در حالت ایستا مورد توجه قرار گرفت. در سال ۱۹۷۲، تابع تبدیل امپدانس‌های عملیاتی جهت تطبیق مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا، مطرح گردید که در سال ۱۹۷۳ توسط داندنو^۱ و کندور^۲ بصورت کاملاً مشخص تشریح شد.

در سال ۱۹۷۷ استفاده از آزمایش باربرداری از استاتور به عنوان روشی جهت تعیین پارامترهای ژنراتورهای سنکرون مطرح شد [8]. این آزمایش‌ها از این نظر که عکس العمل‌های زمانی متغیرهای ماشین به دنبال بروز اغتشاشی ناگهانی، در تعیین مشخصه‌های آن به کار می‌رود، شبیه آزمایش‌های

¹ Dandeno

² Kondur

اتصال کوتاه می‌باشند. این آزمایش‌ها پارامترهای هر دو محور ماشین را تعیین می‌کنند، اما اجرای آن تا حدی مشکل و پرهزینه است.

در این پایان‌نامه، روش‌های عمده و متداول در تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین‌های سنکرون، معرفی و بررسی شده است. مزایا و معایب اغلب این روش‌ها مورد بحث قرار گرفته و پیشنهادهایی جهت افزایش دقت نتایج، ارائه شده است. شبیه‌سازی یک مدل بسیار دقیق از ماشین سنکرون در محیط MATLAB/SIMULINK، امکان بررسی و مقایسه روش‌های موجود را فراهم آورده، مشکلات مربوط به آزمایش واقعی را مرتفع نموده و منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در دقت نتایج بدست آمده شده است. اما رسیدن به این مدل بسیار دقیق، نیازمند تعیین دقیق ماتریس اندوکتانس‌های فضایی ماشین می‌باشد که در این مورد از تحلیل اجزای محدود ماشین استفاده شده است. در واقع، روش اجزای محدود اساس این پایان‌نامه را تشکیل می‌دهد، زیرا تمامی نتایج ارائه شده، از مدل شبیه‌سازی شده ماشین بدست آمده که خود براساس ماتریس اندوکتانس‌های فضایی حاصله از تحلیل مدل اجزای محدود ماشین است. ساختار کلی پایان‌نامه به شرح زیر می‌باشد:

فصل دوم چگونگی مدل‌سازی ماشین سنکرون را بیان می‌کند. انواع پارامترهای ماشین و ارتباط بین آنها نیز تعریف شده است. در فصل سوم مدل اجزای محدود ماشین، توسعه یافته و ماتریس اندوکتانس فضایی آن استخراج شده است. فصل چهارم به شبیه‌سازی حالت‌های مختلف موتوری و ژنراتوری ماشین در محیط MATLAB اختصاص دارد. در فصل پنجم آزمایش‌های مختلف برای تعیین راکتانس‌های سنکرون ماشین بیان شده و مورد بررسی قرار گرفته است. فصل ششم با شبیه‌سازی روش‌های کلاسیک، پارامترهای ماشین را استخراج نموده و چالش‌های موجود در این روش‌ها را مطرح ساخته است. در فصل هفتم روش‌های مدرن حالت ایستا برای تعیین پارامترهای ماشین، بررسی و شبیه‌سازی شده‌اند. نهایتاً فصل هشتم به جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی جهت تکمیل و ادامه کار اختصاص دارد.

فصل دوم

ماشین‌های سنکرون و پارامترهای آن

شبیه‌سازی رفتار ژنراتورهای سنکرون برای انجام مطالعات گوناگون دینامیکی در سیستم‌های قدرت، مستلزم انتخاب یک مدل مناسب جهت مدل‌سازی ماشین می‌باشد. مدل ارائه شده برای هر سیستم شامل یک ساختار و تعدادی پارامتر است که جهت پیشگویی رفتار آن سیستم در حالت‌های مورد نظر بکار گرفته می‌شود. مدل مورد استفاده برای یک سیستم باید به سادگی قابل فهم بوده، بکارگیری آن آسان باشد و در عین حال بتواند رفتار سیستم را با دقت و صحت قابل قبولی برای یک محدوده مشخص پیشگویی نماید. بعبارت دیگر رفتار پیش‌بینی شده سیستم بواسطه شبیه‌سازی براساس مدل ارائه شده، باید تا حد قابل قبولی به رفتار واقعی سیستم نزدیک باشد. هرچند این دو خاصیت از مدل، یعنی سادگی و واقعی بودن همواره در تضاد با یکدیگر هستند، یعنی مدل‌های واقعی به ندرت ساده هستند و مدل‌های ساده به ندرت می‌توانند واقعی باشند، اما می‌توان جهت رسیدن به پاسخ دلخواه مصالحه‌ای منطقی مابین این دو خاصیت برقرار کرد. مدل دو محوری پارک از معمول‌ترین و پذیرفته‌ترین مدل‌های ماشین سنکرون می‌باشد. در این فصل ابتدا اصول مدل‌سازی ماشین سنکرون براساس تئوری دو محوری پارک به اختصار بیان می‌شود. سپس پارامترهای ماشین سنکرون، معرفی شده و نحوه محاسبه پارامترها براساس مدل دو محوری پارک و همچنین نحوه مدل‌سازی ماشین براساس پارامترهای دینامیکی آن بررسی می‌گردد.

۱-۲. ساختار فیزیکی ماشین سنکرون

۱-۱-۲. ساختار رتور و استاتور

ماشین‌های سنکرون سه فاز، بزرگترین و متداول‌ترین ماشین‌های الکتریکی‌اند که با سرعت سنکرون می‌چرخند. اگرچه ساخت ماشین‌های سنکرون سه فاز پرهزینه است، اما بازده بالای این ماشین‌ها در قدرت‌های زیاد بزرگترین مزیت آنها می‌باشد. استاتور ماشین‌های سنکرون معمولاً متشکل از یک هسته موق فرومغناطیس با شیارهایی جهت قرارگیری سیم‌پیچی‌های سه فاز گسترده می‌باشد. رتور ماشین نیز می‌تواند بصورت قطب برجسته یا قطب صاف ساخته شود. ماشین‌های قطب برجسته اغلب به عنوان ژنراتورهای آبی جهت تطبیق سرعت پائین توربین‌های آبی با سرعت سنکرون استفاده می‌شوند. این نوع ژنراتور با تعداد قطب کم در دیزل ژنراتورها نیز کاربرد دارد. قطب‌های رتور این نوع ماشین به صورت جداگانه ساخته شده و سپس بر روی یک استوانه سوار می‌شوند. ساختار رتور گرد یا قطب صاف نیز برای کاربردهای سرعت بالا مناسب است. ماشین‌های سنکرون با رتور گرد با دو یا چهار قطب به عنوان ژنراتورهای واحدهای بخاری جهت تطابق با سرعت بالای توربین بکار می‌روند. معمولاً در این ماشین‌ها نسبت قطر به طول رتور به منظور محدود کردن تنش‌های مکانیکی ناشی از نیروهای گریز از مرکز کوچک انتخاب می‌شود.

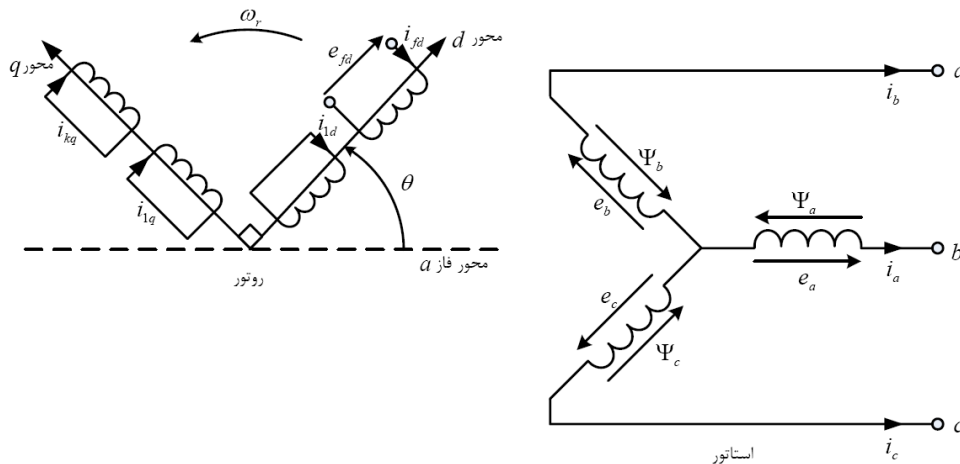
۲-۱-۲. سیم‌بندی‌های ماشین

ماشین سنکرون سه فاز معمولاً متشکل از یک سیم‌پیچی سه فاز به عنوان آرمیچر و یک سیم‌پیچی تحریک می‌باشد که بنام سیم‌پیچی میدان نیز معروف است. سیم‌پیچی آرمیچر معمولاً در ولتاژی بسیار بالاتر از ولتاژ تحریک کار می‌کند و از این رو نیازمند فضایی بیشتر برای عایق‌بندی مناسب است. همچنین با توجه به اینکه جریان‌های گذرای شدیدی از این سیم‌پیچی‌ها عبور می‌کنند، باید قدرت مکانیکی کافی داشته باشند. بنابراین معمول است که سیم‌پیچی آرمیچر را بر روی استاتور ماشین قرار می‌دهند. از نظر فضایی، سیم‌پیچی‌های سه فاز ۱۲۰ درجه با یکدیگر اختلاف مکان دارند

و این موضوع سبب می‌شود که با چرخش یکنواخت رتور و به تبع آن چرخش یکنواخت میدان تحریک، در این سیم‌پیچی‌ها ولتاژهایی القا شود که از نظر زمانی ۱۲۰ درجه اختلاف فاز داشته باشند. سیم‌پیچی تحریک یا میدان معمولاً بر روی رتور قرار داده می‌شود. در ماشین‌های قطب برجسته معمولاً میله‌های مسی یا برنجی در زیر سطح قطب‌ها جای می‌گیرند. این میله‌ها در دو انتها به وسیله حلقه‌هایی به یکدیگر متصل شده تا یک قفس سنجابی شبیه آنچه در یک موتور القایی وجود دارد، ساخته شود. مجموعه این میله‌ها و حلقه‌ها به عنوان سیم‌پیچی میراکننده می‌باشند. رتور ژنراتورهای قطب صاف، بصورت استوانه‌ای است که از فولاد یکپارچه ساخته می‌شود. سیم‌پیچی‌های میدان در این گونه رتورها بصورت یکنواخت در شکاف‌های بدنه رتور توزیع شده‌اند که معمولاً به کمک گوه‌هایی در جای خود محکم می‌شوند. اغلب در چنین ماشین‌هایی سیم‌پیچی میراکننده وجود ندارد، زیرا که رتور یکپارچه فلزی اجازه عبور جریان‌های گردابی را فراهم می‌آورد که تاثیری مشابه جریان‌های سیم‌پیچی‌های میراکننده دارد. برخی از سازندگان تاثیر میرایی بیشتر و قابلیت عبور جریان مولفه منفی را با استفاده از گوه‌های فلزی مستقر در شکاف‌های سیم‌پیچی تحریک (که در انتها به یکدیگر متصل شده‌اند) یا با استفاده از میله‌های مسی مستقل زیر گوه‌های نگه دارنده، فراهم می‌آورند.

۲-۲. معادلات ریاضی حاکم بر ماشین سنکرون

در این قسمت مدل ریاضی ماشین سنکرون بر اساس تئوری دو محوری پارک بصورت خلاصه تشریح می‌شود. جزئیات این مدل در مراجع [9-11] آمده است. شکل (۱-۲) سیم‌پیچی‌های در نظر گرفته شده برای استاتور و رتور ماشین را نشان می‌دهد. مدار استاتور شامل یک سیم‌پیچی سه فاز است و رتور نیز یک سیم‌پیچی تحریک و یک سیم‌پیچی میراکننده بر روی محور d و دو سیم‌پیچی میراکننده بر روی محور q دارد. تعداد سیم‌پیچی‌های میراکننده در نظر گرفته شده به عوامل متعددی از جمله نوع ژنراتور، دقت مورد نیاز مدل و... بستگی دارد. مدل نشان داده شده در شکل (۱-۲) براساس استاندارد IEEE 1110 می‌باشد [10].



شکل ۱-۲: مدارهای استاتور و رتور ماشین سنکرون

در شکل فوق a، b و c سیم‌پیچی‌های سه فاز استاتور، fd، سیم‌پیچی تحریک، 1d، سیم‌پیچی میرا کننده محور d، 1q و 2q سیم‌پیچی‌های میراکننده محور q، ω_r ، سرعت زاویه‌ای رتور برحسب رادیان بر ثانیه و θ زاویه بین محور مغناطیسی رتور و محور مرجع (محور مغناطیسی فاز a) است.

در بدست آوردن معادلات ماشین سنکرون برای ساده‌سازی فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:
الف) شکاف‌های موجود بر روی سطح داخلی استاتور تاثیر قابل توجهی بر اندوکتانس‌های رتور در حال حرکت ندارند.

ب) پسماند مغناطیسی آهن استاتور و رتور قابل صرف نظر کردن است.

ج) از نظر تاثیر متقابل استاتور و رتور، سیم‌پیچی‌های استاتور بصورت سینوسی در امتداد فاصله هوایی توزیع شده‌اند.

با فرض حالت ژنراتوری، معادلات ولتاژ مربوط به سیم‌بندی‌های استاتور و رتور را می‌توان بصورت

روابط (۱-۲) نوشت.

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{d}{dt} \Psi_s - R_s I_s \\ V_r &= \frac{d}{dt} \Psi_r - R_r I_r \end{aligned} \quad (1-2)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}
 V_s &= [v_a \quad v_b \quad v_c]^T \\
 V_r &= [v_f \quad v_{1d} \quad v_{1q} \quad v_{2q}]^T \\
 I_s &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \\
 I_r &= [i_f \quad i_{1d} \quad i_{1q} \quad i_{2q}]^T \\
 \Psi_s &= [\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_c]^T \\
 \Psi_r &= [\psi_f \quad \psi_{1d} \quad \psi_{1q} \quad \psi_{2q}]^T \\
 R_s &= \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix} \\
 R_r &= \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{1q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{2q} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{۲-۲}$$

معادلات شاردهای استاتور و رتور را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned}
 \Psi_s &= L_{ss} I_s + L_{sr} I_r \\
 \Psi_r &= L_{sr}^T I_s + L_{rr} I_r
 \end{aligned} \tag{۳-۲}$$

که در آن ماتریس‌های اندوکتانس استاتور و رتور با روابط (۴-۲) بیان می‌شوند.

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi) \\ -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2} L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lf} + L_f & L_{f1d} & 0 & 0 \\ L_{1df} & L_{l1d} + L_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{l1q} + L_{1q} & L_{1q2q} \\ 0 & 0 & L_{2q1q} & L_{l2q} + L_{2q} \end{bmatrix} \tag{۴-۲}$$

$$L_{sr} = L_{rs}^T = \begin{bmatrix} L_{sf} \sin \theta_r & L_{s1d} \sin \theta_r & L_{s1q} \cos \theta_r & L_{s2q} \cos \theta_r \\ L_{sf} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{s1d} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{s1q} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{s2q} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sf} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{s1d} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{s1q} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{s2q} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

جزئیات بیشتر در مورد این اندوکتانس‌ها در مرجع [9] آمده است و از تکرار آن خودداری می‌شود. با استفاده از این دسته معادلات می‌توان بطور کامل ماشین سنکرون را بررسی نمود. اما این معادلات دارای عباراتی هستند که با θ_r تغییر می‌کنند. با توجه به اینکه θ_r نیز تابعی از زمان می‌باشد، این موضوع سبب پیچیده‌تر شدن تحلیل ماشین‌های سنکرون می‌شود. می‌توان با تبدیل مناسبی، متغیرهای استاتور را به شکل ساده‌تری درآورد. این تبدیل به نام تبدیل پارک معروف است و جزئیات آن در مرجع [9] آمده است. معادله (۵-۲) رابطه اساسی این تبدیل را نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

در این رابطه، S می‌تواند هر کدام از متغیرهای ولتاژ، جریان یا شارردور ماشین باشد. عکس تبدیل پارک نیز بصورت رابطه (۶-۲) بیان می‌شود.

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_o \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

با انتخاب دو محور طولی (d) و عرضی (q) که 90 درجه اختلاف فاز دارند، شارهای تولید شده توسط جریان‌ها بر روی یک محور هیچ پیوندی با شارهای محور دیگر نخواهند داشت. بنابراین دو دسته متغیر متعامد بدست خواهند آمد که این موضوع باعث ساده‌سازی بسیاری خواهد شد. زیرا می‌توان مدار معادل ماشین را بصورت دو مدار مستقل از هم در نظر گرفت. بنابراین با اعمال این تبدیل، معادلات حاکم بر ماشین سنکرون و متغیرهای متناظر بسیار ساده خواهند شد. در واقع این تبدیل را می‌توان به ابزاری برای ارجاع کمیت‌های استاتور به طرف رتور تشبیه کرد. مشابه این تبدیل در ارجاع متغیرهای ثانویه ترانسفورماتور به طرف اولیه آن جهت ساده‌سازی معادلات، انجام می‌شود.

به دلایل زیر، بررسی معادلات ماشین سنکرون بر حسب متغیرهای dq0 به میزان چشمگیری نسبت به کمیت‌های فاز آسان‌تر است:

الف) ماتریس اندوکتانس نهایی دارای مقادیری ثابت است.

ب) در حالت متعادل، کمیت‌های مولفه صفر ظاهر نمی‌شوند.

ج) در شرایط بهره‌برداری عادی و حالت ماندگار، تمامی جریان‌ها و شارهای سیم‌پیچی‌های استاتور و رتور دارای مقدار ثابتی خواهند بود.

د) پارامترهای محورهای d و q را می‌توان از طریق آزمایش در پایانه‌های ماشین بدست آورد.

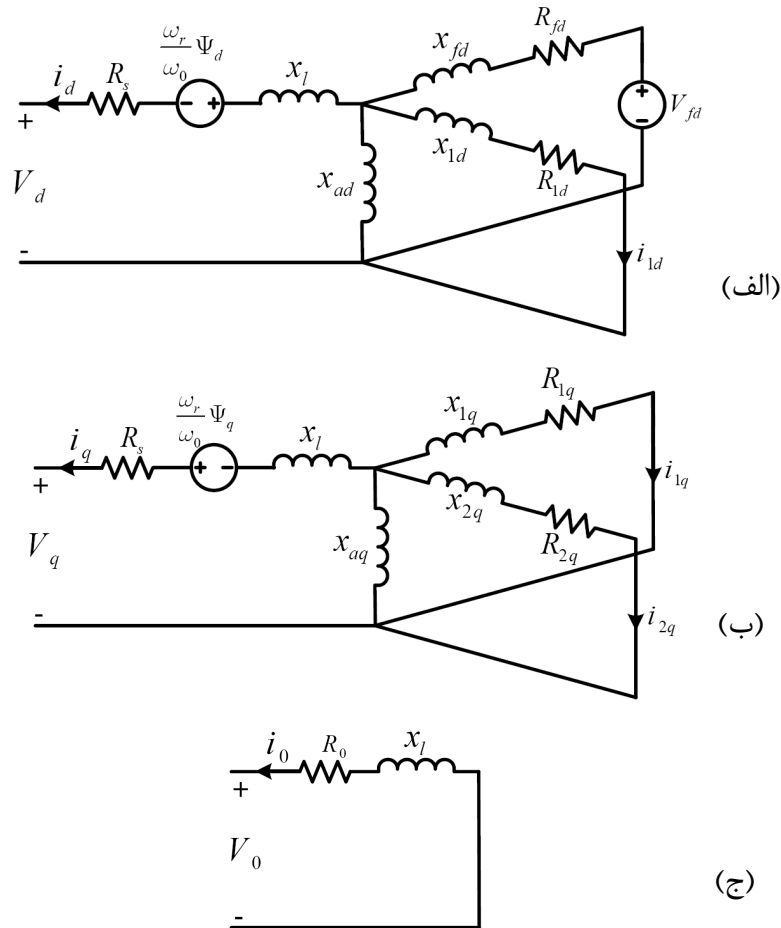
معادلات نهایی ولتاژ در دستگاه مرجع رتور به شکل روابط (۷-۲) است. جزئیات بدست آوردن این معادلات در مراجع و کتاب‌های مختلفی از جمله [9] تشریح شده و در اینجا از تکرار مجدد آن خودداری می‌شود. با داشتن این روابط، رفتار الکتریکی ماشین شبیه‌سازی می‌شود.

$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_d - \frac{\omega_r}{\omega_0} \Psi_q - r_a i_d \\
 V_q &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_q + \frac{\omega_r}{\omega_0} \Psi_d - r_a i_q \\
 e_{fd} &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_{fd} - r_{fd} i_{fd} \\
 0 &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_{1d} - r_{1d} i_{1d} \\
 0 &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_{1q} - r_{1q} i_{1q} \\
 0 &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_{2q} - r_{2q} i_{2q}
 \end{aligned} \tag{۷-۲}$$

همچنین معادلات شار محورهای طولی، عرضی و خنثی مطابق روابط (۸-۲) می‌باشند.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_{fd} \\ \Psi_{1d} \end{bmatrix} &= \frac{1}{\omega_0} \begin{bmatrix} X_l + X_{ad} & X_{ad} & X_{ad} \\ X_{ad} & X_{fd} + X_{ad} & X_{ad} \\ X_{ad} & X_{ad} & X_{ld} + X_{ad} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_{fd} \\ i_{1d} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_{1q} \\ \Psi_{2q} \end{bmatrix} &= \frac{1}{\omega_0} \begin{bmatrix} X_l + X_{aq} & X_{aq} & X_{aq} \\ X_{aq} & X_{l1q} + X_{aq} & X_{aq} \\ X_{aq} & X_{aq} & X_{l2q} + X_{aq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_{1q} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \\
 \Psi_o &= -\frac{1}{\omega_0} X_o i_o
 \end{aligned} \tag{۸-۲}$$

براساس روابط ولتاژ و شار ارائه شده، می‌توان مدارهای معادل محورهای طولی و عرضی ماشین سنکرون را بدست آورد که در شکل (۲-۲) نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۲: مدارهای معادل ماشین سنکرون براساس تئوری پارک
 (الف) مدار معادل محور طولی (ب) مدار معادل محور عرضی (ج) مدار معادل محور صفر

۲-۳. پارامترهای ماشین سنکرون

در معادلات حاکم بر ماشین سنکرون که در قسمت قبل ارائه شد، اندوکتانس‌ها و مقاومت‌های مدارهای استاتور و رتور به صورت پارامتر ظاهر شدند. این پارامترها موسوم به پارامترهای اصلی یا اساسی ماشین هستند و بصورت اجزای مدارهای معادل دو محور d و q در شکل (۲-۲) قابل تشخیص می‌باشند. هر چند این پارامترها بطور کامل مشخصه‌های الکتریکی ماشین را بیان می‌کنند، اما آنها را نمی‌توان از عکس العمل‌های قابل اندازه‌گیری ماشین مستقیماً بدست آورد. از اینرو، روش مرسوم در

تعیین اطلاعات ماشین این است که آنها را برحسب پارامترهایی بیان می‌کنند که از رفتار قابل مشاهده ماشین در پایانه‌های آن قابل تشخیص بوده و تحت آزمایش‌های مناسب، قابل اندازه‌گیری هستند. در این قسمت انواع پارامترهای ماشین و ارتباط آن با پارامترهای اساسی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۳-۱. پارامترهای اساسی ماشین

پارامترهای اساسی ماشین یا پارامترهای مدار معادل، از اعمال تبدیل پارک بر روی معادلات حوزه زمان ماشین سنکرون بدست می‌آیند و مشخص‌کننده عناصر مدارهای معادل محورهای طولی و عرضی ماشین هستند. تعداد این پارامترها با مرتبه مدل تغییر می‌کنند. از مشکلات عمده کار با این پارامترها، مشخص نبودن مقدار دقیق همگی آنها است. بعبارت دیگر روشی برای تعیین مقادیر دقیق این پارامترها بصورت یکجا وجود ندارد و تمام روش‌های موجود، مقادیر تقریبی مربوط به این پارامترها را بدست می‌دهند.

بعنوان نمونه اگر مدل (2.2) استاندارد IEEE 1110 را در نظر بگیریم [10]، کلیه عناصر مداری این مدل، پارامترهای مدار معادل بوده و به راحتی قابل محاسبه و اندازه‌گیری نمی‌باشند. حتی بعضی از آنها مخصوصاً بعضی از پارامترهای برخی از شاخه‌های مدار محور q ، وجود فیزیکی خارجی نداشته و صرفاً جهت مدل‌سازی رفتار ماشین در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۳-۲. پارامترهای عملیاتی

همانگونه که از نام این پارامترها پیداست، پارامترهای عملیاتی، ماشین سنکرون را از دید سیستمی توصیف کرده و تعیین‌کننده رابطه ورودی و خروجی ماشین سنکرون می‌باشند. در این حالت تغییرات شار محور طولی و عرضی، تغییرات جریان محورهای طولی و عرضی و تغییرات ولتاژ سیستم تحریک بعنوان ورودی یا خروجی‌های سیستم در نظر گرفته شده و با استفاده از پارامترهای عملیاتی، این

ورودی‌ها و خروجی‌ها به یکدیگر مرتبط می‌شوند. در شکل عملیاتی، معادلات رتور را می‌توان به صورت سیستمی با پارامترهای گسترده محسوب کرد. این پارامترها را می‌توان از طریق محاسبات طراحی و یا از طریق آزمایش پاسخ فرکانسی بدست آورد. هنگامیکه تعداد محدودی مدار برای رتور در نظر گرفته شود، می‌توان این پارامترها را بصورت نسبت دو چندجمله‌ای بر حسب S (عملگر لاپلاس) بیان نمود. درجه چندجمله‌ای مخرج حداکثر برابر تعداد مدارهای فرض شده بر روی رتور است. پارامترهای عملیاتی نسبت به پارامترهای مدار معادل کاربرد بیشتری داشته و به ماشین وجهه سیستمی می‌دهند. این پارامترها در حقیقت مشخصه‌های فرکانسی ماشین سنکرون هستند و عبارتند از یک دسته منحنی‌های مشخصه یا روابط تحلیلی که رابطه بین امپدانس مختلط (یا ادمیتانس مختلط) را نسبت به لغزش در فرکانس نامی اعمال شده، مشخص می‌نمایند. سه مشخصه مهم فرکانسی ماشین بصورت زیر است:

(الف) امپدانس عملیاتی محور طولی $(Z_d(s))$

این مشخصه بصورت نسبت بین دامنه مولفه اصلی و ماندگار ولتاژ آرمیچر ناشی از مولفه محور طولی جریان آرمیچر به دامنه مولفه اصلی و مختلط این جریان که بصورت تابعی از فرکانس بیان می‌شود، تعریف شده است. این مشخصه، در حالتی که سیم‌بندی میدان اتصال کوتاه شده است، برای فرکانس‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود.

(ب) امپدانس عملیاتی محور عرضی $(Z_q(s))$

این مشخصه بصورت نسبت بین دامنه مولفه اصلی ولتاژ آرمیچر تولید شده توسط شار مغناطیسی محور عرضی ناشی از مولفه جریان آرمیچر در جهت محور عرضی، به دامنه مولفه اصلی این جریان تعریف می‌شود.

(ج) مشخصه فرکانسی بین سیم‌پیچی میدان و آرمیچر $(G(s))$

این مشخصه بصورت نسبت بین دامنه مولفه اصلی ولتاژ آرمیچر، ناشی از جریان سیم‌پیچ میدان در فرکانس‌های مختلف، به دامنه مولفه اصلی ولتاژ اعمالی در سیم‌بندی میدان تعریف می‌شود.

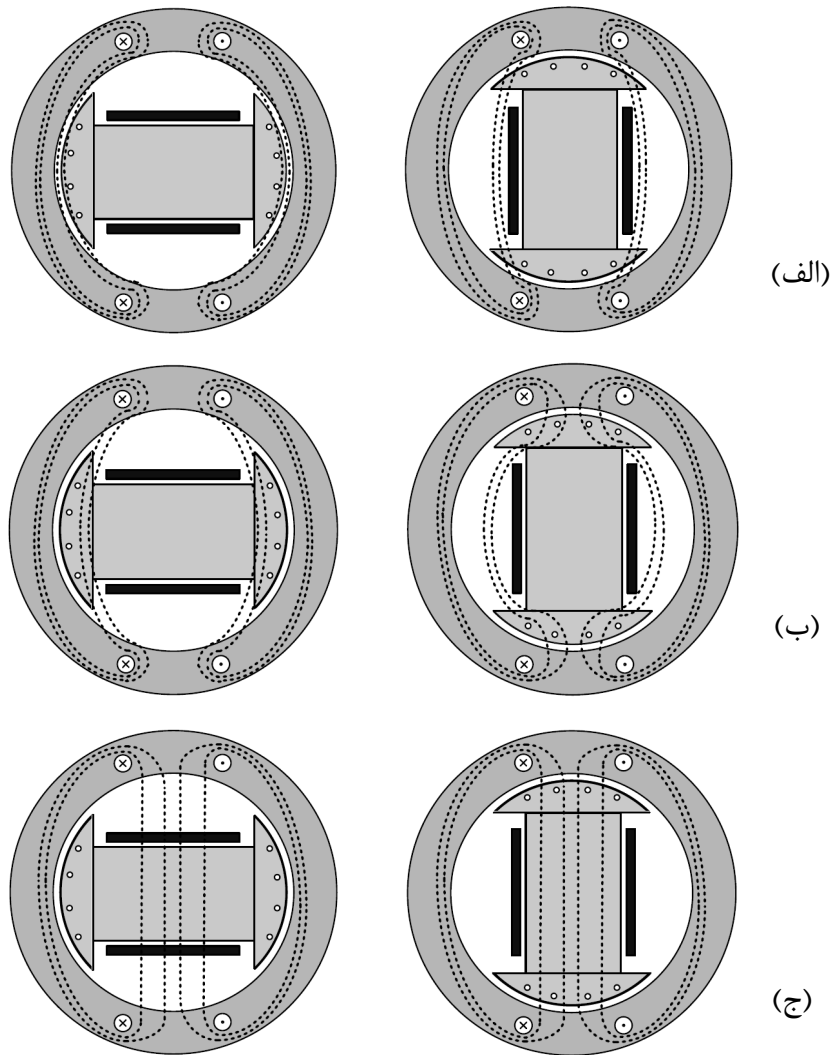
۲-۳-۳. پارامترهای دینامیکی

این پارامترها به لحاظ سابقه، اهمیت و کاربرد فراوان آنها، پارامترهای استاندارد ماشین نامیده می‌شوند. اما از آنجائیکه بیشتر حالت‌های گذرا و دینامیکی ژنراتور را توصیف می‌نمایند، به آنها پارامترهای دینامیکی نیز اطلاق می‌شود. یکی از دلایل اهمیت این پارامترها، قابلیت تشخیص و اندازه‌گیری آنها می‌باشد. این پارامترها را می‌توان با استفاده از آزمایش‌های خاصی که برخی از استانداردها نیز به آن اشاره دارند [10-11]، مستقیماً بدست آورد. با استفاده از این پارامترها می‌توان ژنراتور سنکرون را بویژه در حالات گذرا و دینامیکی تحلیل نمود. تقسیم‌بندی این پارامترها که شامل اندوکتانس‌ها و ثابت زمانی‌ها هستند، به صورت پارامترهای دینامیکی محور طولی، محور عرضی همچنین پارامترهای تندگذر و کندگذر می‌باشند که بسته به نوع تحلیل، پارامترهای مورد نظر متفاوت خواهد بود. این پارامترها بطور خلاصه شامل راکتانس‌های سنکرون (X_d, X_q) ، راکتانس‌های تندگذر و کندگذر محورهای طولی و عرضی $(X'_d, X'_q, X''_d, X''_q)$ ، ثابت زمانی‌های کندگذر و تندگذر اتصال کوتاه محورهای طولی و عرضی $(T'_d, T'_q, T''_d, T''_q)$ و ثابت زمانی‌های کندگذر و تندگذر مدار باز محورهای طولی و عرضی $(T'_{do}, T'_{qo}, T''_{do}, T''_{qo})$ می‌باشند.

۲-۴. مفهوم گذرای و عملکرد دینامیکی ماشین سنکرون

در محاسبه مقادیر اولیه شارهای گذرا در مدارهای تزویج شده، از تئوری ثابت بودن شار دور استفاده می‌شود. این تئوری بطور خلاصه عبارتست از اینکه شار دور مدار القایی با مقاومت و یک emf کوچک نمی‌تواند بطور لحظه‌ای تغییر یابد. در حقیقت اگر emf یا مقاومتی در مدار موجود نباشد، شار دور آن ثابت خواهد ماند. این تئوری را می‌توان در محاسبه جریان‌ها بلافاصله بعد از تغییر شرایط مدار برحسب جریان‌های قبل از تغییر استفاده کرد. هنگامیکه یک اغتشاش همانند اتصال کوتاه در سمت استاتور ماشین اتفاق می‌افتد، شار عبوری از سیم‌بندی‌های ماشین تغییر می‌کند. پاسخ ماشین به اغتشاش براساس نحوه تغییرات جریان‌ها و شارها عموماً به سه دوره زیرگذرا، دوره گذرا و ماندگار

تقسیم می‌شود. در دوره زیرگذرا تغییر در جریان سیم‌پیچی‌های میراکننده، مانع از نفوذ شار ایجاد شده توسط استاتور به رتور می‌گردد. با کاهش جریان سیم‌پیچی‌های میراکننده، دوره گذرا آغاز می‌شود که در آن تغییر جریان‌های سیم‌پیچی میدان همان اثر را، اما ضعیف‌تر خواهد داشت. در نهایت در حالت ماندگار، شار ایجاد شده استاتور به داخل رتور نفوذ خواهد کرد. شکل (۲-۳) توزیع شار در دوره‌های زیرگذرا، گذرا و ماندگار ماشین پس از وقوع یک اغتشاش در سمت استاتور را نشان می‌دهد. براساس مسیر شار در هر یک از این حالت‌ها می‌توان راکتانس‌های سنکرون، گذرا و زیرگذرای ماشین و همچنین ثابت زمانی‌های متناظر را تعریف کرد.



شکل ۲-۳: توزیع شار در ماشین‌های سنکرون قطب برجسته

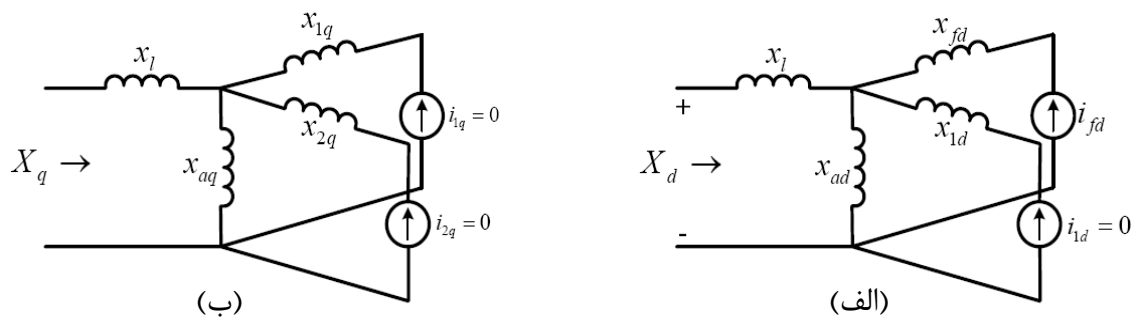
(الف) دوره زیرگذرا (ب) دوره گذرا (ج) حالت ماندگار

در این قسمت نحوه محاسبه پارامترهای دینامیکی ماشین سنکرون برحسب پارامترهای اساسی یا همان پارامترهای مدار معادل ماشین تشریح می‌شود. همچنین مدار معادل ماشین برای هر یک از حالت‌های ماندگار، گذرا و زیرگذرا ارائه می‌شود. مدل در نظر گرفته شده برای ژنراتور براساس استاندارد IEEE 1110 است.

۲-۵. محاسبه راکتانس‌های ماشین

۲-۵-۱. راکتانس‌های سنکرون

معمولاً اندوکتانس را به عنوان نسبت شار دور به جریان تعریف می‌کنند. وقتی که قله گردان mmf در امتداد محور d قرار گرفت، نسبت شار دور استاتور به جریان استاتور اندوکتانس محور d نامیده می‌شود. با بدست آمدن اندوکتانس‌ها بدیهی است که راکتانس‌های متناظر نیز به سادگی قابل محاسبه هستند. همچنین وقتی قله گردان mmf در امتداد محور q قرار بگیرد، نسبت شار دور استاتور به جریان آن، اندوکتانس سنکرون محور q خواهد بود. شکل (۲-۴) مدار معادل ماشین را در شرایط حالت ماندگار نشان می‌دهد.



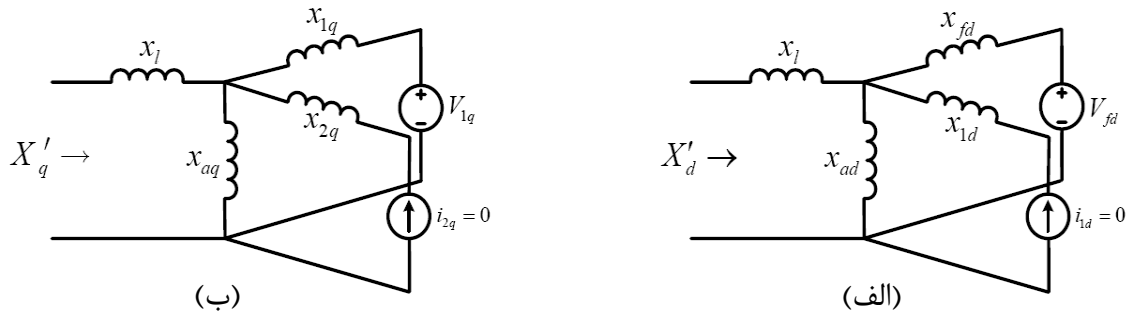
شکل ۲-۴: مدارهای معادل ماشین سنکرون در حالت ماندگار
 (الف) مدار معادل محور طولی (ب) مدار معادل محور عرضی

در حالت ماندگار، راکتانس‌های سنکرون محورهای طولی و عرضی ماشین، با توجه به شکل (۲-۴) بصورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} X_d &= X_l + X_{ad} \\ X_q &= X_l + X_{aq} \end{aligned} \quad (۲-۹)$$

۲-۵-۲. راکتانس‌های گذرا

برای محور مستقیم، با توجه به اینکه مقاومت سیم‌پیچی‌های میراکننده معمولاً بزرگتر از مقاومت سیم‌بندی میدان می‌باشد، جریان القایی در این سیم‌پیچی‌ها بسیار سریع‌تر از جریان‌های القایی در سیم‌بندی میدان میرا می‌شوند. برای دوره گذرا فرض می‌شود که حالت گذرای سیم‌بندی‌های میراکننده با میرایی فوق‌العاده زیاد تمام شده است، در حالیکه جریان‌های القایی در سیم‌بندی میدان هنوز برای مخالفت با تغییر شار دور ناشی از جریان‌های استاتور تغییر می‌کنند. مدار معادل محور q نیز به طریق مشابه قابل توجیه است. شکل (۲-۵) مدارهای معادل ماشین در دوره گذرا را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵: مدارهای معادل ماشین سنکرون در دوره گذرا

(الف) مدار معادل محور طولی (ب) مدار معادل محور عرضی

براساس مدارهای معادل بدست آمده، راکتانس‌های گذرای محورهای d و q مطابق روابط (۲-۱۰)

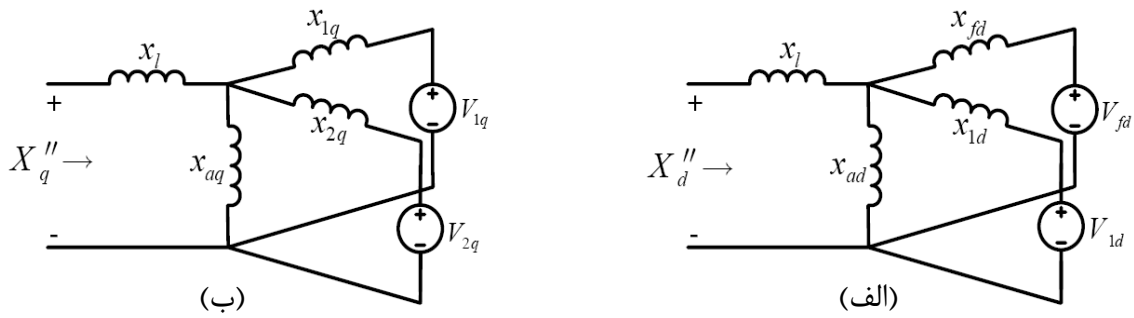
محاسبه می‌شوند.

$$X'_d = X_l + X_{ad} \parallel X_{fd} = X_l + \frac{X_{ad} X_{fd}}{X_{ad} + X_{fd}} \quad (۲-۱۰)$$

$$X'_q = X_l + X_{aq} \parallel X_{1q} = X_l + \frac{X_{aq} X_{1q}}{X_{aq} + X_{1q}}$$

۳-۵-۲. راکتانس‌های زیر گذرا

در دوره زیر گذرا، جریان‌های گذرای القا شده در سیم‌بندی‌های رتور سعی دارند تا شار دور هر یک از مدارهای رتور را ثابت نگه دارند. بر این اساس، مدارهای معادل محورهای d و q ماشین سنکرون در این حالت مطابق شکل (۲-۶) است.



شکل ۲-۶: مدارهای معادل ماشین سنکرون در دوره زیرگذرا
 (الف) مدار معادل محور طولی (ب) مدار معادل محور عرضی

در این حالت راکتانس دیده شده برای محور d معادل سه راکتانس موازی X_{ad} ، X_{fd} و X_{1d} می‌باشد که با X_l سری شده است. راکتانس زیرگذرای مدار باز محور q نیز مشابه محور d محاسبه می‌شود. براساس مدار معادل‌های ارائه شده، این راکتانس‌ها طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$X_d'' = X_l + X_{ad} \parallel X_{fd} \parallel X_{1d} = X_l + \frac{X_{ad} X_{fd} X_{1d}}{X_{ad} X_{fd} + X_{ad} X_{1d} + X_{fd} X_{1d}} \quad (2-11)$$

$$X_q'' = X_l + X_{aq} \parallel X_{1q} \parallel X_{2q} = X_l + \frac{X_{aq} X_{1q} X_{2q}}{X_{aq} X_{1q} + X_{aq} X_{2q} + X_{1q} X_{2q}}$$

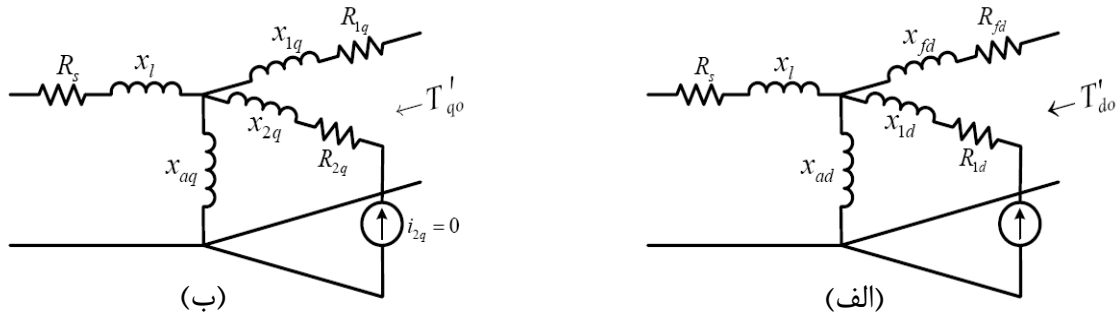
۲-۶. محاسبه ثابت‌های زمانی ماشین

براساس مدل استاندارد IEEE 1110، حضور دو مجموعه سیم‌بندی بر روی محورهای رتور، مجموعه ثابت زمانی مختلف را سبب می‌شود. مجموعه با مقادیر بزرگتر مربوط به ثابت زمانی‌های گذرا و مجموعه با مقادیر کوچکتر مربوط به ثابت زمانی‌های زیرگذرا هستند. معمولاً سیم‌بندی‌های میراکنده که مقاومت بیشتری نسبت به سیم‌بندی‌های میدان دارند، با ثابت زمانی‌های زیرگذرا متناظرند.

ثابت زمانی‌های گذرا و زیرگذرا بر روی محورهای d و q معمولاً در دو حالت تعریف می‌شوند. در یک حالت که استاتور مدار باز است و ثابت زمانی‌های مدار باز تعریف می‌شود $(T'_{do}, T'_{qo}, T''_{do}, T''_{qo})$ ، و در حالت دیگر سیم‌پیچی استاتور بصورت اتصال کوتاه فرض می‌شود $(T'_d, T'_q, T''_d, T''_q)$.

۲-۶-۱. ثابت زمانی‌های گذرا

مدار معادل ماشین جهت استخراج ثابت زمانی‌های گذرای مدار باز محور d و q در شکل (۷-۲) نشان داده شده است.



شکل ۷-۲: مدارهای معادل ماشین جهت استخراج ثابت زمانی‌های گذرای مدار باز
(الف) مدار معادل محور طولی (ب) مدار معادل محور عرضی

براساس این شکل و فرضیات فوق، ثابت زمانی‌های گذرای مدار باز ماشین از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$T'_{do} = \frac{1}{\omega_0 R_{fd}} (X_{fd} + X_{ad}) \quad (12-2)$$

$$T'_{qo} = \frac{1}{\omega_0 R_{1q}} (X_{1q} + X_{aq})$$

همچنین مقادیر ثابت زمانی‌های گذرا با استاتور اتصال کوتاه شده بر اساس شکل (۷-۲) و با فرض اتصال کوتاه بودن سیم‌بندی استاتور به کمک روابط (۱۳-۲) محاسبه می‌شوند.

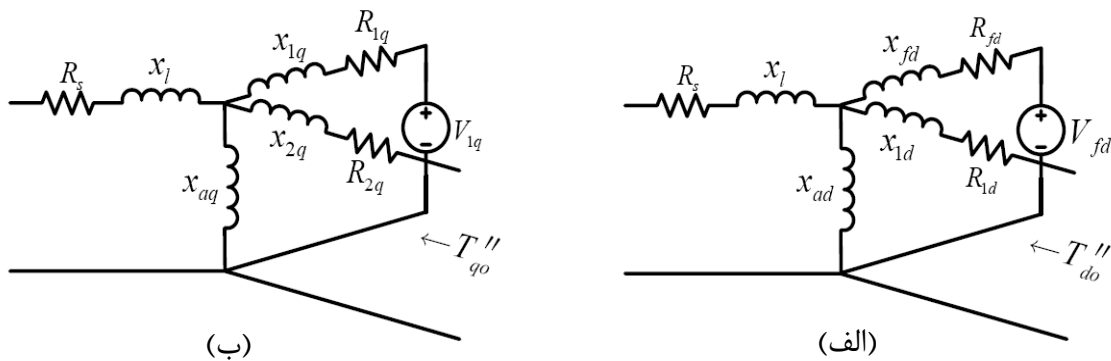
$$T'_d = \frac{1}{\omega_0 R_{fd}} (X_{fd} + X_l \| X_{ad}) = \frac{1}{\omega_0 R_{fd}} \left(X_{fd} + \frac{X_{ad} X_l}{X_{ad} + X_l} \right) \quad (13-2)$$

$$T'_q = \frac{1}{\omega_0 R_{1q}} (X_{1q} + X_l \| X_{aq}) = \frac{1}{\omega_0 R_{1q}} \left(X_{1q} + \frac{X_{aq} X_l}{X_{aq} + X_l} \right)$$

۲-۶-۲. ثابت زمانی‌های زیرگذرا

ثابت زمانی زیرگذرای مدار باز محور d عبارتست از زمان لازم برای کاهش مولفه d جریان به مقدار 1/e مقدار اولیه خود، هنگامیکه در ترمینال ماشینی که با سرعت نامی می‌چرخد، بطور ناگهانی اتصال

کوتاهی رخ دهد. بعبارت دیگر این ثابت زمانی عبارتست از ثابت زمانی جریان سیم‌بندی میراکننده d وقتی سیم‌بندی میدان اتصال کوتاه شده و سیم‌بندی‌های استاتور مدار باز باشند. از مقاومت سیم‌بندی میدان در این زمان کاهش ولتاژ صرف نظر می‌شود. ثابت زمانی‌های زیرگذرای مدار باز محور q نیز به طریق مشابه تعریف می‌شوند. شکل (۸-۲) مدار معادل ماشین جهت استخراج ثابت زمانی‌های زیرگذرای مدار باز را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۲: مدارهای معادل ماشین جهت استخراج ثابت زمانی‌های زیرگذرای مدار باز
(الف) مدار معادل محور طولی (ب) مدار معادل محور عرضی

براساس فرضیات فوق و مدار معادل‌های ماشین در دوره زیرگذرا، ثابت زمانی‌های زیرگذرای مدار باز ماشین با روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$T''_{do} = \frac{1}{\omega_0 R_{1d}} (X_{1d} + X_{fd} \| X_{ad}) = \frac{1}{\omega_0 R_{1d}} \left(X_{1d} + \frac{X_{ad} X_{fd}}{X_{ad} + X_{fd}} \right) \quad (۱۴-۲)$$

$$T''_{qo} = \frac{1}{\omega_0 R_{2q}} (X_{2q} + X_{1q} \| X_{aq}) = \frac{1}{\omega_0 R_{2q}} \left(X_{2q} + \frac{X_{aq} X_{1q}}{X_{aq} + X_{1q}} \right)$$

همچنین با فرض اتصال کوتاه بودن سیم‌بندی استاتور به کمک شکل (۸-۲)، ثابت زمانی‌های زیرگذرای اتصال کوتاه ماشین از روابط (۱۵-۲) بدست می‌آیند.

$$T''_d = \frac{1}{\omega_0 R_{1d}} (X_{1d} + X_{fd} \| X_{ad} \| X_l) = \frac{1}{\omega_0 R_{1d}} \left(X_{1d} + \frac{X_{fd} X_{ad} X_l}{X_{ad} X_{fd} + X_{fd} X_l + X_{ad} X_l} \right) \quad (۱۵-۲)$$

$$T''_q = \frac{1}{\omega_0 R_{2q}} (X_{2q} + X_{1q} \| X_{aq} \| X_l) = \frac{1}{\omega_0 R_{2q}} \left(X_{2q} + \frac{X_{1q} X_{aq} X_l}{X_{aq} X_{1q} + X_{1q} X_l + X_{aq} X_l} \right)$$

در سیستم پریونیت، مقادیر راکتانس‌های سنکرون، گذرا و زیرگذرا با اندوکتانس‌های مربوطه برابر است. اما معمول است که پارامترهای ماشین سنکرون را بر حسب راکتانس‌های آن بیان نمایند. علاوه بر این، معمولاً پارامترهای دینامیکی شناسایی شده ماشین سنکرون در روابط زیر صدق می‌کنند.

$$X_d \geq X_q > X'_q \geq X'_d > X''_q \geq X''_d$$

$$T'_{do} \geq T'_d > T''_{do} > T''_d > T_{kd} \quad (۱۶-۲)$$

$$T'_{qo} > T'_q > T''_{qo} > T''_q$$

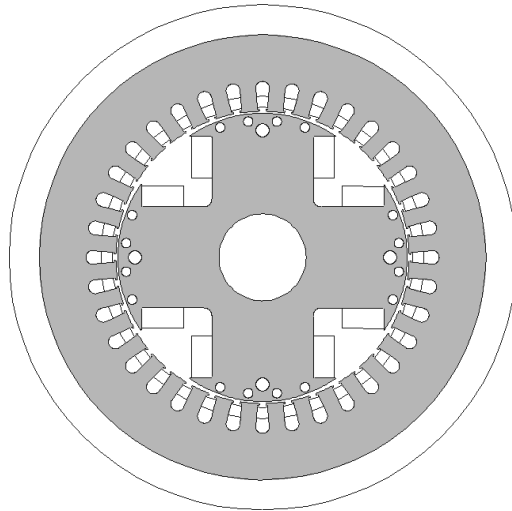
فصل سوم

تحليل ساختار ماشین با استفاده از FE

مدل‌سازی دو محوری ماشین نیازمند تعیین پارامترهای دینامیکی یا پارامترهای مدار معادل است. اما مدل‌سازی ماشین در فریم اصلی abc به کمک اندوکتانس‌های فضایی سیم‌پیچ‌ها امکان‌پذیر می‌باشد. این اندوکتانس‌ها می‌توانند با انجام آزمایش واقعی بر روی ماشین بدست آیند که مستلزم صرف زمان و هزینه بوده و خطای آزمایش نیز اجتناب‌ناپذیر است. از سوی دیگر امروزه استفاده از روش‌های اجزای محدود برای تحلیل انواع سیستم‌های مهندسی و بویژه سیستم‌های الکترومغناطیسی به سرعت در حال گسترش است [12-15]. نرم‌افزارهای ویژه‌ای برای تحلیل اجزای محدود انواع سیستم‌ها بوجود آمده که تعدادی از آنها مختص تحلیل ماشین‌های الکتریکی می‌باشند. در این فصل با استفاده از یک نرم‌افزار تخصصی به نام FEMM، مدل بسیار دقیقی از ماشین سنکرون مورد مطالعه، ارائه شده است. اطلاعات مربوط به جزئیات ساختار هسته‌های رتور و استاتور و همچنین چگونگی سیم‌پیچی ماشین، از نقشه‌های طراحی آن استخراج گردیده و در مدل اجزای محدود ماشین بکار گرفته شده است. مواد بکار رفته در سیم‌پیچ‌ها و هسته‌های آهنی با مشخصات الکتریکی و مغناطیسی تقریباً واقعی در مدل لحاظ گردیده است، زیرا رفتار مدل اجزای محدود شدیداً به رفتار غیر خطی این مواد وابسته است. با چرخش رتور در مقادیر کوچک، اندوکتانس‌های وابسته به موقعیت رتور تعیین می‌شوند.

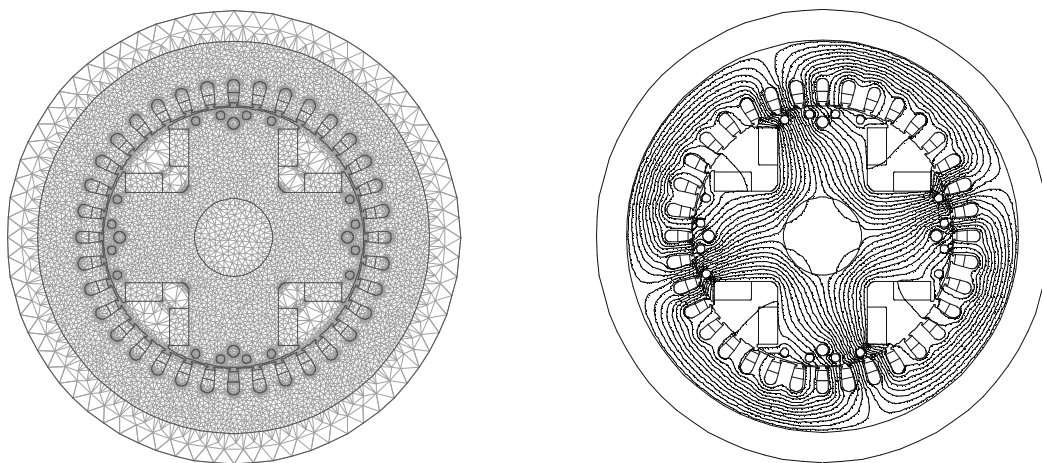
۱-۳. مدل سازی ماشین در محیط FEMM

ماشین مورد مطالعه یک آلترناتور Leroy Somer چهار قطبی کوچک (31.5^{kVA}) است که جزئیات ساختار و چگونگی سیم پیچ های آن توسط سازنده ارائه شده و در دسترس می باشد. با توجه به این اطلاعات، مدل دو بعدی ماشین پیاده سازی شده و در شکل زیر نشان داده شده است.



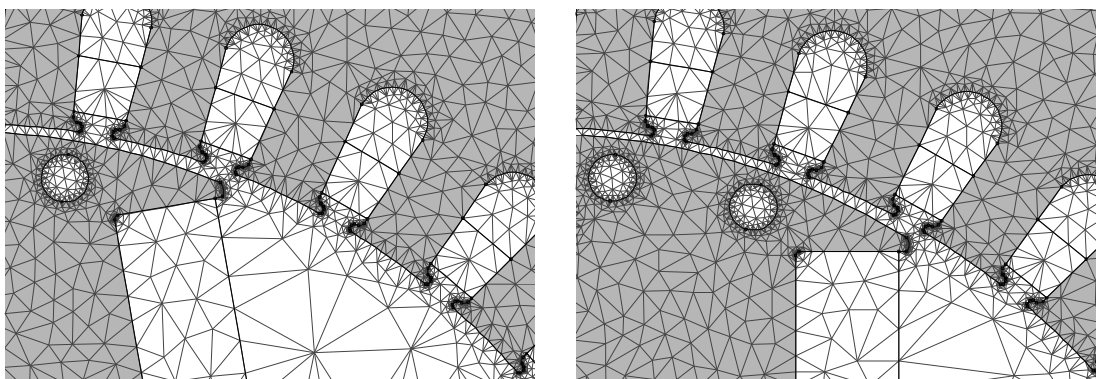
شکل ۱-۳: ساختار رتور و استاتور ماشین مورد مطالعه

تحلیل اجزای محدود این مدل، مقدار شار مغناطیسی در هر نقطه از ماشین را مشخص خواهد کرد. علاوه بر این مقدار اندوکتانس خودی و متقابل تمام سیم پیچ ها با توجه به شار پیوندی هر سیم پیچ قابل محاسبه است. شکل زیر چگونگی مش بندی ماشین و نیز توزیع شار آن را در جریان های نامی رتور و استاتور نشان می دهد.



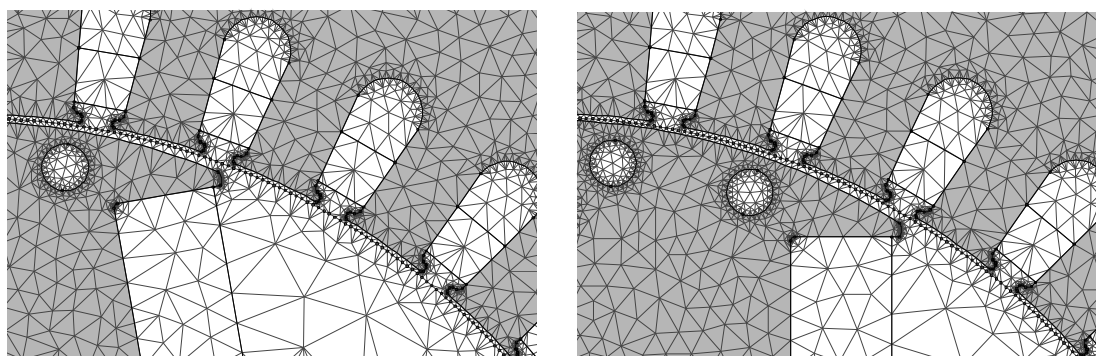
شکل ۲-۳: مش بندی ماشین و توزیع شار آن در جریان نامی

روش اجزای محدود در واقع یک روش عددی محسوب می‌شود و نتایج آن وابسته به چگونگی مش‌بندی سیستم است. شکل (۳-۳) نشان می‌دهد که چگونه هنگام چرخش رتور، مش‌های دندانه‌های استاتور عوض شده و لذا منجر به ایجاد خطا در نتایج خواهد شد.



شکل ۳-۳: تغییر مش بندی مدل ماشین هنگام چرخش رتور

برای رفع این مشکل از نقاطی روی یک دایره در فاصله هوایی رتور و استاتور و با فاصله بسیار کم (0.5°) استفاده شده است. اندازه چرخش رتور بصورت ضرب صحیحی از فاصله این نقطه‌ها انتخاب می‌شود تا مش‌بندی ماشین در این تغییر ثابت بماند. شکل (۴-۳) چگونگی عدم تغییر مش‌ها را هنگام چرخش رتور نشان می‌دهد.



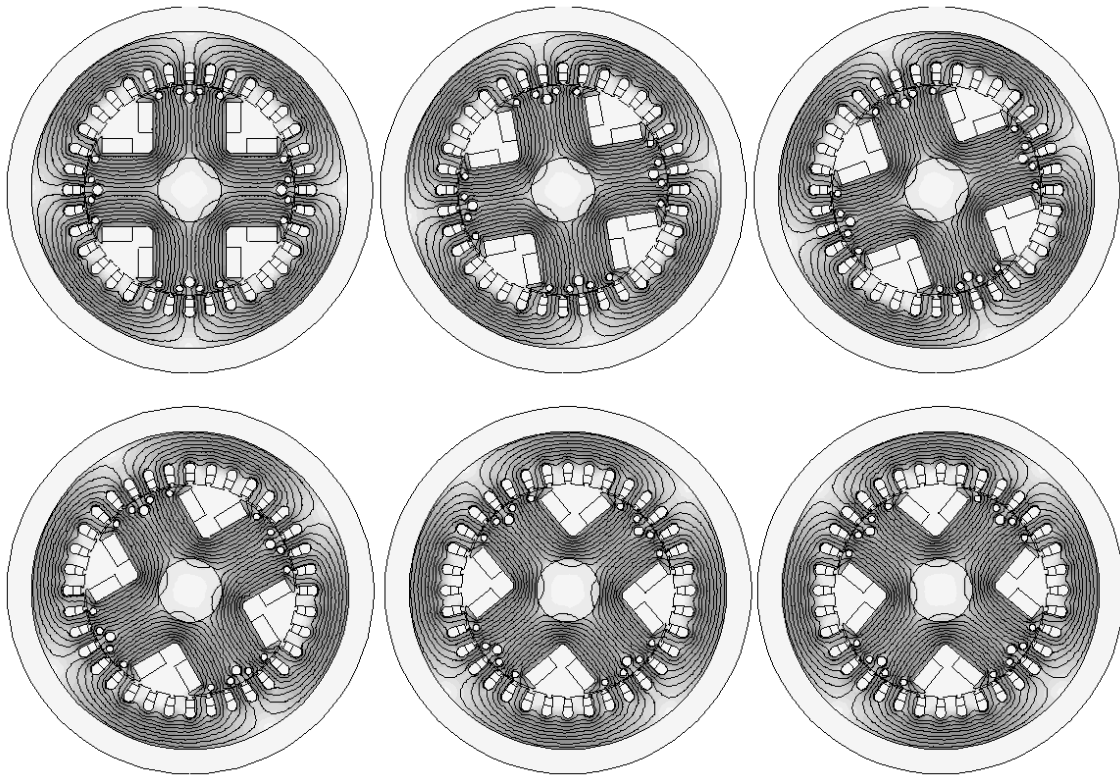
شکل ۴-۳: عدم تغییر مش بندی مدل ماشین هنگام چرخش رتور

هدف از توسعه مدل اجزای محدود ماشین، تعیین اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌های رتور و استاتور بر حسب زاویه چرخش رتور است. بدین منظور هر یک از سیم‌پیچ‌ها بصورت جداگانه با جریان نامی آن تحریک شده در حالیکه جریان سایر سیم‌پیچ‌ها صفر است. بنابراین اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌ها، از تقسیم شار پیوندی آنها بر جریان بدست می‌آید. با چرخش کامل رتور به اندازه 360° در اندازه‌های کوچک 10° و تعیین اندوکتانس‌های خودی و متقابل در هر مرحله، 36 نقطه از منحنی اندوکتانس بر حسب زاویه رتور بدست می‌آید. معادله کامل اندوکتانس‌های فضایی و هارمونیک‌های موثر آن، از برازش منحنی بر نقاط بدست آمده از مدل اجزای محدود تعیین می‌شود.

۲-۳. تحریک سیم‌پیچ رتور

در این مرحله جریان سیم‌پیچ‌های استاتور صفر شده و سیم‌پیچ رتور با جریان DC ($I_f=5.4^A$) تحریک می‌شود. با تعیین شار پیوندی سیم‌پیچ رتور و فاز a استاتور و تقسیم آنها بر جریان رتور می‌توان اندوکتانس خودی رتور و اندوکتانس متقابل رتور و فاز a استاتور را بدست آورد. با چرخش رتور به اندازه 10° درجه، این اندازه‌گیری تکرار شده و اندوکتانس‌های مذکور مجدداً بدست می‌آیند. بدیهی است که چرخش رتور باعث تغییر توزیع شار درون ماشین و تغییر اندوکتانس متقابل رتور و استاتور خواهد شد. شکل (۳-۵) توزیع شار درون ماشین را هنگام چرخش‌های 10° درجه‌ای رتور نشان می‌دهد.

نهایتاً پس از 360° درجه چرخش رتور، نتایج نشان داده شده در جدول (۳-۱) بدست خواهند آمد. همانگونه که انتظار می‌رود، شار پیوندی سیم‌پیچ رتور تقریباً ثابت است و لذا اندوکتانس خودی آن با دقت ۳ رقم اعشار بصورت $L_{ff}=1.923^H$ تعیین می‌شود. اما شار سیم‌پیچ فاز a استاتور با چرخش رتور تغییر می‌کند. این تغییرات با یک تابع سینوسی بطور دقیق قابل بیان نیست و شامل تعدادی هارمونیک می‌باشد [15]. با توجه به تعداد نقاط اندازه‌گیری شده، تعیین اندوکتانس متقابل رتور و استاتور تا هارمونیک مرتبه هفتم با دقت قابل قبولی امکان‌پذیر است.



شکل ۳-۵: توزیع شار درون ماشین در زوایای مختلف رتور

اندوکتانس L_{fa} و هارمونیک‌های موثر آن بصورت زیر فرض می‌شوند:

$$L_{fa}(\theta) = L_{fa1} \cos[2(\theta - \lambda)] + L_{fa3} \cos[3 \times 2(\theta - \lambda)] + L_{fa5} \cos[5 \times 2(\theta - \lambda)] + L_{fa7} \cos[7 \times 2(\theta - \lambda)] \quad (1-3)$$

که در آن θ زاویه چرخش رتور و λ زاویه بین محور مغناطیسی رتور و محور مغناطیسی فاز a استاتور در $\theta=0$ است. مقدار λ و نیز دامنه موج اصلی و هارمونیک‌های موثر اندوکتانس L_{fa} از برازش رابطه (۱-۳) بر نتایج جدول (۱-۳) تعیین می‌شوند.

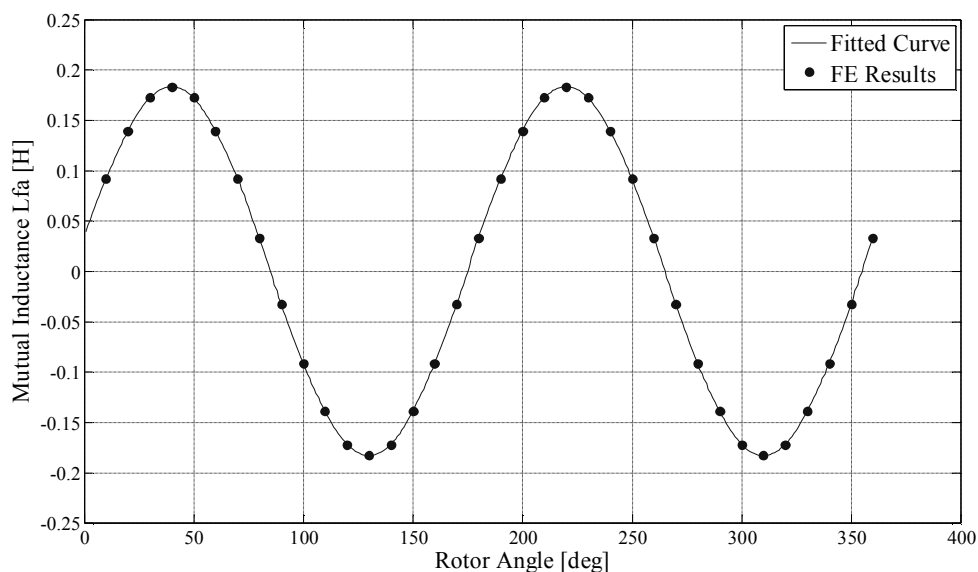
برای برازش منحنی^۱ از الگوریتم ژنتیک^۲ استفاده شده است که روشی پیشرفته و دقیق در این مساله محسوب می‌شود. در فصول بعدی به تشریح بیشتر این الگوریتم خواهیم پرداخت. شکل (۳-۶) منحنی انطباق یافته و نقاط بدست آمده از مدل FE را نشان می‌دهد. پارامترهای بدست آمده برای این انطباق، در جدول (۲-۳) آمده است.

¹ Curve Fitting

² Genetic Algorithm (GA)

جدول ۳-۱: نتایج بدست آمده از مدل FE با تحریک سیم پیچ رتور

Rotor Angle	Φ (F)	L_{ff}	Φ (A)	L_{fa}
10	10.3867	1.92347	0.494471	0.091569
20	10.3888	1.92385	0.751395	0.139147
30	10.3882	1.92375	0.92882	0.172004
40	10.3842	1.923	0.98895	0.183139
50	10.3876	1.92362	0.928965	0.172031
60	10.3866	1.92345	0.75144	0.139156
70	10.387	1.92352	0.494776	0.091625
80	10.3861	1.92334	0.177451	0.032861
90	10.3887	1.92383	-0.1772	-0.03281
100	10.3873	1.92358	-0.4945	-0.09157
110	10.3882	1.92374	-0.75147	-0.13916
120	10.3899	1.92406	-0.92887	-0.17201
130	10.3857	1.92328	-0.98904	-0.18316
140	10.3861	1.92336	-0.92885	-0.17201
150	10.3879	1.92369	-0.75148	-0.13916
160	10.3853	1.9232	-0.4945	-0.09157
170	10.3865	1.92342	-0.17738	-0.03285
180	10.3891	1.92391	0.17723	0.03282
190	10.3865	1.92343	0.494497	0.091574
200	10.3887	1.92383	0.751385	0.139145
210	10.3901	1.92409	0.928905	0.172019
220	10.385	1.92314	0.989	0.183148
230	10.3863	1.92339	0.928785	0.171997
240	10.3863	1.9234	0.75145	0.139157
250	10.3849	1.92313	0.494537	0.091581
260	10.3864	1.9234	0.177414	0.032854
270	10.3905	1.92417	-0.17727	-0.03283
280	10.3879	1.92368	-0.49452	-0.09158
290	10.3878	1.92367	-0.75141	-0.13915
300	10.3892	1.92393	-0.92886	-0.17201
310	10.386	1.92334	-0.98906	-0.18316
320	10.3869	1.92351	-0.92892	-0.17202
330	10.3865	1.92342	-0.75145	-0.13916
340	10.3865	1.92342	-0.49468	-0.09161
350	10.3873	1.92357	-0.17746	-0.03286
360	10.3888	1.92385	0.17725	0.032824



شکل ۳-۶: منحنی انطباق یافته و نقاط بدست آمده از مدل FE برای L_{fa}

جدول ۳-۲: پارامترهای منحنی اندوکتانس L_{fa}

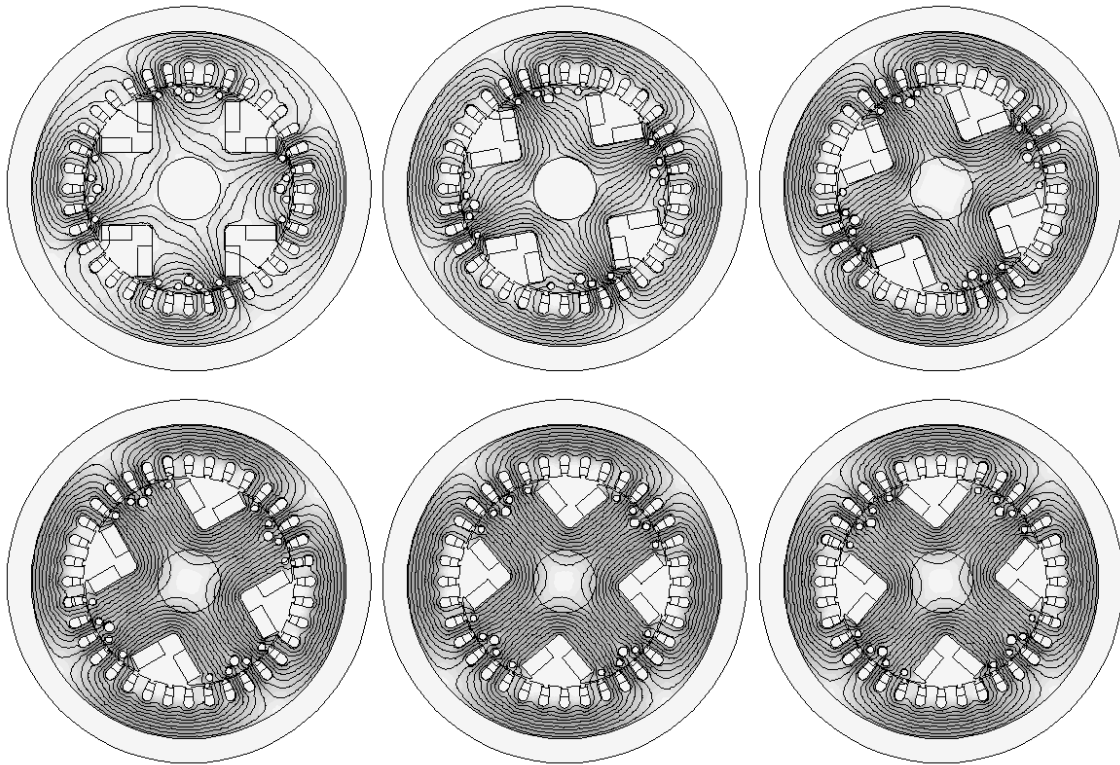
λ	L_{fa1}	L_{fa3}	L_{fa5}	L_{fa7}
0.698152	0.182813	-0.000002	0.000828	-0.000486

۳-۳. تحریک سیم‌پیچ استاتور

مشابه آنچه برای سیم‌پیچ رتور انجام شد، با تحریک یک فاز استاتور و صفر بودن جریان سایر سیم‌پیچ‌ها، می‌توان اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌های استاتور را بدست آورد. در این مرحله فاز a استاتور با یک جریان DC به اندازه مقدار موثر جریان نامی آن ($I_a=43.7483^A$) تحریک شده در حالیکه جریان سایر فازها و سیم‌پیچ رتور صفر است. با اندازه‌گیری شارهای پیوندی فاز a و b استاتور و تقسیم آنها بر جریان فاز a، می‌توان اندوکتانس خودی و متقابل فازهای استاتور را محاسبه کرد. با چرخش رتور و تغییر توزیع شار درون ماشین، این اندوکتانس‌ها تغییر خواهند کرد. در این مورد نیز تغییرات اندوکتانس کاملاً سینوسی نبوده و شامل تعدادی هارمونیک است. شکل (۳-۷) چگونگی تغییر توزیع شار درون ماشین هنگام چرخش رتور و جدول (۳-۳) نتایج حاصله را برای 360 درجه چرخش رتور، نشان می‌دهد.

جدول ۳-۳: نتایج بدست آمده از مدل FE با تحریک سیمپیچ فاز a استاتور

Rotor Angle	Φ (A)	L_{aa}	Φ (B)	L_{ab}
10	0.865115	0.019775	-0.75977	-0.01737
20	1.09074	0.024932	-0.89639	-0.02049
30	1.305965	0.029852	-0.87006	-0.01989
40	1.389325	0.031757	-0.6919	-0.01582
50	1.306135	0.029856	-0.43018	-0.00983
60	1.09067	0.024931	-0.18875	-0.00431
70	0.865355	0.01978	-0.09955	-0.00228
80	0.71123	0.016257	-0.21609	-0.00494
90	0.71154	0.016264	-0.48945	-0.01119
100	0.865365	0.019781	-0.75995	-0.01737
110	1.090875	0.024935	-0.89646	-0.02049
120	1.30597	0.029852	-0.87003	-0.01989
130	1.38931	0.031757	-0.69193	-0.01582
140	1.30602	0.029853	-0.43014	-0.00983
150	1.09079	0.024933	-0.18875	-0.00431
160	0.86481	0.019768	-0.0994	-0.00227
170	0.71136	0.01626	-0.21614	-0.00494
180	0.71155	0.016265	-0.48947	-0.01119
190	0.86527	0.019767	-0.75965	-0.01736
200	1.090945	0.024947	-0.89628	-0.02049
210	1.30551	0.029858	-0.87011	-0.01989
220	1.389055	0.031777	-0.69198	-0.01582
230	1.30624	0.029852	-0.43016	-0.00983
240	1.09059	0.024909	-0.18874	-0.00431
250	0.86518	0.019795	-0.09962	-0.00228
260	0.711015	0.016264	-0.21608	-0.00494
270	0.711635	0.016258	-0.48923	-0.01118
280	0.86529	0.01977	-0.7567	-0.0173
290	1.09069	0.024941	-0.89643	-0.02049
300	1.305865	0.029874	-0.87034	-0.01989
310	1.38946	0.031755	-0.69115	-0.0158
320	1.30642	0.029861	-0.43012	-0.00983
330	1.090915	0.024921	-0.18884	-0.00432
340	0.86495	0.01979	-0.09944	-0.00227
350	0.71114	0.016285	-0.21614	-0.00494
360	0.7128	0.016275	-0.48947	-0.01119



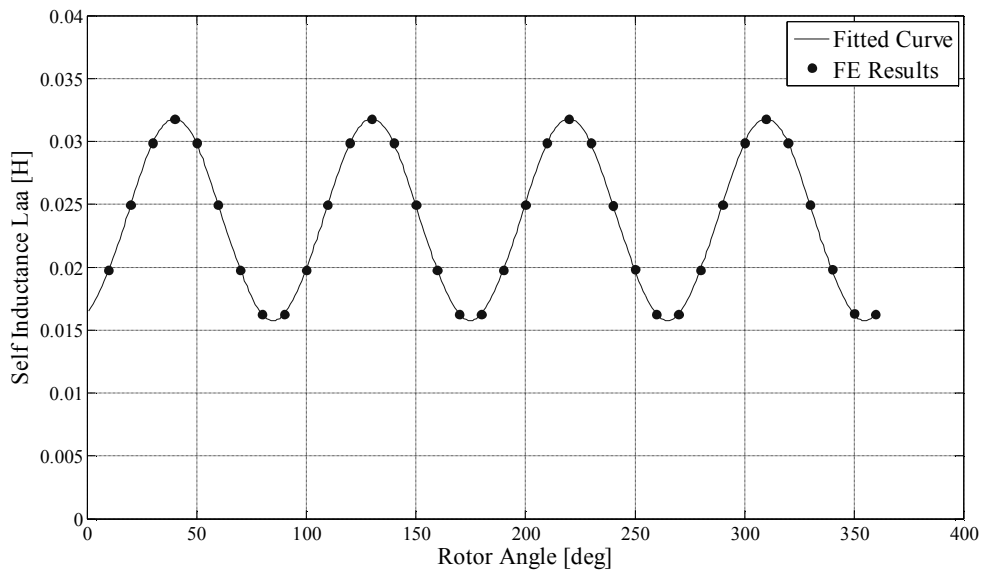
شکل ۳-۷: توزیع شار درون ماشین در زوایای مختلف رتور

اندوکتانس‌های L_{aa} و L_{ab} و هارمونیک‌های موثر آنها بصورت زیر فرض می‌شوند:

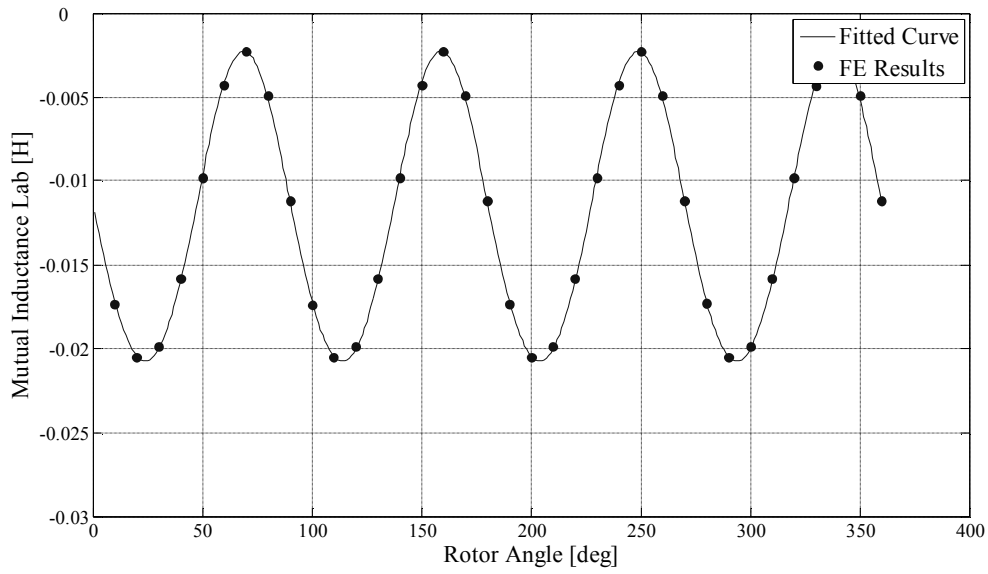
$$L_{aa}(\theta) = L_{aa0} + L_{aa2} \cos[2 \times 2(\theta - \lambda)] + L_{aa4} \cos[4 \times 2(\theta - \lambda)] + L_{aa6} \cos[6 \times 2(\theta - \lambda)] + L_{aa8} \cos[8 \times 2(\theta - \lambda)] \quad (2-3)$$

$$L_{ab}(\theta) = L_{ab0} + L_{ab2} \cos\left[2 \times 2\left(\theta - \lambda - \frac{\pi}{6}\right)\right] + L_{ab4} \cos\left[4 \times 2\left(\theta - \lambda - \frac{\pi}{6}\right)\right] + L_{ab6} \cos\left[6 \times 2\left(\theta - \lambda - \frac{\pi}{6}\right)\right] + L_{ab8} \cos\left[8 \times 2\left(\theta - \lambda - \frac{\pi}{6}\right)\right] \quad (3-3)$$

پارامترهای مجهول در معادلات (۲-۳) و (۳-۳) از برازش این معادلات بر نقاط بدست آمده از مدل FE تعیین می‌شوند. این پارامترها در جداول (۳-۳) و (۴-۳) نشان داده شده‌اند. شکل‌های (۸-۳) و (۹-۳) نیز منحنی‌های انطباق یافته این معادلات بر نقاط بدست آمده از FE را نشان می‌دهند.



شکل ۳-۸: منحنی انطباق یافته و نقاط بدست آمده از مدل FE برای L_{aa}



شکل ۳-۹: منحنی انطباق یافته و نقاط بدست آمده از مدل FE برای L_{ab}

جدول ۳-۴: پارامترهای منحنی اندوکتانس L_{aa}

λ	L_{aa0}	L_{aa2}	L_{aa4}	L_{aa6}	L_{aa8}
0.698085	0.023714	0.0079585	0.000093	0.0000575	-0.000063

جدول ۳-۵: پارامترهای منحنی اندوکتانس L_{ab}

λ	L_{ab0}	L_{ab2}	L_{ab4}	L_{ab6}	L_{ab8}
0.678839	-0.011788	0.0092535	0.000310	-0.000030	-0.000018

بدین ترتیب اندوکتانس‌های L_{ab} ، L_{fa} ، L_{ff} و L_{aa} با تمامی هارمونیک‌های موثر آنها بدست می‌آیند. اما نکته مهمی که در این مدل نادیده گرفته شده است، انحراف قطب‌های رتور^۱ می‌باشد. معمولاً رتور بگونه‌ای ساخته می‌شود که ابتدا و انتهای قطب‌های آن به اندازه یک گام شیار انحراف دارند. این انحراف باعث یکنواختی رلوکتانس مسیر مغناطیسی در حین چرخش رتور و کاهش پدیده دندان به دندان^۲ شدن می‌شود. برای در نظر گرفتن این اثر به مدل سه بعدی اجزای محدود ماشین نیاز است. اما چنانچه در هر موقعیت رتور، اندوکتانس ابتدا و وسط قطب‌های آن بطور جداگانه محاسبه شده و میانگین آن بعنوان اندوکتانس آن موقعیت فرض شود، می‌توان اثر انحراف قطب‌ها را بطور تقریبی در مدل دو بعدی اجزای محدود در نظر گرفت. بدین منظور به ازای هر زاویه رتور اندوکتانس مورد نظر محاسبه شده، سپس با چرخش رتور به اندازه نصف گام شیار (5°)، این اندوکتانس مجدداً تعیین می‌شود. میانگین این دو مقدار بعنوان مقدار اندوکتانس در زاویه مذکور فرض خواهد شد. با در نظر گرفتن این اثر و جزئیات دیگری همچون فاکتور سیم‌پیچی و... به نتایج دقیق‌تری خواهیم رسید. اندوکتانس‌های بدست آمده از این نتایج در ضمیمه آمده است. در این مورد از سری فوریه برای برازش منحنی استفاده شده است.

سایر اندوکتانس‌های فضایی ماشین را نیز می‌توان با جابجایی مناسب زاویه θ بدست آورد که در ضمیمه بیان شده است. بنابراین ماتریس اندوکتانس فضایی ماشین مشخص می‌شود. این ماتریس اساس مدل ماشین در فریم اصلی abc را تشکیل می‌دهد که در فصل بعد به آن می‌پردازیم.

¹ Skewing

² Cogging

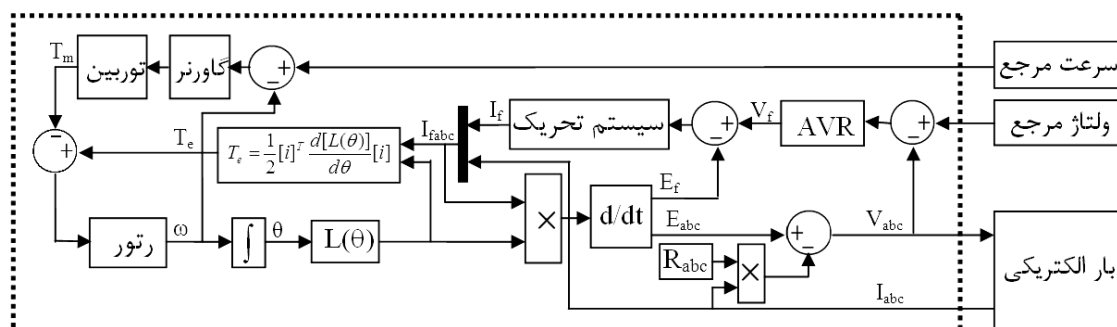
فصل چهارم

شبه‌سازی ماشین سنکرون در فریم اصلی

در این فصل به مدل‌سازی و شبیه‌سازی ماشین سنکرون می‌پردازیم. از آنجائیکه ماتریس اندوکتانس بدست آمده در فصل قبل، در فریم اصلی abc می‌باشد، مدل‌سازی ماشین هم در فریم اصلی انجام شده است. آزمایش‌های مختلف در تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین سنکرون، در مدهای مختلف موتور یا ژنراتوری ماشین انجام می‌شود. از سوی دیگر، تفاوت‌های اساسی در مدهای کاری موتوری و ژنراتوری ماشین سنکرون، لزوم مدل‌سازی جداگانه این حالات را ایجاب می‌کند. علاوه بر این، سیستم الکتریکی و مکانیکی متصل شده به ماشین در مدهای موتوری و ژنراتوری متفاوت است. بنابراین، ماشین سنکرون و سیستم قدرت متصل شده به آن در مدهای موتوری و ژنراتوری و در فریم اصلی، بطور جداگانه با استفاده از ماتریس اندوکتانس‌های فضایی، شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی‌ها در محیط MATLAB/SIMULINK انجام شده است. این نرم‌افزار قابلیت زیادی در شبیه‌سازی سیستم‌های توصیف شده با معادلات حالت دارد. علاوه بر این وجود مدل‌های آماده برای برخی المان‌های سیستم قدرت و امکان برنامه‌نویسی و افزودن مدل‌های جدید، بر کارایی این نرم‌افزار در شبیه‌سازی سیستم‌های قدرت افزوده است. المان‌های سیستم قدرت در این مدل‌ها شامل ماشین سنکرون، کنترل کننده خودکار ولتاژ، سیستم تحریک، گاورنر، توربین، بار مکانیکی و بار الکتریکی می‌باشد که در این فصل به مدل‌سازی و شبیه‌سازی هر یک از این المان‌ها می‌پردازیم.

۴-۱-۱. شبیه‌سازی حالت ژنراتوری ماشین سنکرون

آزمایش‌هایی نظیر اتصال کوتاه سه فاز، قطع بار دینامیکی، افول جریان مستقیم و برخی روش‌های شناسایی سیستم در حالت ژنراتوری انجام می‌شوند. همچنین در این مود کاری، به تجهیزاتی مانند کنترل‌کننده‌های ولتاژ و فرکانس به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار سیستم نیاز است. بلوک دیاگرام کلی سیستم در این حالت بصورت زیر است.



شکل ۴-۱: بلوک دیاگرام سیستم قدرت شامل ژنراتور سنکرون

در این مدل می‌توان با تعیین سرعت و ولتاژ مرجع در مقادیر نامی، ولتاژ نامی را در ترمینال ماشین دریافت کرد. جریان کشیده شده از استاتور توسط بار الکتریکی تعیین می‌شود. اکنون به تشریح چگونگی مدل‌سازی و شبیه‌سازی هر یک از المان‌های این سیستم می‌پردازیم.

۴-۱-۱-۱. ژنراتور سنکرون

ژنراتور سنکرون را می‌توان بعنوان قلب تپنده یک سیستم قدرت تصور کرد که رفتار کل سیستم بستگی به نحوه عملکرد آن دارد. این المان دارای محدوده عملکرد دینامیکی وسیعی بوده و دقت در مدل‌سازی آن تاثیر زیادی در دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی دارد. اما از آنجائیکه همواره دقت و پیچیدگی یک مدل، رابطه عکس با یکدیگر دارند، لزوم مصالحه‌ای بین این دو پارامتر احساس می‌شود. در این پایان‌نامه، ژنراتور مورد نظر با معادلات دینامیکی حالت نرمال برای ژنراتور با مشخصات مطلوب، شبیه‌سازی شده است [15]. این معادلات بصورت زیر می‌باشند:

$$[\lambda] = [L(\theta)][i] \quad (1-4)$$

$$[e] = \frac{d[\lambda]}{dt} \quad (2-4)$$

$$[V_{abc}] = [e_{abc}] - [R][i_{abc}] \quad (3-4)$$

که در آن λ بردار شارهای ارتباطی، i بردار جریان‌ها، V بردار ولتاژهای ترمینال ماشین و e بردار ولتاژهای القایی در سیم‌پیچی‌های سه فاز و تحریک است.

$$\lambda = [\lambda_f, \lambda_a, \lambda_b, \lambda_c]^T \quad (4-4)$$

$$i = [i_f, i_a, i_b, i_c]^T \quad (5-4)$$

$$V = [v_f, v_a, v_b, v_c]^T \quad (6-4)$$

$$e = [e_f, e_a, e_b, e_c]^T \quad (7-4)$$

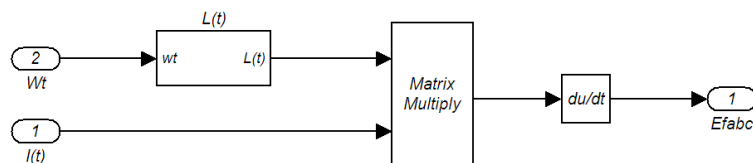
$L(\theta)$ ماتریس اندوکتانس‌های وابسته به موقعیت رتور ماشین است که بصورت زیر فرض می‌شود.

$$L(\theta) = \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} \\ L_{af} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bf} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cf} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (8-4)$$

ماتریس R ، ماتریس قطری مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌های استاتور بصورت زیر است.

$$R = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad (9-4)$$

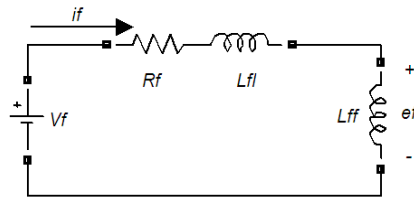
کلیه مقادیر فوق در ضمیمه آمده است. شکل (۲-۴) طرح شبیه‌سازی شده ژنراتور را نشان می‌دهد. البته در این شکل، مقاومت‌های استاتور نشان داده نشده و این مقاومت‌ها در خارج از ژنراتور و به همراه مقاومت خط انتقال و بار الکتریکی لحاظ شده‌اند.



شکل ۲-۴: شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون

۲-۱-۴. کنترل کننده ولتاژ و سیستم تحریک

ماشین شبیه‌سازی شده در این پایان نامه دارای سیستم تحریک‌کننده^۱ از نوع بدون جاروبک^۲ است که توسط AVR^۳ کنترل شده و سیم‌پیچی میدان را تغذیه می‌کند. سیم‌پیچ میدان شامل اندوکتانس‌های مغناطیس‌کنندگی و نشتی است و می‌توان مدار آن را مطابق شکل (۳-۴) فرض کرد.



شکل ۳-۴: مدار سیم‌پیچ تحریک

در این مدار، جریان تحریک از روابط زیر بدست می‌آید.

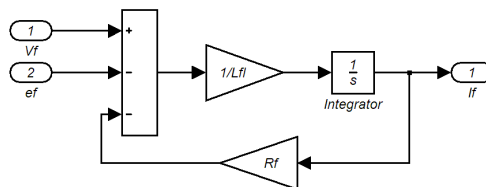
$$V_f = R_f i_f + L_{fl} \frac{di_f}{dt} + e_f \quad (10-4)$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_{fl}} (V_f - R_f i_f - e_f) \quad (11-4)$$

$$i_f = \frac{1}{L_{fl}} \int (V_f - R_f i_f - e_f) \quad (12-4)$$

رابطه (۱۲-۴) جریان سیستم تحریک را نشان می‌دهد و لذا شکل شبیه‌سازی شده سیستم

تحریک در محیط MATLAB بصورت زیر خواهد بود.



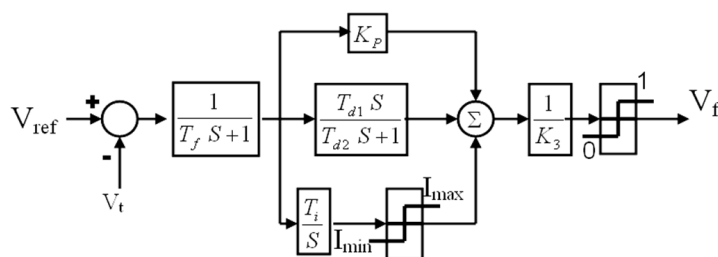
شکل ۴-۴: شبیه‌سازی مدار تحریک

¹ Exciter

² Brushless

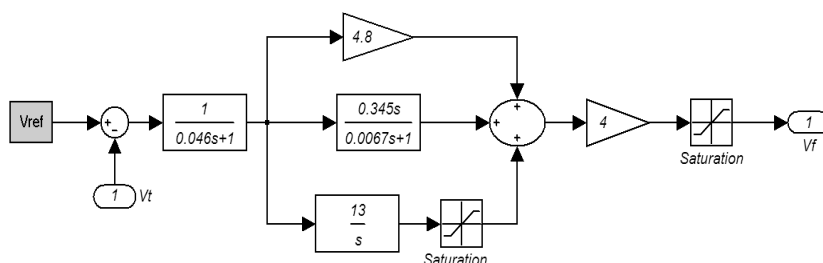
³ Automatic Voltage Regulator

در این شکل، e_f از معادلات ولتاژ ژنراتور (همانگونه که در فصل قبل توضیح داده شد) بدست می‌آید و V_f توسط تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ تعیین می‌شود. این تنظیم‌کننده از ولتاژ ترمینال ژنراتور نمونه‌برداری کرده و با مقایسه آن با مقدار مرجع ولتاژ، سیگنال خطا را تولید می‌کند. اخیراً پیشرفت‌های زیادی در زمینه کنترل‌کننده‌های هوشمند ولتاژ صورت گرفته و استفاده از سیستم‌هایی مانند کنترل فازی رایج شده است [16]. اما در اینجا برای سادگی طرح، از یک تنظیم‌کننده ولتاژ خودکار دیجیتال استفاده شده است [17]. استراتژی بکار گرفته شده در این نوع تنظیم‌کننده ولتاژ، کنترل ضریب کار¹ توسط یک کنترل‌کننده PID آنالوگ است. شکل زیر بلوک دیاگرام این کنترلر را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: بلوک دیاگرام تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ

پارامترهای این بلوک دیاگرام در ضمیمه موجود است و مدل شبیه‌سازی شده آن در MATLAB نیز بصورت زیر می‌باشد.



شکل ۴-۶: شبیه‌سازی تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ

¹ Duty Cycle

۴-۱-۳. گاورنر و توربین

همانگونه که کنترل و ثبات ولتاژ در یک ژنراتور نیازمند AVR می‌باشد، کنترل توان اکتیو و ثبات فرکانس نیز نیازمند تنظیم‌کننده و سیستم کنترل تولید^۱ است. بطور کلی ثابت ماندن فرکانس در یک سیستم قدرت، مستلزم برقراری تعادل بین توان مکانیکی و الکتریکی در ژنراتور است. اما از آنجائیکه توان الکتریکی شبکه دائما در حال تغییر است، ثابت فرکانس نیازمند کنترل دائمی توان مکانیکی می‌باشد. این وظیفه بر عهده گاورنر است. تاکنون مدل‌های مختلفی جهت انواع گاورنرها و تجهیزات جانبی آن ارائه شده که غالبا پیچیده و یا غیرخطی می‌باشند [18]. اما از آنجائیکه در بیشتر آزمایش‌های مربوط به تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین سنکرون، عملکرد گاورنر اهمیت چندانی ندارد، می‌توان برای سادگی طرح از یک مدل خطی درجه یک برای گاورنر استفاده کرد.

انواع توربین‌های رایج در نیروگاه‌های آبی، بخاری و گازی نیز دارای مدل‌های بسیار دقیق بوده [19] که غالبا در موارد خاصی برای اهداف کنترلی هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند [20]. اما در سیستم شبیه‌سازی شده از یک مدل خطی درجه اول جهت سادگی سیستم استفاده شده است.

۴-۱-۴. رتور

در واقع رتور ماشین سنکرون محل تقابل گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی است و بدلیل آنکه معمولا تعادل دقیقی بین این گشتاورها وجود ندارد، نوسانات کوچک و بزرگ در سرعت رتور دور از انتظار نیست. ارتباط بین این نوسانات و گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی را می‌توان در رابطه زیر خلاصه کرد.

$$T_m - T_e = 2H \frac{d\omega}{dt} + D\omega \quad (۴-۱۳)$$

در این رابطه T_m گشتاور مکانیکی است که توسط توربین تولید می‌شود و T_e گشتاور الکتریکی تولید شده در اثر جریان‌های استاتور است که به رتور ماشین اعمال می‌شود. H ثابت لختی بوده و

^۱ Automatic Generation Control (AGC)

بصورت $J=2H$ با ثابت اینرسی رتور مرتبط است. ω سرعت زاویه‌ای رتور و D ضریب اصطکاک یا اصطلاحاً ثابت میرایی بار است. این ضریب بصورت تغییر بار به ازای یک درصد تغییر در فرکانس بیان می‌شود. توسط رابطه (۴-۱۳) می‌توان دینامیک رتور را بصورت زیر توصیف نمود.

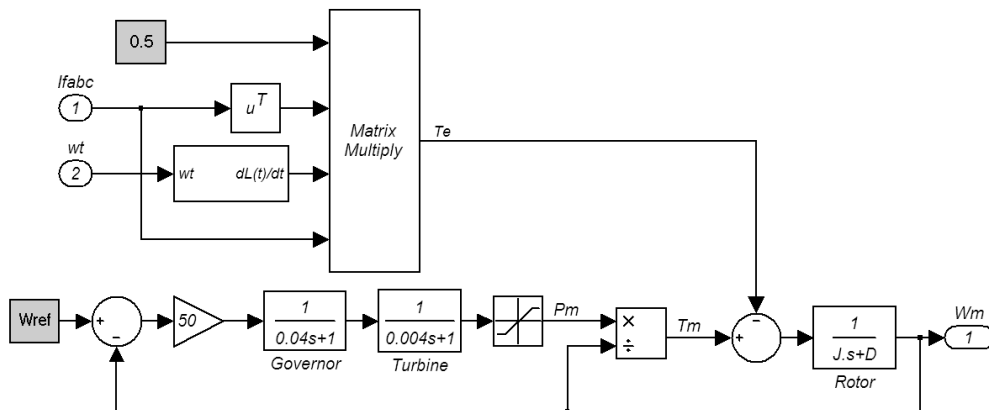
$$T_m - T_e = \omega(Js + D) \quad (۴-۱۴)$$

$$\omega = \frac{T_m - T_e}{Js + D} \quad (۴-۱۵)$$

که در آن T_e از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$T_e = \frac{1}{2} [i]^\top \frac{d(\mathbf{L}(\theta))}{d\theta} [i] \quad (۴-۱۶)$$

شکل زیر شمای مدل شبیه‌سازی شده گاورنر، توربین و رتور را نشان می‌دهد.



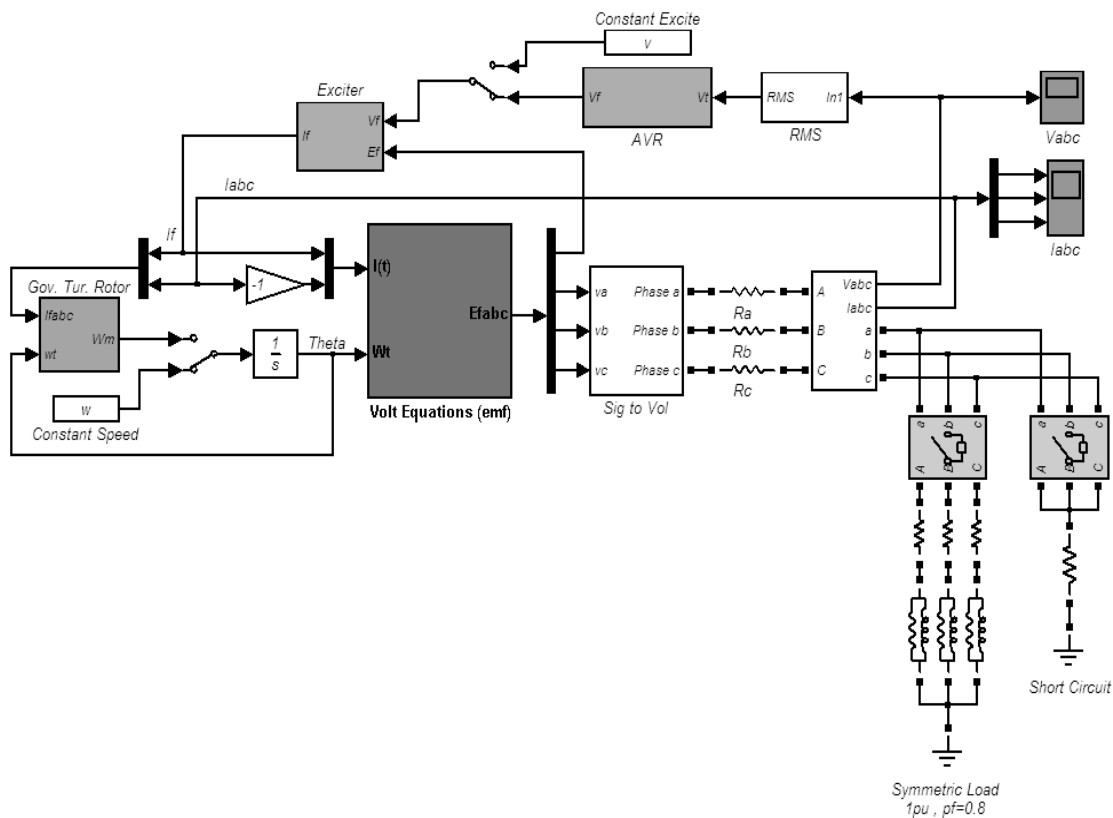
شکل ۴-۷: شبیه‌سازی گاورنر، توربین و رتور

۴-۱-۵. بار الکتریکی

بار الکتریکی یکی از المان‌های سیستم قدرت است که تغییرات آن می‌تواند منجر به بروز برخی رفتارهای دینامیکی ماشین شود. لذا در بعضی آزمایش‌ها مانند قطع بار دینامیکی ماشین، از تغییرات بار الکتریکی برای تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین استفاده می‌شود. شبیه‌سازی انواع مختلف

بارهای مقاومتی، سلفی و خازنی به آسانی با اتصال سری یا موازی مقاومت، سلف و خازن امکان‌پذیر است. تنها مشکل موجود در اینست که ولتاژهای استاتور از روابط ریاضی محاسبه شده و از نوع سیگنال می‌باشند اما مقاومت‌ها، سلف‌ها و خازن‌ها المان‌های الکتریکی بوده و امکان اتصال آنها به مدل ژنراتور وجود ندارد. برای رفع این مشکل، سیگنال‌های خروجی ژنراتور توسط منابع ولتاژ وابسته، به ولتاژهای مداری سیمولینک تبدیل می‌شوند.

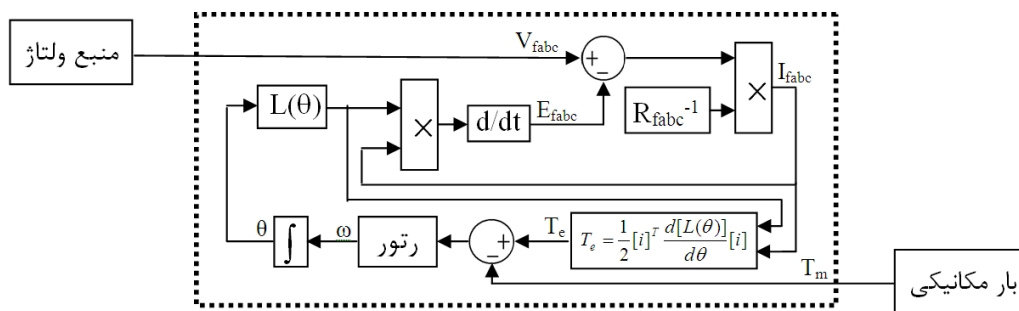
بدین ترتیب تمامی اجزای شکل (۴-۱) بدقت شبیه‌سازی شده و یک سیستم قدرت کامل برای مطالعه رفتار دینامیکی ماشین سنکرون در مود ژنراتوری فراهم می‌شود. شکل (۴-۸) شمای کل این سیستم را در محیط سیمولینک نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸: طرح کلی شبیه‌سازی سیستم قدرت شامل ژنراتور سنکرون

۲-۴. حالت موتوری ماشین سنکرون

بسیاری از آزمایش‌های ماشین برای تعیین پارامترهای دینامیکی آن در حالت موتوری انجام می‌شود. آزمایش‌هایی نظیر لغزش، موتور رلوکتانسی و پاسخ فرکانسی حالت ایستا نمونه‌هایی از این آزمایش‌ها است. با وجود آنکه معادلات ولتاژ ماشین در حالات موتوری و ژنراتوری یکسان است، اما تفاوت‌هایی در شبیه‌سازی این معادلات وجود دارند. علاوه بر این در حالت موتوری نیازی به شبیه‌سازی تجهیزاتی مانند توربین، گاورنر، تنظیم‌کننده ولتاژ و... نیست. لذا شبیه‌سازی جداگانه‌ای برای بررسی رفتار ماشین در حالت موتوری لازم است. بطور کلی بلوک دیاگرام ماشین سنکرون را در این حالت می‌توان بصورت نشان داده شده در شکل (۴-۹) تصور کرد.



شکل ۴-۹: بلوک دیاگرام سیستم قدرت شامل موتور سنکرون

در این مدل با تعیین ولتاژ سیم‌پیچ‌های استاتور و رتور و همچنین میزان گشتاور مکانیکی بار، می‌توان سایر کمیت‌های ماشین مانند جریان سیم‌پیچ‌ها، سرعت رتور و حتی زاویه بار را بدست آورد. این سیستم شامل مدل ماشین سنکرون، مدل رتور، بار مکانیکی و منبع تغذیه است که در ادامه به تشریح چگونگی مدل‌سازی و شبیه‌سازی هر یک می‌پردازیم.

۱-۲-۴. موتور سنکرون

معادلات ولتاژهای داخلی ماشین سنکرون در حالات موتوری و ژنراتوری یکسان است. لذا روابط ولتاژ در این حالت بصورت روابط (۴-۱) و (۴-۲) می‌باشند. اما ولتاژهای ترمینال ماشین، اندکی با حالت ژنراتوری متفاوت است. در این حالت، جریان سیم‌پیچ‌ها از رابطه زیر بدست می‌آیند.

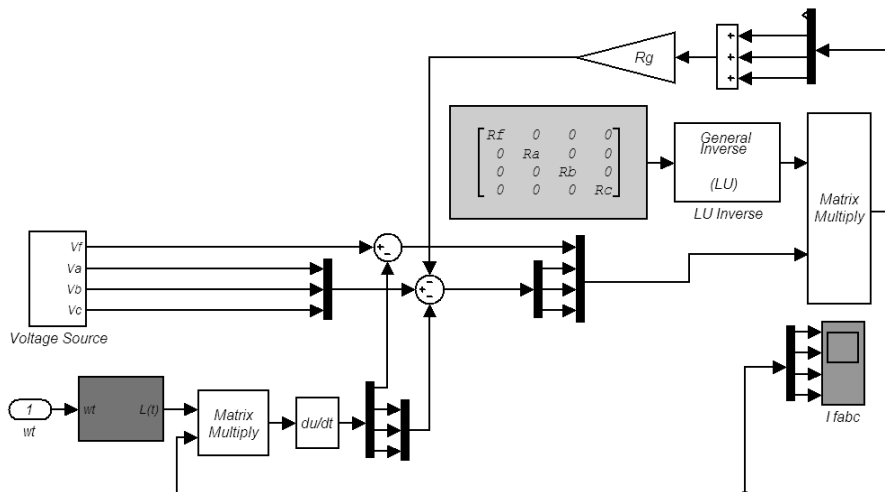
$$[i] = [R]^{-1}([V] - [e]) \quad (17-4)$$

که در آن i ، V و e مطابق روابط (4-5) تا (4-7) بوده و R بصورت زیر است.

$$R = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad (18-4)$$

با فرض آنکه سیم‌پیچ‌های استاتور دارای اتصال ستاره بوده و نقطه صفر ستاره، با مقاومت بسیار

بزرگ R_g زمین شده باشد، مدل شبیه‌سازی شده موتور سنکرون مطابق شکل (4-10) می‌باشد.



شکل 4-10: شبیه‌سازی موتور سنکرون

۴-۲-۴. رتور و بار مکانیکی

معادلات دینامیک رتور در بخش شبیه‌سازی ژنراتور بیان شد. در حالت موتوری این روابط اندکی

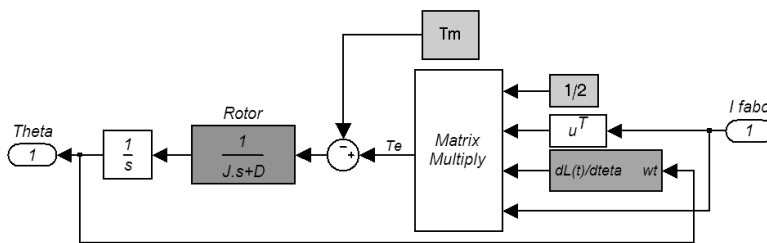
تفاوت می‌کنند. معادله دینامیک رتور در این حالت بصورت زیر است.

$$T_e - T_m = \omega(Js + D) \quad (19-4)$$

و لذا سرعت رتور از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\omega = \frac{T_e - T_m}{Js + D} \quad (20-4)$$

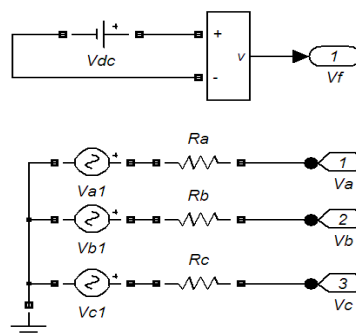
در این رابطه گشتاور الکتریکی مشابه بخش قبل محاسبه شده اما گشتاور مکانیکی به مشخصه بار بستگی دارد. بار مکانیکی در این سیستم بصورت یک بار گشتاور ثابت فرض شده و لذا با یک عدد ثابت که نشان‌دهنده میزان گشتاور مکانیکی می‌باشد، مدل شده است. شکل (۴-۱۱) مدل شبیه‌سازی شده رتور و بار مکانیکی را در سیمولینک نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۱: شبیه‌سازی رتور و بار مکانیکی

۳-۲-۴. منبع تغذیه

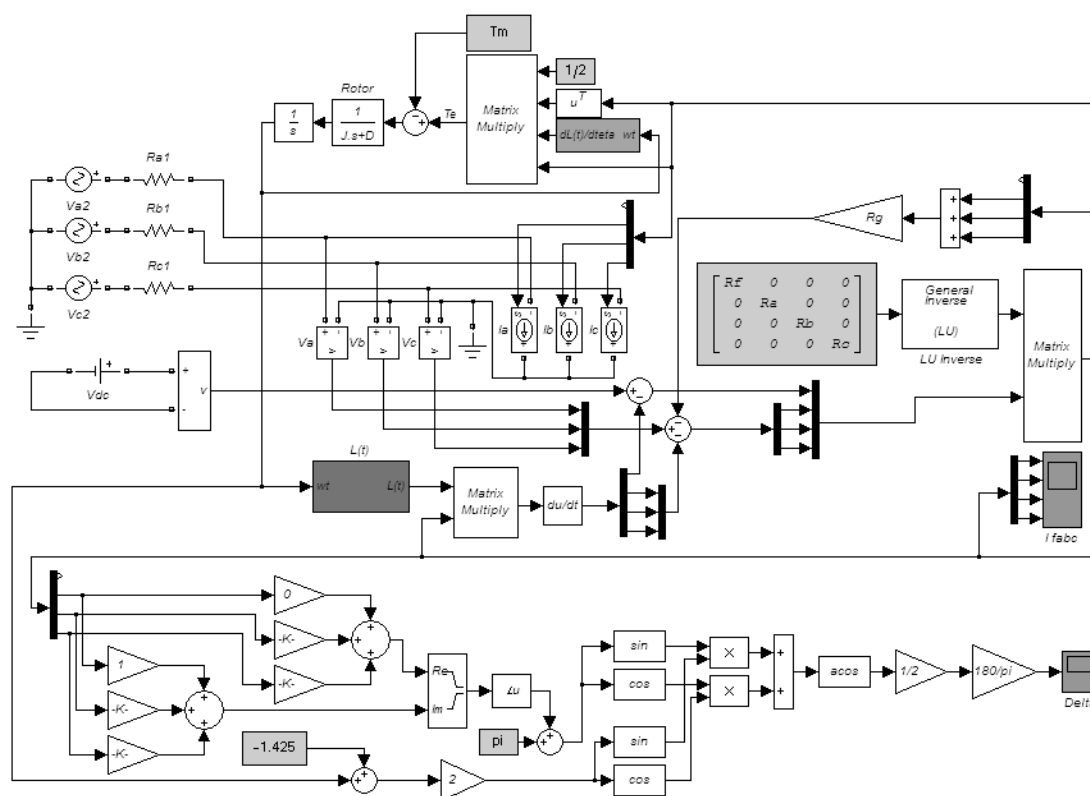
منبع تغذیه استاتور از سه منبع متناوب تکفاز مجزا با امپدانس‌های داخلی ناچیز، تشکیل شده است. اندازه این ولتاژها یکسان بوده و ۱۲۰ درجه با یکدیگر اختلاف فاز دارند. از یک منبع تغذیه DC هم برای تغذیه رتور استفاده شده است. شکل زیر مدل منبع تغذیه را در سیمولینک نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲: شبیه‌سازی منبع تغذیه موتور سنکرون

از آنجائیکه منبع تغذیه سه فاز استاتور از نوع اجزای مداری سیمولینک است، اما ورودی‌ها و خروجی‌های موتور سنکرون از جنس سیگنال می‌باشند، ابتدا ولتاژهای این منبع به سیگنال تبدیل

شده و سپس به مدل ماشین اعمال می‌شوند. جریان‌های محاسبه شده نیز توسط منابع وابسته به جریان مداری تبدیل شده و به منبع تغذیه اعمال می‌شوند. نهایتاً شماتیک کل سیستم موتور سنکرون در محیط MATLAB بصورت زیر خواهد بود.



شکل ۴-۱۳: طرح کلی شبیه‌سازی سیستم قدرت شامل موتور سنکرون

الگوریتم محاسبه زاویه δ (زاویه بین میدان دوار استاتور و محور طولی رتور) ماشین را می‌توان بطور خلاصه اینگونه بیان کرد. زاویه رتور بسادگی با انتگرالگیری از سرعت آن بصورت یک تابع شیب بدست می‌آید. اما برای محاسبه زاویه میدان دوار استاتور، ابتدا مولفه‌های حقیقی و موهومی میدان هر یک از فازها بدست آمده و میدان برآیند از مجموع آنها حاصل می‌شود. زاویه این میدان بصورت یک موج دندانه‌اره‌ای بین $(0, 2\pi)$ بوده و به سادگی نمی‌توان تفاضل آن از زاویه رتور را بدست آورد. برای رفع این مشکل از اتحاد مثلثاتی زیر استفاده می‌شود.

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta \quad (۲۱-۴)$$

بنابراین زاویه δ از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\delta = \alpha - \beta = \cos^{-1} [\cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta] \quad (۲۲-۴)$$

از آنجائیکه ماشین شبیه‌سازی شده چهار قطبی بوده اما میدان استاتور برای یک ماشین دو قطبی بدست آمد، زاویه رتور دو برابر شده و در نهایت با ضریب $1/2$ در زاویه δ اصلاح می‌شود. ثوابت و ضرایب دیگری نیز در مدل شبیه‌سازی شده وجود دارد که هر یک جهت برخی اصلاحات، لحاظ شده است.

فصل پنجم

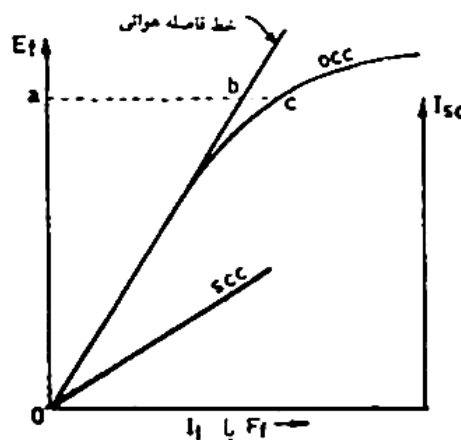
تعیین راکتانس‌های سنکرون ماشین

همانگونه که در فصل دوم بیان شد، پارامترهای دینامیکی ماشین سنکرون شامل راکتانس‌های سنکرون، گذرا و زیرگذرای محورهای طولی و عرضی و نیز ثوابت زمانی تندگذر و کندگذر مدار باز و اتصال کوتاه محورهای طولی و عرضی می‌باشند. از این میان، راکتانس‌های سنکرون محورهای طولی و عرضی (X_d, X_q) دارای اهمیت بیشتری در تحلیل عملکرد ماشین بویژه در حالت دائمی می‌باشند. آزمایش‌های ویژه‌ای جهت تعیین این راکتانس‌ها پیشنهاد شده که بسیار آسان‌تر و کم هزینه‌تر از آزمایش‌های تعیین کل پارامترهای دینامیکی ماشین است. در مواردی که تحلیل حالات دائمی ماشین مد نظر است، این آزمایش‌ها جایگاه خاصی در تعیین سریع و کم‌هزینه راکتانس‌های سنکرون دارند. علاوه بر این با توجه به اهمیت راکتانس‌های سنکرون نسبت به دیگر پارامترهای ماشین، انجام این آزمایش‌ها جهت افزایش دقت نتایج توصیه می‌شود. راکتانس محور طولی را می‌توان از مشخصه‌های مدار باز (OCC) و اتصال کوتاه (SCC) ماشین سنکرون بدست آورد، اما در مورد محور عرضی آزمایش‌هایی نظیر لغزش، موتور رلوکتانسی و جریان پس‌فاز حداکثر، بکار گرفته می‌شود. در این فصل به شبیه‌سازی این آزمایش‌ها پرداخته و راکتانس‌های سنکرون ماشین مورد مطالعه، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی تعیین می‌شوند. در برخی آزمایش‌ها، اصلاحات و تغییراتی صورت گرفته که در اکثر مراجع نادیده گرفته شده‌اند.

۵-۱. مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه ماشین سنکرون

شرح مبسوطی از این مشخصه‌ها در مرجع [21] آمده است. برای بدست آوردن مشخصه مدار باز، ژنراتور در سرعت سنکرون به چرخش درآمده و در حالت بی‌باری، ولتاژ مدار باز استاتور به ازای مقادیر مختلف جریان تحریک، اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین OCC نمودار بین ولتاژ تولیدی یا emf بر حسب جریان میدان یا mmf را نشان می‌دهد. بدلیل اشباع مغناطیسی آهن در جریان‌های زیاد، این نمودار غیرخطی خواهد بود. البته آنچه در تعیین X_d اهمیت دارد، خط مستقیمی است که بر قسمت خطی منحنی منطبق بوده و خط فاصله هوایی نامیده می‌شود.

مشخصه اتصال کوتاه ماشین نیز بطور مشابه با اندازه‌گیری جریان استاتور در حالتی که ترمینال ماشین اتصال کوتاه است، بدست می‌آید. شکل (۵-۱) نمونه‌ای از این مشخصات را برای یک ماشین سنکرون نشان می‌دهد [21].



شکل ۵-۱: مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه در یک ماشین سنکرون

با صرف‌نظر از مقاومت اهمی ناچیز استاتور، راکتانس محور طولی ماشین از رابطه زیر بدست می‌آید

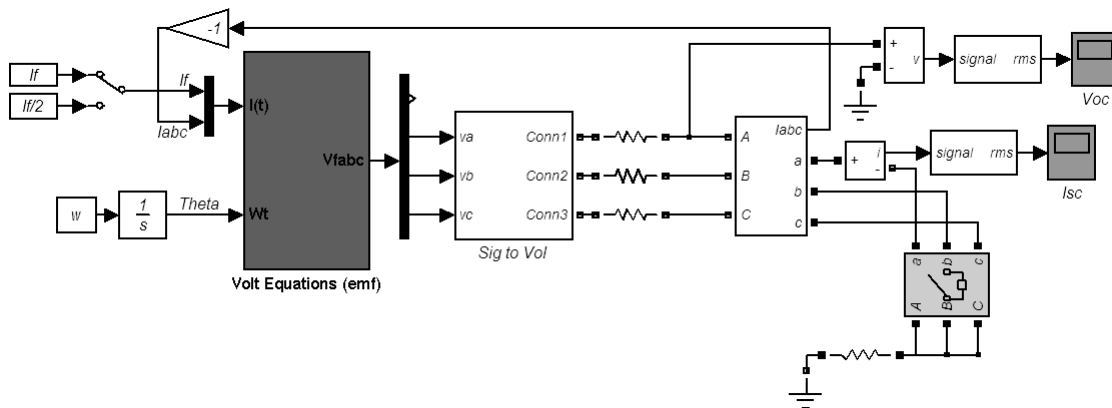
[21].

$$X_d = \frac{\text{ولتاژ مدار باز استاتور در یک جریان تحریک معین}}{\text{جریان اتصال کوتاه استاتور در همان جریان تحریک}} \quad (۵-۱)$$

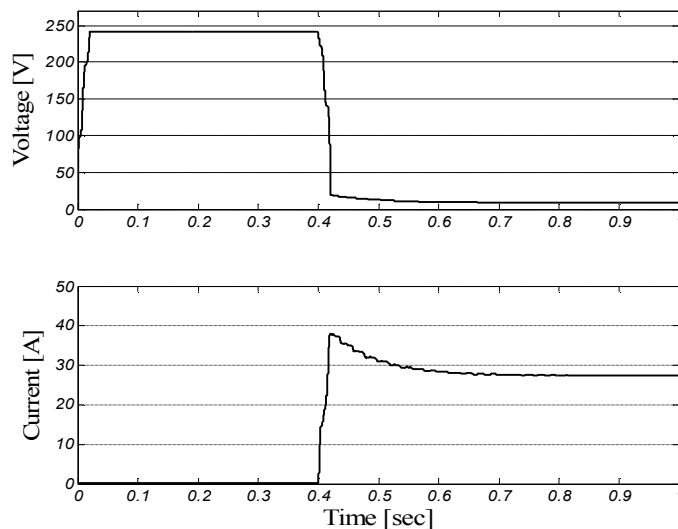
برای تعیین X_d در ماشین شبیه‌سازی شده، آزمایشی مطابق شکل (۲-۵) ترتیب داده می‌شود. در این آزمایش ابتدا استاتور ژنراتور مدار باز بوده و پس از 0.4 ثانیه اتصال کوتاه می‌شود. جریان مدار تحریک ثابت بوده و برابر مقدار نامی آن می‌باشد. شکل (۳-۵) مقدار موثر ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در ترمینال ماشین را نشان می‌دهد. براساس این شکل و رابطه (۱-۵)، راکتانس محور طولی ماشین بصورت زیر بدست می‌آید.

$$X_d = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} = \frac{241}{27.1} = 8.89 \Omega \quad (۲-۵)$$

$$X_d^{pu} = \frac{X_d}{Z_{base}} = \frac{8.89}{5.4857} = 1.62 pu \quad (۳-۵)$$



شکل ۲-۵: شبیه‌سازی ژنراتور برای تعیین مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه



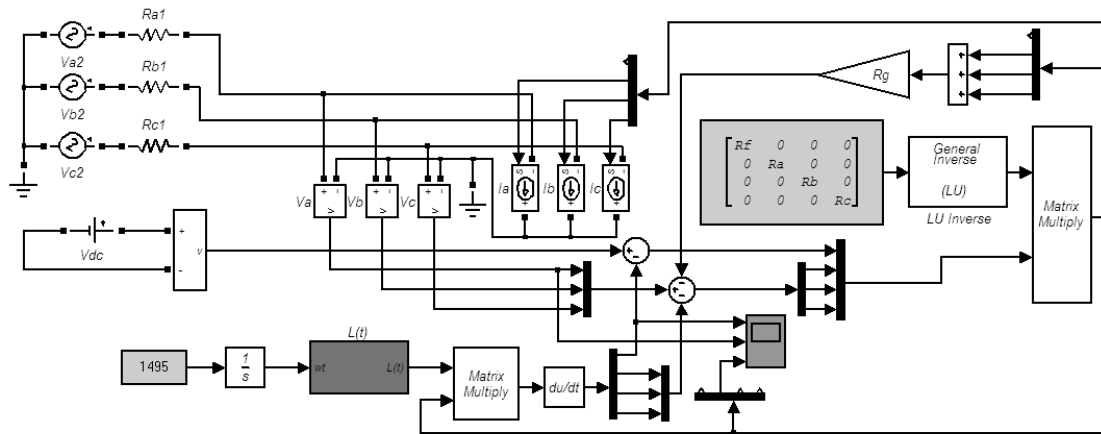
شکل ۳-۵: مقادیر موثر ولتاژ و جریان در ترمینال ژنراتور

۵-۲. آزمایش لغزش

روش آزمایش لغزش از جمله روش‌های متداول در تعیین اندوکتانس‌های طولی و عرضی ماشین سنکرون است که در کتاب‌ها و مقالات فراوان مورد بررسی قرار گرفته است [21-22]. در این روش استاتور ماشین سنکرون توسط منبع ولتاژ سه فاز متعادل با فرکانس نامی تغذیه می‌شود. سیم‌پیچ تحریک روی رتور اتصال باز بوده و رتور ماشین توسط یک چرخاننده با سرعتی کمتر از سرعت سنکرون و هم جهت با چرخش میدان دوار استاتور، چرخانده می‌شود. اختلاف سرعت بین رتور و میدان دوار استاتور که سرعت لغزش نامیده می‌شود، باعث خواهد شد تا رتور در موقعیت‌های d و q جابجا شود. همچنین این اختلاف سرعت باعث بوجود آمدن ولتاژ متناوب کوچکی در دو سر سیم‌پیچ میدان می‌شود که فرکانس مولفه اصلی آن برابر سرعت لغزش است. با توجه به این ولتاژ می‌توان موقعیت رتور را مشخص نمود. هنگامیکه ولتاژ القایی در سیم‌پیچ تحریک صفر باشد، تغییرات شار گذرنده از این سیم‌پیچ صفر بوده و میزان این شار حداکثر است. بنابراین رتور در موقعیت d قرار دارد. با استدلال مشابه، هنگامیکه ولتاژ القایی در سیم‌پیچ تحریک ماکزیمم باشد، رتور در موقعیت q قرار دارد. راکتانس محور طولی ماشین از تقسیم دامنه ولتاژ بر جریان یک فاز در موقعیت d و راکتانس محور عرضی به روش مشابه در موقعیت q بدست می‌آید. اما عوامل متعددی در این فرآیند دخالت کرده و خطای آزمایش را افزایش می‌دهند. تقریباً تمامی این خطاها با شبیه‌سازی دقیق آزمایش لغزش و ملاحظات لازم در تحلیل نتایج مرتفع می‌شوند.

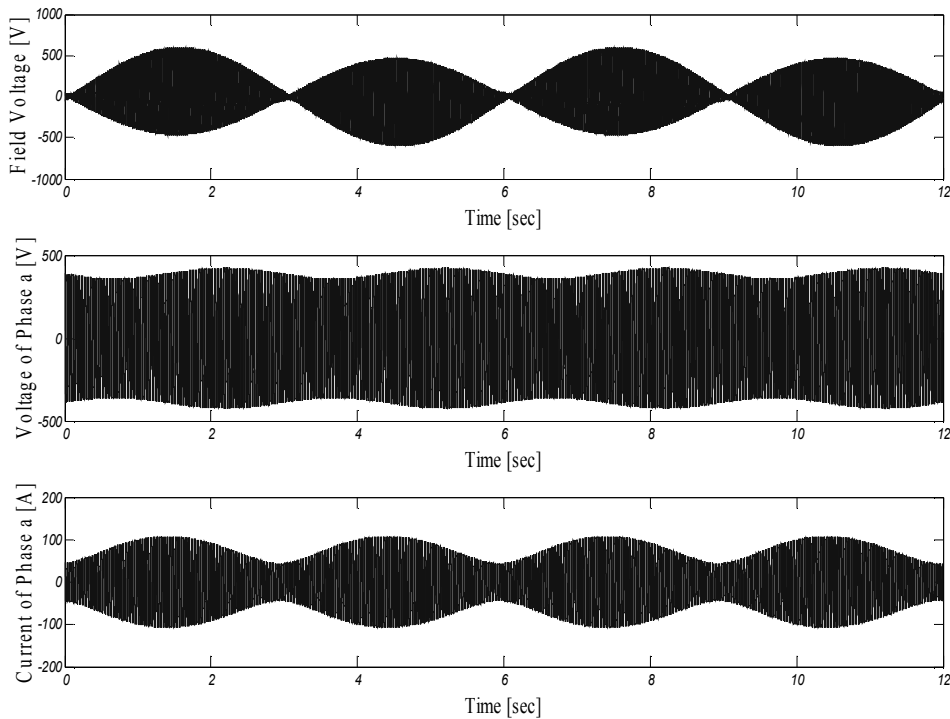
۵-۲-۱. شبیه‌سازی آزمایش لغزش

ماشین شبیه‌سازی شده به منبع ولتاژ سه فاز متعادل با دامنه 400 ولت، فرکانس 50 هرتز و مقاومت داخلی 1 اهم متصل می‌شود. رتور با سرعت 1495^{rpm} چرخانده می‌شود در حالیکه میدان دوار استاتور با سرعت 1500^{rpm} در جهت چرخش رتور، در حال چرخش است. شکل (۴-۵) شماتیک سیستم شبیه‌سازی شده برای آزمایش لغزش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: شبیه‌سازی آزمایش لغزش

از آنجائیکه باز گذاشتن مدار تحریک منجر به خطا در اجرای برنامه می‌شود، مقاومت سیم‌پیچ تحریک بسیار زیاد فرض شده تا بصورت اتصال باز مدل شود. شکل (۵-۵) ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ تحریک به همراه ولتاژ و جریان فاز a را در طی یک دور کامل لغزش نشان می‌دهد.



شکل ۵-۵: کمیت‌های بدست آمده از شبیه‌سازی آزمایش لغزش

در این شکل دامنه ولتاژ القائی در سیم‌پیچ تحریک نسبتاً بزرگ بوده و دارای هارمونیک‌هایی با فرکانس بسیار بالا می‌باشد که این امر برخلاف تصور رایج از این ولتاژ است. در واقع آنچه باعث این اختلاف شده است، در نظر گرفتن هارمونیک‌های اندوکتانس‌های فضایی ماشین و شبیه‌سازی هارمونیک‌های شار فاصله هوایی است. بنابراین نوسانات فرکانس بالای میدان استاتور در روی سیم‌پیچ تحریک که ناشی از هارمونیک‌های شار فاصله هوایی است، لحاظ شده و منجر به نوسانات فرکانس بالا در ولتاژ القائی سیم‌پیچ تحریک می‌شود. با بررسی و تحلیل دقیق‌تر ولتاژها و جریان‌های ثبت شده، و بررسی خطاهای رایج در این آزمایش، اندوکتانس‌های طولی و عرضی ماشین با خطای کمتری بدست خواهند آمد.

۲-۲-۵. خطاهای رایج در آزمایش لغزش

اختلاف سرعت بین میدان دوار استاتور و رتور، باعث ایجاد جریان‌های القائی در سیم‌پیچ‌های میراکننده ماشین شده و خطای قابل توجهی را در نتایج بوجود می‌آورد. برای کاهش این خطا بایستی سرعت لغزش تا حد امکان کم باشد. اما شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد حتی در لغزش‌های بسیار کم، هارمونیک‌های فضایی اندوکتانس‌های ماشین باعث ایجاد نوسانات فرکانس بالا در شار فاصله هوایی شده و در سیم‌پیچ‌های میراکننده، جریان القائی ایجاد می‌کند. دامنه این جریان با زاویه رتور تغییر کرده و میزان آن برای ایجاد خطا در نتایج آزمایش لغزش قابل توجه است. اما در شبیه‌سازی انجام شده، ماشین بدون سیم‌پیچ میراکننده فرض شده و خطای مذکور بکلی وجود ندارد.

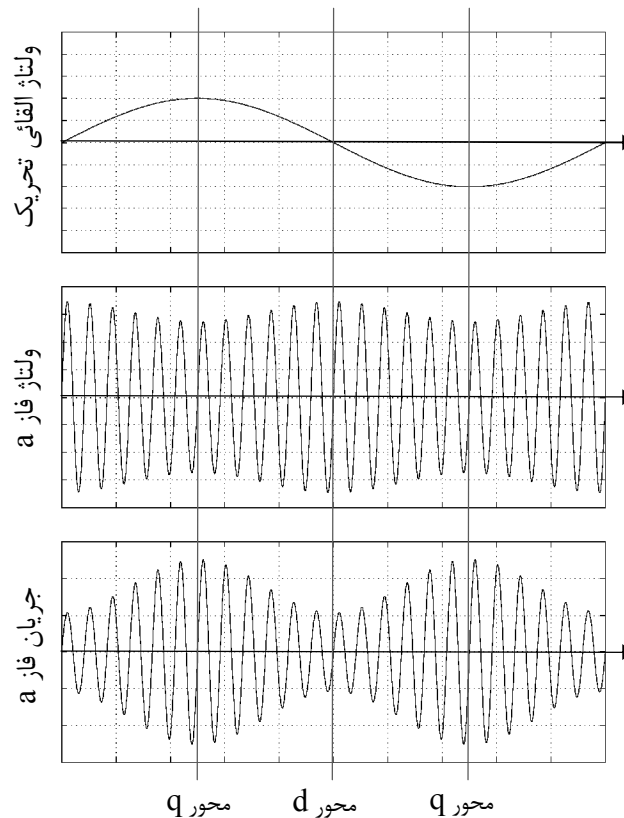
خطای بعدی مربوط به گشتاور رلوکتانسی ماشین ناشی از برجستگی قطب‌ها است. این گشتاور تمایل دارد که رتور را با میدان دوار استاتور سنکرون کند. بنابراین چرخاندن رتور ماشین با یک سرعت ثابت بسیار دشوار بوده و ایجاد نوسان در سرعت لغزش اجتناب‌ناپذیر است. این مشکل در سرعت‌های لغزش پایین محسوس‌تر است. در آزمایش واقعی همانگونه که در قسمت قبل بیان شد، سرعت لغزش تا حد امکان کم انتخاب می‌شود و بنابراین خطای ناشی از گشتاور رلوکتانسی ماشین

تشدید خواهد شد. البته در مدل شبیه‌سازی شده، سرعت رتور کاملاً ثابت فرض شده و لذا مشکل ناشی از گشتاور رلوکتانسی نیز وجود نخواهد داشت.

همواره استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری، همراه با خطاهای طبیعی آنهاست. اما خطای اساسی‌تری که در اندازه‌گیری‌های آزمایش لغزش وجود دارد مربوط به اختلاف فاز در نوسانات ولتاژ و جریان فازهای استاتور است. در بسیاری از مراجع، ولتاژ و جریان یک فاز استاتور بصورت نشان داده شده در شکل (۶-۵) فرض می‌شود [21-22] که با نتایج شبیه‌سازی در شکل (۵-۵) اندکی متفاوت است. محل موقعیت‌های d و q با توجه به ولتاژ القایی در سیم‌پیچ تحریک تعیین شده و بنابراین اندوکتانس‌های طولی و عرضی ماشین، از روابط (۴-۵) و (۵-۵) محاسبه می‌شوند.

$$X_d = \frac{V_a(\max)}{I_a(\min)} \quad (۴-۵)$$

$$X_q = \frac{V_a(\min)}{I_a(\max)} \quad (۵-۵)$$



شکل ۶-۵: تصور معمول از ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ تحریک و ولتاژ و جریان فاز a در اغلب مراجع

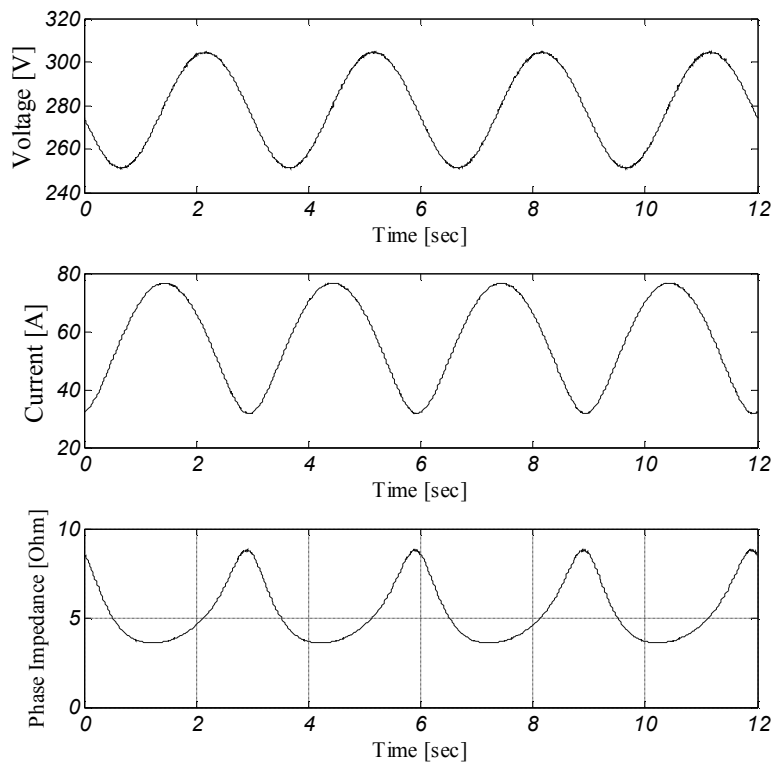
مقادیر حداقل و حداکثر ولتاژها و جریان‌ها نیز با استفاده از ولت‌متر و آمپر متر اندازه‌گیری شده و یا در صورت استفاده از نوسان‌نگار، موج‌های ولتاژ و جریان بصورت جداگانه نوسان‌نگاری شده و اختلاف شکل‌های (۵-۵) و (۶-۵) به چشم نمی‌آید. این اختلاف ناشی از نادیده گرفتن نکته‌ای مهم در آزمایش لغزش است. هنگامیکه یک ماشین سنکرون تحت آزمایش لغزش قرار می‌گیرد، راکتانس آن بین مقادیر X_d و X_q متغیر خواهد بود در حالیکه مقاومت اهمی استاتور ثابت است. بنابراین می‌توان این ماشین را بصورت باری با زاویه فاز متغیر تصور کرد. لذا اختلاف فاز بین ولتاژ منبع تغذیه و جریان کشیده شده از آن متغیر خواهد بود. ولتاژ ترمینال ماشین برابر تفاضل ولتاژ منبع تغذیه و افت ولتاژ روی مقاومت داخلی منبع و امپدانس خط انتقال است. از آنجائیکه ولتاژ منبع تغذیه و افت ولتاژ روی خط انتقال و امپدانس داخلی آن، دارای اختلاف فاز متغیر می‌باشند، لذا تفاضل آنها در روی ترمینال ماشین بصورت نشان داده شده در شکل (۵-۵) ظاهر خواهد شد. همانگونه که این شکل نشان می‌دهد، اختلاف فاز نوسانات دامنه ولتاژ و جریان هر فاز استاتور، برخلاف تصور رایج یعنی شکل (۶-۵) است. بنابراین استفاده از روابط (۴-۵) و (۵-۵) در تعیین راکتانس‌های طولی و عرضی ماشین، دارای ایراد اساسی است. زیرا بعنوان نمونه هنگامیکه رتور در راستای محور d قرار داشته و جریان یک فاز در مقدار می‌نیم خود است، ولتاژ همان فاز هنوز به مقدار ماکزیمم خود نرسیده و استفاده از مقدار ماکزیمم اندازه‌گیری شده در رابطه (۴-۵) باعث ایجاد خطای محسوسی در راکتانس تعیین شده خواهد شد. در شبیه‌سازی انجام شده برای اجتناب از خطای مذکور، مقادیر rms هر یک از موج‌های ولتاژ و جریان استاتور بدست آمده و از حاصل تقسیم آنها، مقادیر حداکثر و حداقل امپدانس استاتور تعیین می‌شود که بترتیب بیانگر X_d و X_q ماشین خواهند بود.

خطای دیگری نیز در آزمایش واقعی لغزش وجود دارد که با شبیه‌سازی مرتفع شده است. این خطا مربوط به تاثیر مقاومت اهمی استاتور و مقاومت اتصال زمین نقطه صفر ستاره ماشین در امپدانس تعیین شده از ترمینال استاتور است. البته می‌توان با اندازه‌گیری مقدار مقاومت اهمی استاتور، تاثیر آن در راکتانس‌های ماشین را تصحیح نمود [22] اما این روش در مورد مقاومت اتصال زمین نقطه صفر

ستاره به سادگی امکان‌پذیر نبوده و منجر به پیچیدگی بیشتر در فرآیند آزمایش و تحلیل نتایج است. اما در مدل شبیه‌سازی شده، راکتانس‌های ماشین از تقسیم ولتاژ داخلی یک فاز بر جریان آن بدست آمده و خطای مذکور وجود ندارد.

۵-۲-۳. تعیین راکتانس‌های سنکرون از آزمایش لغزش

همانگونه که بیان شد با شبیه‌سازی دقیق ماشین سنکرون و آزمایش لغزش و همچنین در نظر گرفتن ملاحظات لازم در فرآیند آزمایش و تحلیل نتایج، ولتاژ و جریان یک فاز استاتور بصورت نشان داده شده در شکل (۵-۵) بدست آمد. امپدانس عملیاتی ماشین طی آزمایش لغزش از تقسیم مقادیر rms ولتاژ و جریان بدست آمده، حاصل می‌شود. شکل (۷-۵) مقادیر rms مذکور و حاصل تقسیم آنها را نشان می‌دهد. بدیهی است که راکتانس‌های محور طولی و عرضی ماشین، بترتیب از مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم امپدانس عملیاتی بدست آمده، تعیین می‌شوند.



شکل ۷-۵: مقادیر rms ولتاژ و جریان فاز a و امپدانس تعیین شده از حاصل تقسیم آنها

با توجه به شکل (۷-۵)، راکتانس‌های سنکرون طولی و عرضی ماشین بصورت زیر تعیین می‌شوند که انطباق خوبی با نتایج آزمایش قبلی دارند.

$$X_d = 8.79 \Omega = 1.63 pu \quad (۶-۵)$$

$$X_q = 3.57 \Omega = 0.66 pu \quad (۷-۵)$$

۵-۳. آزمایش موتور رلوکتانسی

در این آزمایش سیم‌پیچ تحریک باز بوده و موتور سنکرون بصورت رلوکتانسی راه‌اندازی می‌شود. بار مکانیکی موتور از صفر شروع شده و بتدریج افزایش می‌یابد. این افزایش بار تا جایی ادامه دارد که موتور از سنکرونیزم خارج شود. چنانچه افزایش بار تدریجی باشد، هنگامیکه موتور در آستانه خروج از سنکرونیزم قرار می‌گیرد، زاویه بین رتور و میدان دوار استاتور برابر 45 درجه مغناطیسی است ($\delta=45^\circ$). در این شرایط با اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال، جریان فاز و توان اکتیو، نسبت راکتانس‌های طولی و عرضی را می‌توان بصورت زیر بدست آورد [21]. توان اکتیو ماشین با رابطه (۸-۵) بدست می‌آید و با تعریف ثابت K، بصورت (۹-۵) تبدیل می‌شود.

$$P = \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\delta) \quad (۸-۵)$$

$$K = \frac{X_d}{X_q} \Rightarrow P = \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{K-1}{X_d} \right) \sin(2\delta) \quad (۹-۵)$$

جریان فاز a از جمع برداری جریان محورهای طولی و عرضی بصورت (۱۲-۵) تعیین می‌شود.

$$V_t \sin \delta = I_q X_q \Rightarrow I_q = \frac{V_t \sin \delta}{X_q} \quad (۱۰-۵)$$

$$V_t \cos \delta = I_d X_d \Rightarrow I_d = \frac{V_t \cos \delta}{X_d} \quad (۱۱-۵)$$

$$I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \frac{V_t}{X_d} \sqrt{K^2 \sin^2 \delta + \cos^2 \delta} \quad (۱۲-۵)$$

با تقسیم طرفین رابطه (۹-۵) بر I_a رابطه (۱۳-۵) بدست می‌آید.

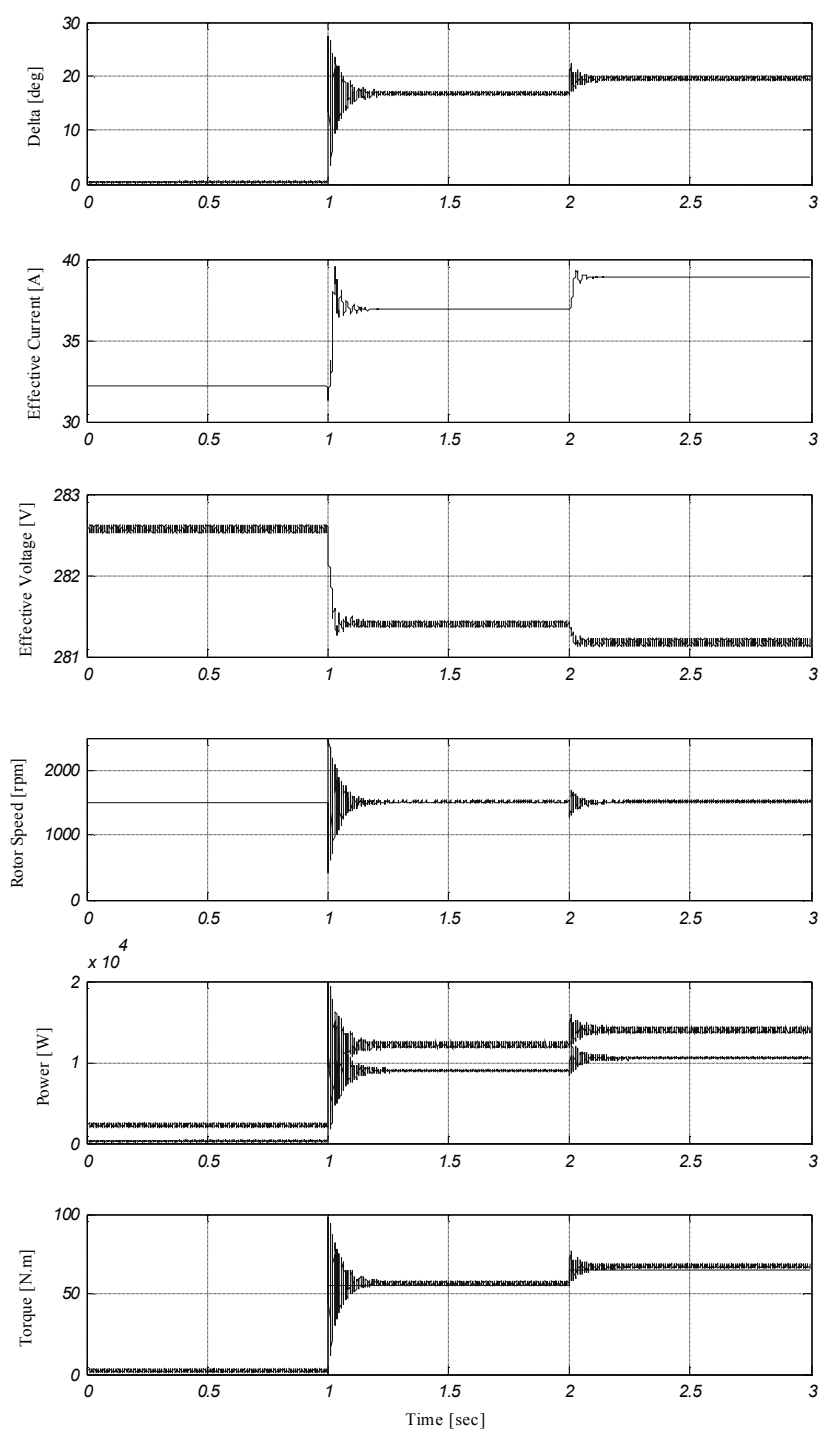
$$\frac{P}{I_a} = \frac{V_t (K-1) \sin(2\delta)}{2 \sqrt{K^2 \sin^2 \delta + \cos^2 \delta}} \quad (۱۳-۵)$$

با فرض $\delta=45^\circ$ و اندازه‌گیری مقادیر توان اکتیو، جریان فاز و ولتاژ ترمینال در لحظه خروج از سنکرونیزم، می‌توان ضریب K را از رابطه (۵-۱۳) محاسبه کرد. مهمترین مشکل این روش در این است که وجود سیم‌پیچ‌های میراکننده باعث می‌شود تا موتور بعد از خروج از سنکرونیزم بصورت القائی در سرعتی کمتر از سرعت سنکرون بکار خود ادامه دهد. لذا بایستی دقت زیادی در مشخص کردن لحظه خروج از سنکرونیزم به عمل آورد. البته در مدل شبیه‌سازی شده آزمایش موتور رلوکتانسی، می‌توان سیم‌پیچ‌های میرایی را حذف کرد تا مشکل فوق بوجود نیاید. اما راحت‌تر آنست که اصلاً موتور از سنکرونیزم خارج نشود. در مدل شبیه‌سازی شده می‌توان با افزودن یک بار مکانیکی دلخواه به موتور رلوکتانسی، توان اکتیو، جریان فاز، ولتاژ ترمینال و زاویه بار را اندازه‌گیری نموده و نسبت راکتانس‌های طولی و عرضی را محاسبه کرد. اما در آزمایش واقعی، اندازه‌گیری زاویه رتور به آسانی امکان‌پذیر نبوده و معادله (۵-۱۳) بایستی در لحظه خروج از سنکرونیزم ($\delta=45^\circ$) حل شود.

۵-۳-۱. شبیه‌سازی موتور رلوکتانسی

در مدل شبیه‌سازی شده موتور سنکرون، مقاومت سیم‌پیچ تحریک بسیار زیاد فرض می‌شود تا موتور بصورت رلوکتانسی کار کند. موتور به منبع تغذیه با ولتاژ و فرکانس نامی متصل شده و بار مکانیکی به اندازه $55^{N.m}$ پس از 1 ثانیه و $10^{N.m}$ پس از 2 ثانیه به مدل اضافه می‌شود. شکل (۵-۸) کمیت‌های مختلف سیستم را نشان می‌دهد.

در این شکل بترتیب اختلاف زاویه رتور و میدان دوار استاتور، مقدار موثر جریان فاز a ، مقدار موثر ولتاژ فاز a ، سرعت رتور، توان‌های الکتریکی و مکانیکی ماشین و گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی ماشین نشان داده شده است. با توجه به شکل، دو حالت مختلف کاری موتور رلوکتانسی با مشخصات مندرج در جدول (۵-۱) بدست می‌آید. نسبت راکتانس‌های طولی و عرضی در هر یک از این حالات با استفاده از رابطه (۵-۱۳) بدست آمده و در جدول نشان داده شده است.



شکل ۵-۸: کمیت‌های مختلف سیستم در حین افزایش بار مکانیکی

جدول ۵-۱: کمیت‌های سیستم در دو بار مکانیکی مختلف

δ [deg]	I_a [A]	V_a [V]	ω [rpm]	P_e [W]	T_e [N.m]	K
17.08	36.89	281.4	1499	12462	57.99	2.33
19.73	38.86	281.2	1500	14250	67.68	2.63

نسبت راکتانس‌های طولی و عرضی (K) با استفاده از نتایج آزمایش‌های قبلی بصورت زیر تعیین می‌شود.

$$K = \frac{X_d}{X_q} = \frac{1.63}{0.66} = 2.43 \quad (۱۴-۵)$$

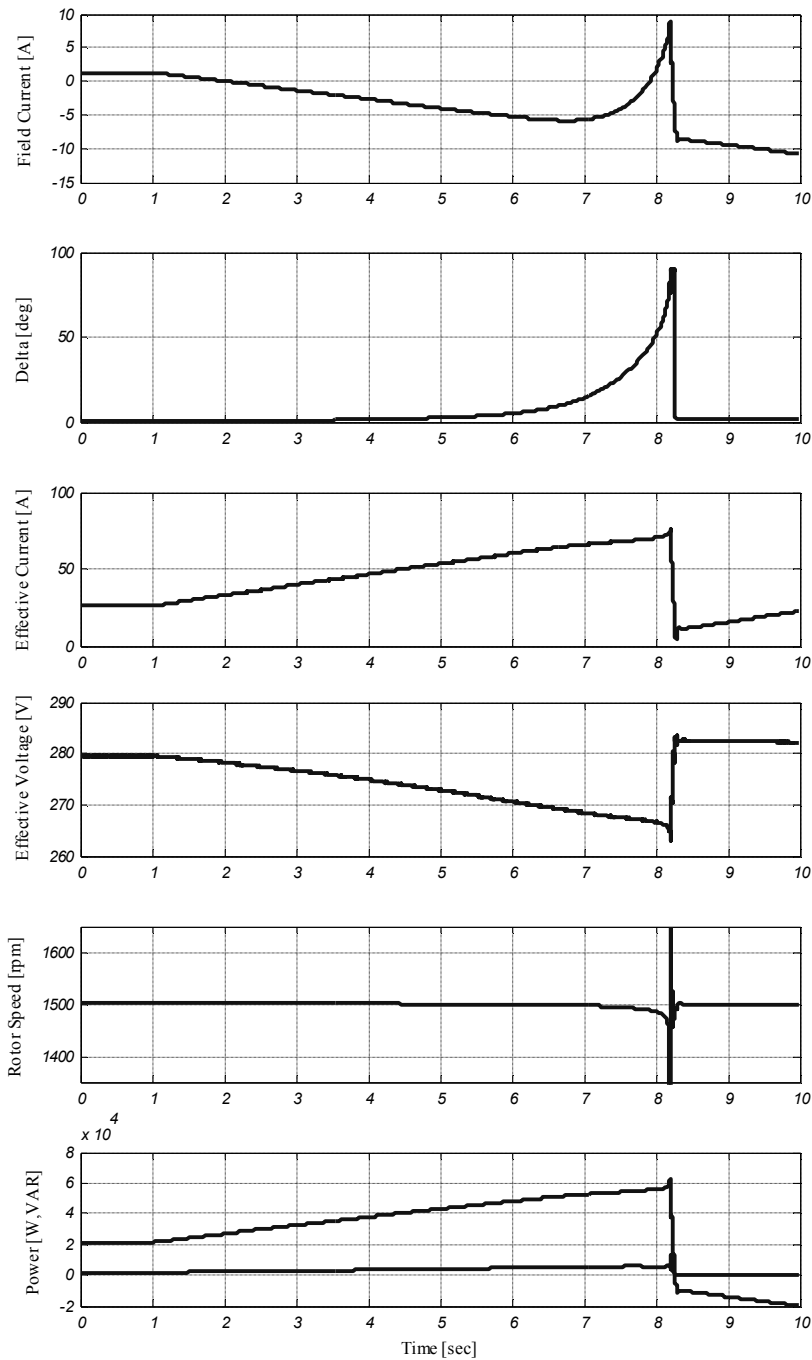
مقایسه این نتایج، انطباق قابل قبولی را بین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای استفاده از مقادیر جدول (۱-۵) در حل معادله (۱۳-۵) بایستی مقدار توان الکتریکی را بر ۳ تقسیم نمود تا مقدار آن برای یک فاز بدست آید. همچنین از آنجائیکه ماشین شبیه‌سازی شده چهار قطبی است، زاویه δ باید دو برابر شود تا مقدار زاویه مغناطیسی بدست آید.

۵-۴. آزمایش حداکثر جریان پس‌فاز

این آزمایش برای تعیین راکتانس محور عرضی ماشین انجام می‌شود. موتور سنکرون به منبع ولتاژ با فرکانس نامی متصل شده و بدون بار مکانیکی کار می‌کند. جریان تحریک ماشین بتدریج کاهش یافته و به صفر می‌رسد. سپس جریان تحریک معکوس شده و در جهت منفی افزایش می‌یابد. بدلیل وجود گشتاور رلوکتانسی، حتی در جریان تحریک منفی، موتور در وضعیت سنکرون به کار خود ادامه می‌دهد. افزایش جریان تحریک در جهت منفی باعث افزایش جریان آرمیچر خواهد شد بگونه‌ای که شار برآیند رتور و استاتور در فاصله هوایی ثابت بماند. از آنجائیکه گشتاورهای الکترومغناطیسی و رلوکتانسی در خلاف جهت یکدیگر هستند، افزایش مداوم در جریان تحریک و گشتاور الکترومغناطیسی، سرانجام باعث خروج ماشین از سنکرونیزم شده و بعد از لغزش یک قطب، رتور دوباره با قطب بعدی سنکرون می‌شود. راکتانس محور عرضی مطابق رابطه (۱۵-۵) از تقسیم ولتاژ به جریان یک فاز درست در لحظه قبل از لغزش قطب بدست می‌آید.

$$X_q = \frac{\text{ولتاژ فاز استاتور قبل از لغزش قطب}}{\text{جریان فاز استاتور قبل از لغزش قطب}} \quad (۱۵-۵)$$

در اینجا با شبیه‌سازی موتور سنکرون در حالت بدون بار، ولتاژ تحریک از یک مقدار مثبت آغاز شده و با شیب کمی کاهش می‌یابد. این فرآیند تا لحظاتی پس از لغزش قطب نیز ادامه دارد. شکل زیر بترتیب جریان تحریک، زاویه بار، مقدار موثر جریان آرمیچر، مقدار موثر ولتاژ آرمیچر، سرعت رتور و توان‌های اکتیو و راکتیو ماشین را طی این دوره نشان می‌دهد.



شکل ۵-۹: کمیت‌های مختلف سیستم در حین تغییر جریان تحریک

با توجه به نتایج شبیه‌سازی و رابطه (۵-۱۵)، راکتانس محور عرضی ماشین بصورت زیر تعیین می‌شود.

$$X_q = \frac{V_t}{I_a} = \frac{265}{74} = 3.58 \Omega \cong 0.65 pu \quad (۵-۱۶)$$

مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی آزمایش‌های مختلف معرفی شده در این فصل، انطباق قابل قبولی را بین آنها نشان می‌دهد که می‌تواند نشانگر دقت روش بکار رفته و کارایی مدل شبیه‌سازی بجای آزمایش واقعی باشد. علاوه بر این، الگوریتم بکار رفته، هزینه و خطاهای مربوط به آزمایش‌های واقعی را نداشته و تنها با استفاده از نتایج تحلیل اجزای محدود ماشین و مدل‌سازی آن، برای هر نوع ماشین سنکرون قابل اعمال است.

فصل ششم

روش‌های کلاسیک

تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین

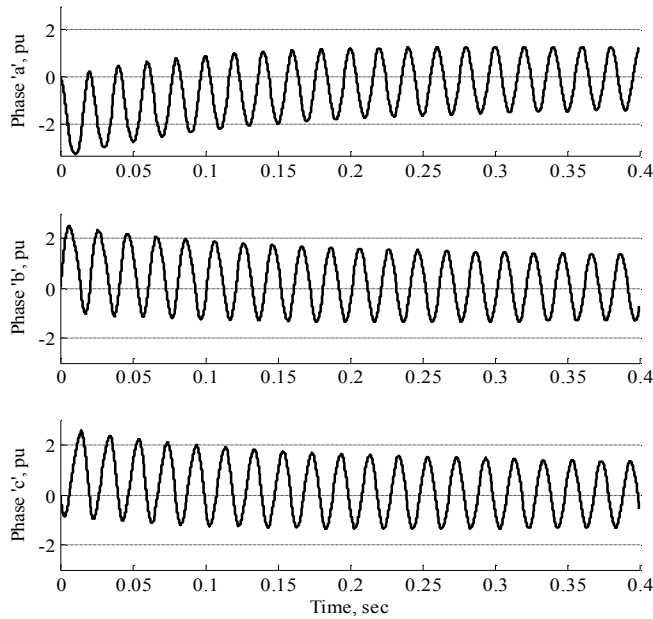
در فصل قبل به بررسی روش‌های تعیین مهمترین پارامترهای ماشین سنکرون یعنی راکتانس‌های طولی و عرضی پرداختیم. از این پس روش‌هایی را بررسی می‌کنیم که برای تعیین سایر پارامترهای دینامیکی ماشین شامل راکتانس‌های گذرای و ثوابت زمانی بکار می‌روند. اولین دسته این روش‌ها، روش‌های کلاسیک هستند. آزمایش‌های کلاسیک عموماً قبل از دهه ۸۰ میلادی ابداع شده‌اند، اغلب استاندارد هستند، به تجهیزات خاصی نیاز نداشته و بر روی هر نوع ماشین سنکرون قابل انجام هستند. اما با انجام هر یک از آنها تعدادی از پارامترهای دینامیکی ماشین و نه تمام پارامترها، بدست می‌آیند. علاوه بر این بعضی از آزمایش‌های کلاسیک با وجود استاندارد بودن، مخرب بوده و مجوز انجام آنها بدلیل خطراتی که برای ماشین تحت آزمایش دارند، صادر نمی‌شود. بعنوان مثال، آزمایش اتصال کوتاه سه‌فاز علاوه بر خطرات الکتریکی، خطرات مکانیکی را نیز در بر داشته و ممکن است موجب خسارات جبران‌ناپذیری در ماشین شود. آزمایش اتصال کوتاه ناگهانی سه‌فاز و آزمایش قطع بار دینامیکی ماشین، از جمله مهمترین روش‌های کلاسیک هستند که در این فصل به تشریح و شبیه‌سازی آنها می‌پردازیم. سایر روش‌های کلاسیک اهمیت کمتری داشته و در اینجا از طرح آن خودداری می‌شود.

۱-۶. آزمایش اتصال کوتاه ناگهانی سه‌فاز

روش‌های مبتنی بر آزمایش، تقریب‌های نسبتاً مناسبی از پارامترهای ژنراتور ارائه می‌دهند. اما مسلماً انجام آزمایش بر روی ژنراتور مستلزم صرف زمان و هزینه است. از طرف دیگر نتایج آزمایش تحت تاثیر دقت وسایل اندازه‌گیری و دقت فرآیند آزمایش می‌باشند. الگوریتم‌های ارائه شده برای استخراج پارامترهای ماشین از نتایج آزمایش نیز همراه با تقریب بوده و وجود خطا در این نتایج اجتناب‌ناپذیر است. علاوه بر این، همانگونه که بیان شد برخی آزمایش‌ها مانند اتصال کوتاه سه‌فاز مخرب بوده و انجام آن همراه با خطرات الکتریکی و مکانیکی برای ماشین است. این مسائل سبب شده است تا امروزه روش‌هایی مانند اتصال کوتاه سه‌فاز با وجود استاندارد بودن و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده، کمتر مورد توجه قرار گرفته و محققان به روش‌های مدرن روی آورده‌اند. اما تمام مشکلات فوق با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و ارائه الگوریتم‌های هوشمند جهت پردازش نتایج، قابل حل است [23]. در این بخش، با شبیه‌سازی آزمایش اتصال کوتاه سه‌فاز، جریان‌های اتصال کوتاه برای سیم‌پیچ‌های ماشین مورد مطالعه بدقت بدست آمده است. سپس روشی بر مبنای الگوریتم ژنتیک ارائه شده و پارامترهای دینامیکی ماشین با تجزیه و تحلیل جریان‌های اتصال کوتاه آن، تعیین می‌شود. روش ارائه شده مستلزم صرف زمان و هزینه کمتر، نتایج دقیق‌تر و عدم خطرات مربوط به آزمایش واقعی است.

۱-۶-۱. شبیه‌سازی آزمایش اتصال کوتاه سه‌فاز

اتصال کوتاه متقارن سه‌فاز بصورت یک بار متقارن با امپدانس بسیار ناچیز فرض شده که در سرعت و تحریک نامی بطور ناگهانی به ترمینال ژنراتور شبیه‌سازی شده، متصل می‌شود. در حین این اتصال کوتاه، AVR در سیستم وجود نداشته و ولتاژ تحریک ماشین ثابت است. شکل (۱-۶) جریان‌های سه‌فاز استاتور را در لحظات پس از اعمال اتصال کوتاه نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱: جریان‌های اتصال کوتاه ماشین

۲-۱-۶. تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی

مولفه پریودیک اصلی جریان‌های اتصال کوتاه ماشین بصورت سینوسی و هم فرکانس با ولتاژ ماشین است. دامنه این موج سینوسی، دارای یک مولفه دائمی متناسب با معکوس راکتانس دائمی محور مستقیم ماشین و مولفه‌های گذرا و فوق گذرای آن نیز متناسب با راکتانس‌های گذرا و فوق گذرای محورهای مستقیم و عمودی ماشین است. علاوه بر این، یک مولفه غیر پریودیک نمایی و یک مولفه هارمونیک دوم نیز در جریان‌های اتصال کوتاه وجود دارند. بطور کلی می‌توان جریان اتصال کوتاه متقارن یک فاز ماشین سنکرون را با رابطه زیر بیان کرد [24].

$$\begin{aligned}
 i_a = & V_m \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \exp\left(\frac{-t}{T'_d}\right) + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \exp\left(\frac{-t}{T''_d}\right) \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) \\
 & - \frac{V_m}{2} \left(\frac{1}{X'_d} + \frac{1}{X''_d} \right) \exp\left(\frac{-t}{T_a}\right) \cos(\lambda) \\
 & - \frac{V_m}{2} \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \exp\left(\frac{-t}{T_a}\right) \cos(2\omega_0 t + \lambda)
 \end{aligned} \tag{۱-۶}$$

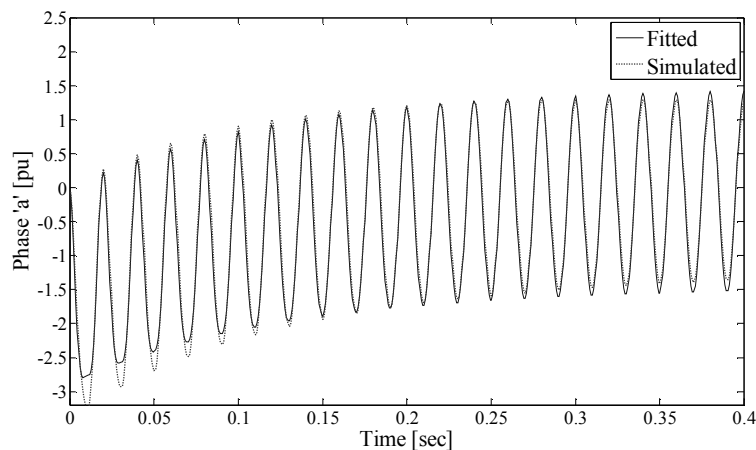
که در آن ω_0 فرکانس ماشین و λ زاویه بین محور فاز a و محور d ماشین در لحظه اتصال کوتاه است. سایر متغیرهای این معادله، پارامترهای دینامیکی ماشین را نشان می‌دهند که بایستی بگونه‌ای تعیین شوند که منحنی حاصل از معادله فوق بر منحنی بدست آمده از شبیه‌سازی منطبق باشد. بدین ترتیب پارامترهای دینامیکی ماشین مشخص می‌شوند. اما معادله غیر خطی (۶-۱) دارای پارامترهای زیادی بوده و همگرایی برای همه متغیرها در فرآیند برازش منحنی در تمام دوره گذرا و دائمی جریان بسیار مشکل است [25]. در سال ۱۹۸۳ یک روش گرافیکی برای حل این مساله ارائه شد [26]. در این روش، جریان اتصال کوتاه ماشین در بازه‌های جداگانه‌ای بررسی می‌شود که هر یک شامل تنها یک مولفه از جریان رابطه (۶-۱) است. بدین ترتیب انطباق منحنی بر مولفه‌های تجزیه شده جریان بسیار آسان خواهد بود. اما این روش نیز دارای مشکلات فراوانی است. از آنجائیکه T_a و T_d'' تقریباً هم اندازه‌اند، جداسازی تاثیر آنها در جریان اتصال کوتاه ممکن نیست، در حالیکه اندازه جریان زیرگذرا بسیار بیشتر از جریان هارمونیک دوم است. علاوه بر این مولفه نمایی جریان در فازهای مختلف، متفاوت بوده و لذا پارامترهای بدست آمده از فازهای مختلف، اختلاف قابل توجهی دارند و حتی در برخی موارد مقدار این پارامترها منفی است [27]. برای حل این مشکل از میانگین مقادیر بدست آمده از فازهای مختلف بعنوان مقادیر نهایی پارامترهای دینامیکی ماشین استفاده شد، اما بدیهی است که میزان تقریب و خطا در این روش همچنان زیاد است. در سال ۱۹۸۴ یک روش غیرخطی برای انطباق منحنی جریان اتصال کوتاه سه فاز ارائه شد که براساس می‌نیم کردن مجموع خطای مطلق بین جریان واقعی ماشین و جریان محاسبه شده توسط معادله (۶-۱) عمل می‌کرد [28]. با وجود آنکه توسط این روش پارامترهای دینامیکی یک توربو ژنراتور تعیین گردید، اما این روش در مورد تخمین منحنی جریان‌های اتصال کوتاه ماشین به اندازه کافی کارآمد نبود [27]. در سال ۱۹۹۴ یک روش مقاوم^۱ و چند متغیره ارائه شد که بصورت همزمان بر منحنی‌های جریان‌های سه فاز استاتور و جریان تحریک ماشین قابل انطباق بود [29]. اما این روش نیز بهبود چندانی در کیفیت انطباق منحنی ایجاد

^۱ Robust

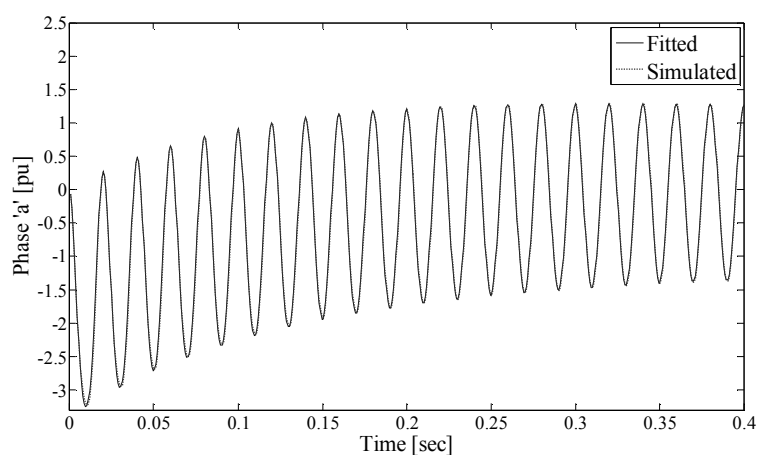
نکرد، بلکه تنها محاسبه پارامترهای گذرا و زیرگذرای ماشین را آسان‌تر نمود [27]. سال‌های متمادی است که از روش گرافیکی با تقریب نسبتاً زیاد برای حل مساله انطباق منحنی استفاده می‌شود و معمولاً به جواب یکتایی برای این مساله می‌رسیم. حال آنکه واقعا جواب یکتایی برای معادله (۶-۱) وجود ندارد. جدول زیر، دسته جواب‌های متفاوت برای این مساله را نشان می‌دهد که با الگوریتم ژنتیک بدست آمده‌اند و همگی انطباق خوبی بین دو منحنی جریان واقعی و جریان محاسبه شده ایجاد می‌کنند. شکل‌های (۶-۲) تا (۶-۵) میزان انطباق منحنی برای هر یک از این دسته جواب‌ها در فاز a استاتور را نشان می‌دهند.

جدول ۶-۱: پارامترهای دینامیکی ماشین با انطباق بر جریان اتصال کوتاه

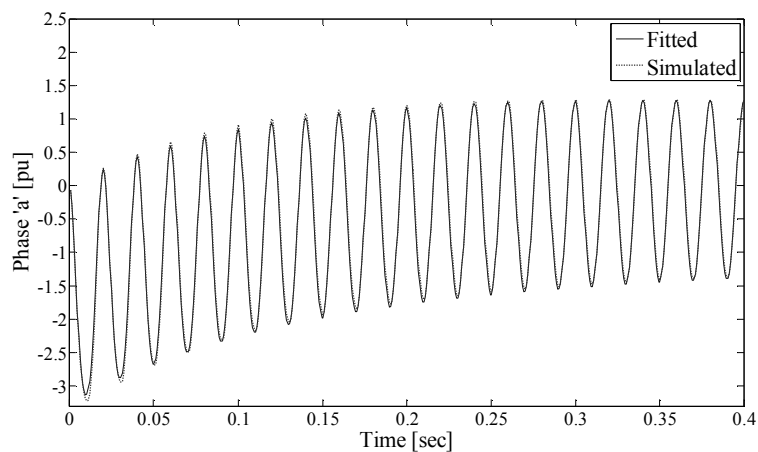
Dynamic Parameters [pu]	I	II	III	IV
X_d	13.6553	1.2283	86.3636	-10.5387
X'_d	-0.6229	1.1647	-6.9289	-0.89
X''_d	0.6932	0.5843	0.612	0.6152
X''_q	0.433	0.476	0.4863	0.4968
T'_d	0.9376	1.2231	0.4569	1.8799
T''_d	2.004	0.6459	1.5966	2.0094
T_a	0.1243	0.1074	0.1207	0.1213



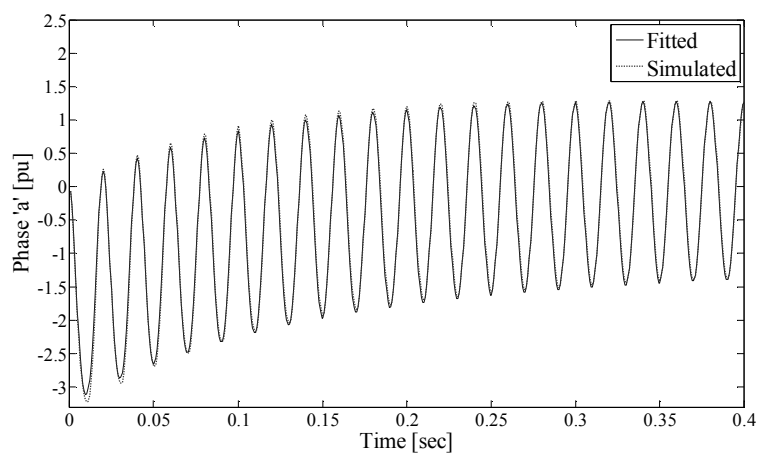
شکل ۶-۲: جریان اتصال کوتاه فاز a و جریان محاسبه شده توسط پارامترهای گروه I



شکل ۶-۳: جریان اتصال کوتاه فاز a و جریان محاسبه شده توسط پارامترهای گروه II



شکل ۶-۴: جریان اتصال کوتاه فاز a و جریان محاسبه شده توسط پارامترهای گروه III



شکل ۶-۵: جریان اتصال کوتاه فاز a و جریان محاسبه شده توسط پارامترهای گروه IV

هر یک از دسته پارامترهای فوق به شکل مناسبی باعث انطباق دو منحنی می‌شوند، اما تفاوت بسیار زیاد در داده‌های جدول (۱-۶)، عدم یکتایی در جواب معادله (۱-۶) را تایید می‌کند. روش‌های متداول برای انطباق منحنی، یک جواب ممکن را فرض کرده و به سمت جواب بهینه حرکت می‌کنند. لذا همیشه به یک جواب واحد می‌رسند. اما الگوریتم ژنتیک جمعیتی از جواب‌های ممکن را فرض کرده و می‌تواند تمام جواب‌های بهینه را برای مساله پیدا کند. در اینجا با معرفی یک تابع شایستگی^۱ جدید، روشی بر پایه الگوریتم ژنتیک برای استخراج پارامترهای دینامیکی ماشین از آزمایش اتصال کوتاه ارائه شده که در عین دقت بالا، دارای جواب یکتایی است.

۳-۱-۶. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش قدرتمند برای حل مسائل بهینه‌سازی براساس سیر تکامل تدریجی بیولوژیکی است. بویژه هنگامیکه مساله بهینه‌سازی دارای نقاط ماکزیمم یا می‌نیمم محلی^۲ باشد، معمولاً الگوریتم ژنتیک بهترین روش برای تمایز جواب کلی^۳ و جواب‌های محلی است. در این روش، جمعیتی از افراد برای مساله انتخاب شده و بصورت تکراری تصحیح می‌شوند. هر فرد جامعه یک ژن نامیده می‌شود و آرایه‌ای از متغیرهای مساله یا همان کروموزوم‌ها است. در هر مرحله، با تولید نسل جدید، برخی از افراد جامعه به جواب‌های واقعی مساله نزدیکتر می‌شوند. الگوریتم کلی این روش در فلوجارت شکل (۶-۷) خلاصه شده است. همگرایی این روش تا حد زیادی به استراتژی تولید مثل بستگی دارد که بطور کلی تابع سه روش عمده می‌باشد:

الف) ترکیب ژن‌ها: تعداد زیادی از فرزندان هر نسل از ترکیب ژنتیکی والدین تولید می‌شوند. در این روش، هر فرزند یا ژن جدید با انتخاب کروموزوم‌های ویژه‌ای از دو ژن دیگر تولید می‌شود. چگونگی انتخاب کروموزوم‌های والدین نیز تابع قوانین ویژه و مشخصی است.

¹ Fitness Function

² Local Minimum

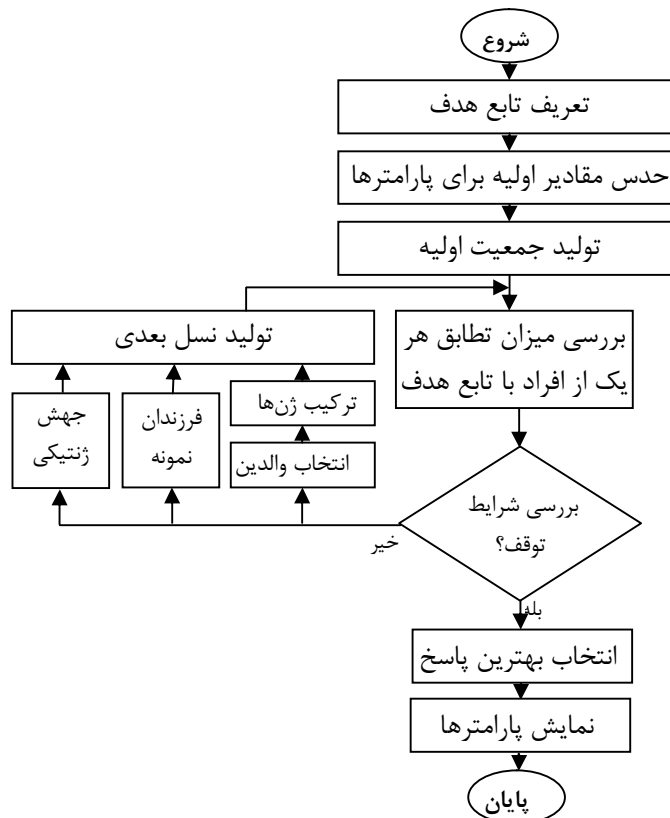
³ Global Minimum

⁴ Crossover

ب) فرزندان نمونه^۱: در هر مرحله، درصد مشخصی از افراد جامعه که بیشترین میزان تطابق با تابع هدف را دارند، بعنوان فرزندان نمونه انتخاب شده و بدون تغییر به مرحله بعد می‌روند. این شیوه تولید، تاثیر محسوسی بر سرعت همگرایی الگوریتم دارد.

ج) جهش ژنتیکی^۲: تغییرات تصادفی در کروموزوم‌های یک ژن منجر به تولید یک ژن جهش یافته بعنوان فرزندی در مرحله بعدی می‌شود. بدین ترتیب طیف وسیع‌تری از جواب‌های ممکن مساله بررسی می‌شوند.

شرایط ویژه‌ای برای توقف این الگوریتم مشخص می‌شود که در مسائل مختلف، متفاوت است، اما عدم تجاوز تغییرات پارامترهای مساله از محدوده‌ای مشخص پس از طی تعداد مشخصی از مراحل، شرط رایج برای توقف الگوریتم در اغلب مسائل می‌باشد.



شکل ۶-۶: الگوریتم ژنتیک

¹ Elite Children

² Mutation

۴-۱-۶. استخراج پارامترهای دینامیکی ماشین

برای تعیین پارامترهای دینامیکی ژنراتور سنکرون مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، ابتدا بایستی تابع هدف برای می‌نیم کردن را مشخص نمود. معمولاً این تابع بصورت مجموع مجذور تفاضل بین جریان نمونه‌برداری شده و رابطه (۱-۶) تعریف می‌شود که در رابطه (۲-۶) نشان داده شده است.

$$F_a = \sum_{i=1}^n (i_{a_i(acquired)} - i_{a_i(equation)})^2 \quad (2-6)$$

می‌نیم کردن این تابع، منجر به می‌نیم شدن مجموع خطای بین منحنی جریان اتصال کوتاه شبیه‌سازی شده و منحنی جریان محاسبه شده توسط پارامترهای بدست آمده می‌شود. اما همانگونه که مطرح شد، جواب‌های این معادله یکتا نیست. در اینجا تابع هدف بصورت مجموع این خطا در انطباق منحنی بر جریان هر یک از فازها و جریان میدان تحریک بصورت رابطه (۳-۶) تعریف شده است.

$$F = F_a + F_b + F_c + F_f \quad (3-6)$$

می‌نیم کردن این تابع منجر به انطباق همزمان چهار منحنی بر جریان‌های سه‌فاز استاتور و جریان تحریک می‌شود. جریان میدان تحریک با رابطه (۴-۶) داده می‌شود.

$$i_f = i_{f0} + i_{f0} \left(\frac{X_d - X'_d}{X'_d} \right) \left[\exp\left(\frac{-t}{T'_d}\right) - \left(1 - \frac{T_{kd}}{T'_d}\right) \exp\left(\frac{-t}{T''_d}\right) - \frac{T_{kd}}{T'_d} \exp\left(\frac{-t}{T_a}\right) \cos(\omega_0 t) \right] \quad (4-6)$$

یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر الگوریتم ژنتیک، تعداد افراد جامعه است. هرچه اندازه جمعیت بیشتر باشد، سرعت پیشرفت الگوریتم کاهش یافته اما طیف وسیع‌تری از پاسخ‌ها بررسی می‌شوند. بطور معمول، اندازه جمعیت، ده برابر تعداد متغیرهای مساله انتخاب می‌شود. جامعه فرض شده برای این مساله شامل 100 فرد است. جمعیت اولیه نیز با یک توزیع تصادفی یکنواخت در بازه (0,1) انتخاب می‌شود. چگونگی ترکیب ژنتیکی با تولید یک بردار تصادفی باینری مشخص می‌شود. این بردار

دارای بعد برابر با افراد جامعه بوده و از اعداد تصادفی باینری تشکیل شده است. هنگامیکه یک عضو این بردار صفر باشد، کروموزومی از فرد اول انتخاب می‌شود و هنگامیکه این عضو یک باشد، کروموزوم از فرد دوم انتخاب می‌شود. این کروموزوم‌ها ترکیب شده و فرزندی را برای نسل بعدی تولید می‌کنند. یک نمونه از این فرآیند در زیر نشان داده شده است.

Parent 1= [1.25 0.81 0.46 0.42 0.77 0.65 0.15 0.88]

Parent 2= [1.36 0.77 0.48 0.51 0.83 0.64 0.09 0.95]

Crossover Rule= [1 0 0 0 1 1 0 1] => Child= [1.36 0.81 0.46 0.42 0.83 0.64 0.15 0.95]

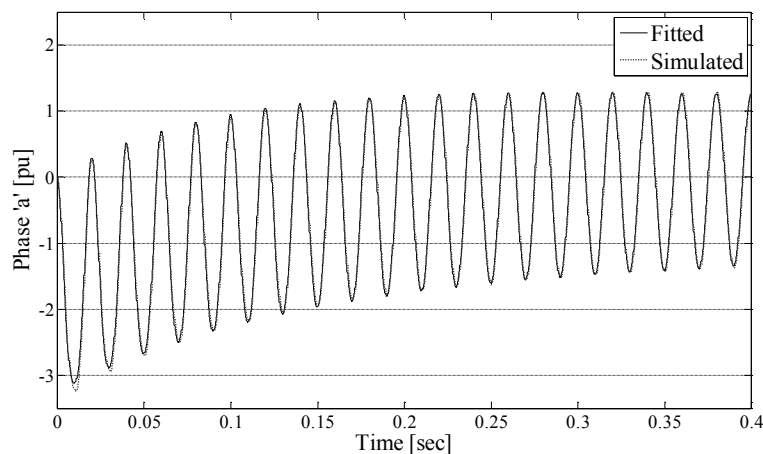
در هر مرحله از تولید نسل، 3% از افراد جامعه که بیشترین میزان تطابق را داشته باشند، بعنوان فرزندان نمونه انتخاب شده و به مرحله بعد می‌روند. جهش ژنتیکی با افزودن اعداد تصادفی به کروموزوم‌های 2% از افراد جامعه انجام می‌شود. این اعداد تصادفی توسط یک تابع توزیع نرمال استاندارد تولید می‌شوند. واریانس این تابع در مرحله اول، یک است و بصورت خطی در هر مرحله از اجرای الگوریتم کاهش می‌یابد. برای رسیدن به پاسخ دقیق‌تر، مقدار تلورانس مجاز در تغییرات تابع هدف برابر $1e-10$ انتخاب شده که عدد بسیار کوچکی برای این کمیت می‌باشد. انتخاب این مقدار کوچک برای تلورانس مجاز، باعث طولانی شدن مراحل الگوریتم شده اما به جواب دقیق‌تری می‌انجامد.

اصولا الگوریتم ژنتیک دارای پاسخ‌های متفاوت در هر اجرا است. زیرا بسیاری از مراحل این روش مانند تعیین جمعیت اولیه، ترکیب ژنتیکی، جهش ژنتیکی و... همگی درگیر توابع تصادفی هستند. نتایج نشان داده شده در جدول (۶-۱) نیز این موضوع را نشان می‌دهند. البته در صورت یکتایی پاسخ مساله، میزان تفاوت در پاسخ‌های این الگوریتم بسیار ناچیز خواهد بود. اما برای حصول اطمینان از دقت نتایج، این الگوریتم سه بار اجرا شده و میانگین پارامترهای بدست آمده بعنوان نتیجه نهایی انتخاب می‌شوند. این نتایج در جدول (۶-۲) نشان داده شده است.

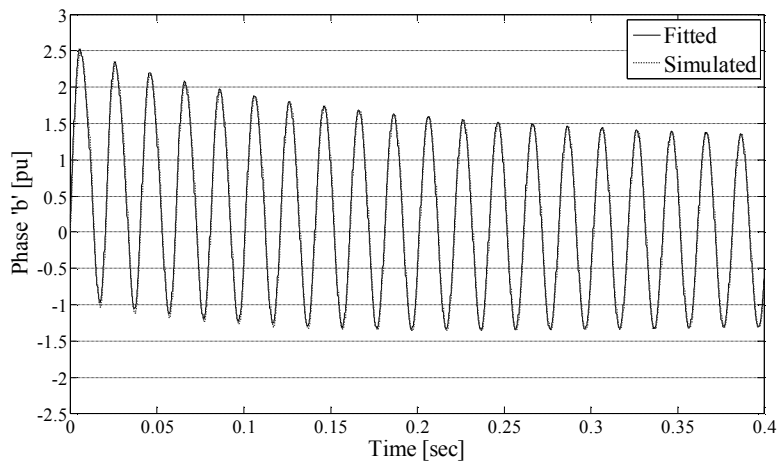
جدول ۶-۲: پارامترهای دینامیکی ماشین با استفاده از تابع شایستگی جدید

Dynamic Parameters [pu]	I	II	III	Average
X_d	1.6438	1.6414	1.6502	1.6451
X'_d	0.6424	0.6505	0.6478	0.6469
X''_d	0.5887	0.5843	0.5832	0.5854
X''_q	0.4663	0.4621	0.6717	0.5333
T'_d	1.6372	1.6448	1.6398	1.6406
T''_d	0.0409	0.0455	0.0464	0.0442
T_a	0.1112	0.1088	0.1144	0.1114
I_0	1.0519	1.0512	1.0518	1.0516

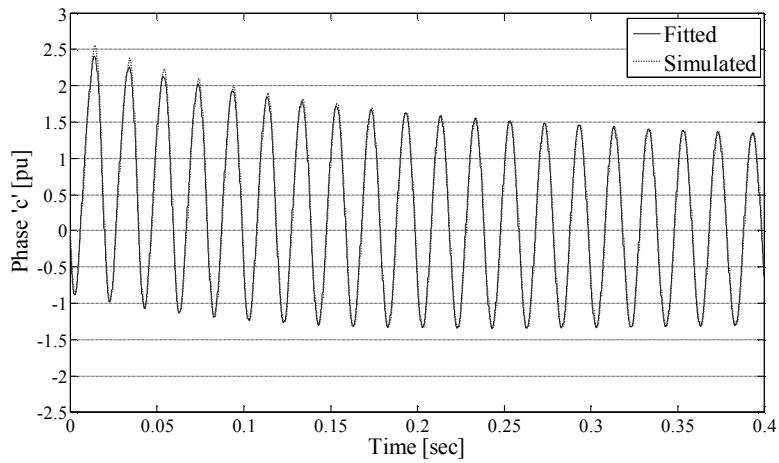
همانگونه که مشاهده می‌شود، جواب‌های بدست آمده از الگوریتم ژنتیک در هر مرحله اجرا اندکی متفاوت است و این بدلیل ماهیت استوکاستیکی این الگوریتم می‌باشد. اما در مجموع داده‌های جدول فوق پاسخ یکتایی را برای مساله نشان می‌دهند. شکل‌های (۶-۷) تا (۶-۱۰) جریان‌های اتصال کوتاه شبیه‌سازی شده را به همراه جریان‌های محاسبه شده توسط تابع شایستگی جدید، برای فازهای a, b و c و سیم‌پیچ تحریک ماشین نشان می‌دهند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که دقت الگوریتم ژنتیک بکار گرفته شده در انطباق منحنی بگونه‌ای است که منحنی اصلی و منحنی محاسبه شده اصولاً قابل تشخیص نیستند. لذا پارامترهای محاسبه شده دارای دقت بسیار بیشتری نسبت به الگوریتم‌های مشابه قبلی برای انطباق منحنی، خواهند بود.



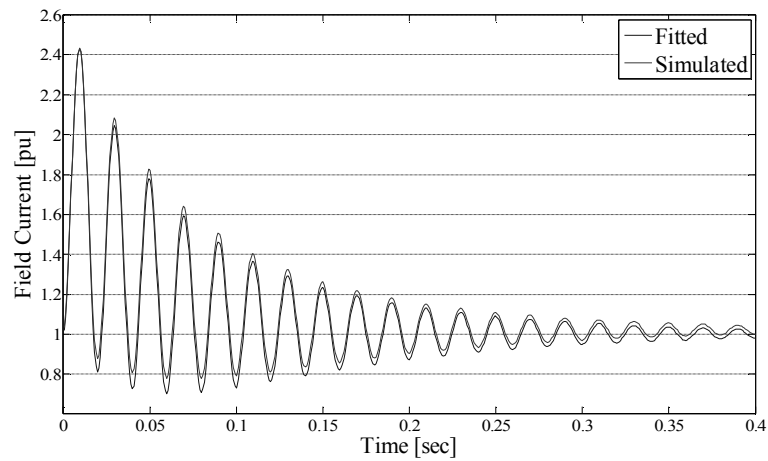
شکل ۶-۷: جریان‌های شبیه‌سازی شده و محاسبه شده در فاز a



شکل ۶-۸: جریان‌های شبیه‌سازی شده و محاسبه شده در فاز b



شکل ۶-۹: جریان‌های شبیه‌سازی شده و محاسبه شده در فاز c



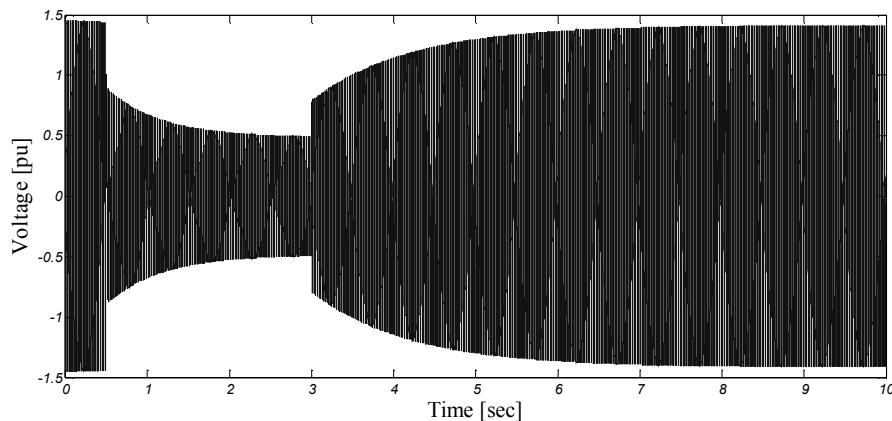
شکل ۶-۱۰: جریان‌های شبیه‌سازی شده و محاسبه شده در سیم‌پیچ تحریک

۲-۶. آزمایش قطع بار دینامیکی

آزمایش قطع بار دینامیکی یکی دیگر از آزمایش‌های مورد استفاده در تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین سنکرون است. مشابه آزمایش اتصال کوتاه ناگهانی سه‌فاز، این روش نیز درگیر مشکلات مربوط به انجام آزمایش روی ماشین و الگوریتم پردازش نتایج و استخراج پارامترها می‌باشد. در این بخش با شبیه‌سازی آزمایش قطع بار دینامیکی، ولتاژ ترمینال ماشین در حین قطع بار الکتریکی آن بدست آمده و با توسعه روشی بر مبنای الگوریتم ژنتیک، پارامترهای دینامیکی ماشین تعیین شده است.

۱-۲-۶. شبیه‌سازی آزمایش

برای شبیه‌سازی آزمایش قطع ناگهانی بار، بار سه‌فاز متقارن یک پریونیت با ضریب قدرت 0.8 پس‌فاز به ترمینال ماشین بی‌بار متصل شده و پس از طی شدن حالات گذرا، بطور ناگهانی از ترمینال ژنراتور جدا می‌شود. در حین این فرآیند، AVR در سیستم وجود نداشته و ولتاژ تحریک ماشین ثابت است. از آنجائیکه عدم تغییرات فرکانس ماشین نیز یکی از عوامل موثر در دقت نتایج می‌باشد، گاورنر از مدل حذف شده و سرعت ماشین برابر مقدار ثابت 1500^{rpm} فرض می‌شود در حالیکه در آزمایش واقعی، ثابت نگه داشتن فرکانس در حین قطع یا وصل بار تقریباً غیرممکن است. شکل (۶-۱۱) ولتاژ فاز a را در حالتی نشان می‌دهد که ابتدا بار مذکور به ترمینال مدل ژنراتور متصل شده و پس از رسیدن به حالت دائمی، ناگهان قطع می‌شود.



شکل ۶-۱۱: ولتاژ فاز a در حین وصل و قطع بار 1 pu و 0.8 پس‌فاز

۲-۲-۶. تحلیل نتایج و انطباق منحنی

رابطه‌های ولتاژ ترمینال ماشین در حین قطع بار برای دو رژیم کار گذرا و حالت دائمی را می‌توان بطور جداگانه توصیف کرد [30]. پس از وصل بار و طی حالات گذرای سیستم، ولتاژهای متعادل سه‌فاز در حالت دائمی، بصورت زیر بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned} v_a &= U \cdot \sin(\omega t - \delta) \\ v_b &= U \cdot \sin(\omega t - \delta - 120) \\ v_c &= U \cdot \sin(\omega t - \delta + 120) \end{aligned} \quad (۵-۶)$$

که در آن، U مقدار بیشینه ولتاژ حالت دائمی بارداری ماشین برای لحظات قبل از قطع بار است که با توجه به شکل (۶-۱۱)، مقدار آن برابر 0.5 پریونیت می‌باشد. مقدار δ نیز نشان‌دهنده زاویه بار است که با توجه به ضریب قدرت آن ($PF=0.8$) برابر 0.64 رادیان می‌باشد. به منظور تعیین پارامترهای ماشین، می‌توان ولتاژهای گذرای فازها و مولفه‌های آنها در راستای محورهای d و q از لحظه قطع بار به بعد را بترتیب بصورت زیر نوشت.

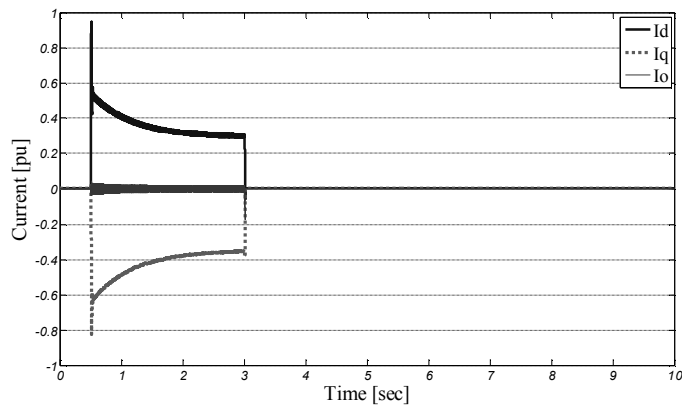
$$v_a = U \cdot \sin(\omega t - \delta) - i_{q0} \cdot [L_q - (L_q - L_q'') \cdot e^{\frac{-t}{T_q''}}] \cdot \cos(\omega t) \quad (۶-۶)$$

$$- i_{d0} \cdot [L_d - (L_d - L_d') \cdot e^{\frac{-t}{T_d'}} - (L_d' - L_d'') \cdot e^{\frac{-t}{T_d''}}] \cdot \sin(\omega t)$$

$$v_d = -\psi_q = U \cdot \sin \delta + i_{q0} \cdot [L_q - (L_q - L_q'') \cdot e^{\frac{-t}{T_q''}}] \quad (۷-۶)$$

$$v_q = \psi_d = -U \cdot \cos \delta + i_{d0} \cdot [L_d - (L_d - L_d') \cdot e^{\frac{-t}{T_d'}} - (L_d' - L_d'') \cdot e^{\frac{-t}{T_d''}}] \quad (۸-۶)$$

مقادیر i_{q0} و i_{d0} به ترتیب جریان‌های محورهای d و q درست در لحظه قبل از قطع بار می‌باشند. شکل (۶-۱۲) جریان‌های d و q را هنگام قطع و وصل بار فوق‌الذکر نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مقادیر جریان‌های i_{d0} و i_{q0} برای این بار بترتیب برابر 0.3 و -0.36 پریونیت می‌باشند. بایستی توجه نمود که علامت منفی در جریان محور عرضی بدلیل نوع بار و تعریف خاص ماتریس تبدیل پارک می‌باشد.



شکل ۶-۱۲: جریان‌های d و q هنگام قطع و وصل بار 1 pu و 0.8 پس فاز

از آنجائیکه ولتاژ ترمینال ژنراتور با رابطه‌ای نسبتاً پیچیده، به پارامترهای دینامیکی ماشین مرتبط است، انطباق کامل منحنی فوق بر منحنی ولتاژ بدست آمده از آزمایش، با روش‌های معمولی عملاً ممکن نبوده و یا بسیار دشوار است. یک تکنیک برای حل این مشکل در سال ۲۰۰۲ بکار گرفته شد [30]. در این روش، با انتخاب مناسب زاویه اولیه تبدیل پارک می‌توان i_{d0} یا i_{q0} را صفر کرد و بدین ترتیب یکی از عبارات‌های حاوی i_{d0} یا i_{q0} معادله (۶-۶) را حذف نمود. هنگامیکه i_{q0} صفر شود، رابطه (۶-۶) به شکل ساده‌تر رابطه (۹-۶) درمی‌آید و در صورتی که i_{d0} صفر شود، رابطه فوق به صورت رابطه (۱۰-۶) می‌شود.

$$v_a = U \cdot \sin(\omega t - \delta) - i_{d0} \cdot [L_d - (L_d - L'_d) \cdot e^{\frac{-t}{T'_{d0}}} - (L'_d - L''_d) \cdot e^{\frac{-t}{T''_{d0}}}] \cdot \sin(\omega t) \quad (9-6)$$

$$v_a = U \cdot \sin(\omega t - \delta) - i_{q0} \cdot [L_q - (L_q - L''_q) \cdot e^{\frac{-t}{T''_{q0}}}] \cdot \cos(\omega t) \quad (10-6)$$

انطباق هر یک از معادلات فوق بر منحنی ولتاژ قطع بار ترمینال ماشین بسیار ساده‌تر از انطباق معادله (۶-۶) است. لذا برای بدست آوردن پارامترهای دینامیکی هر دو محور ماشین، لازم است دو آزمایش جداگانه قطع بار، یکی در محور d و دیگری در محور q انجام شود. آزمایش محور d با قطع یک بار خالص اندوکتیو که حاوی مولفه جریان اولیه محور d باشد، امکان‌پذیر است اما در محور q چنین امکانی وجود ندارد [30]. بنابراین آزمایش دوم در یک محور اختیاری انجام می‌گیرد.

پارامترهای محور d از آزمایش اول و رابطه (۶-۹) بدست آمده و سپس با استفاده از این پارامترها و رابطه (۶-۶) با آزمایش دوم، پارامترهای محور q تعیین می‌شوند. این روش نسبتاً پیچیده بوده و نیازمند انجام دو آزمایش جداگانه در شرایط خاص و با قطع بارهای خاص می‌باشد. در اینجا روشی بر مبنای الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود که با استفاده از آن می‌توان بطور مستقیم، پارامترهای منحنی معادله (۶-۶) را برای انطباق بر ولتاژ ترمینال ماشین پس از قطع هر بار اختیاری، محاسبه نمود.

۶-۲-۳. استخراج پارامترها با الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در این بخش، مشابه الگوریتم بکار رفته در آزمایش اتصال کوتاه سه‌فاز است که در بخش قبل توضیح داده شد. در این مساله، تابع هدف بصورت مجموع مجذور تفاضل بین ولتاژ نمونه برداری شده از آزمایش و رابطه (۶-۶) تعریف می‌شود. می‌نیمم کردن این تابع، منجر به می‌نیمم شدن مجموع خطای بین منحنی ولتاژ قطع بار شبیه‌سازی شده و منحنی ولتاژ محاسبه شده توسط پارامترهای بدست آمده در فاز a می‌شود. در اینجا برای دقت بیشتر، این تابع بصورت مجموع خطای مذکور در هر سه فاز a ، b و c تعریف شده است.

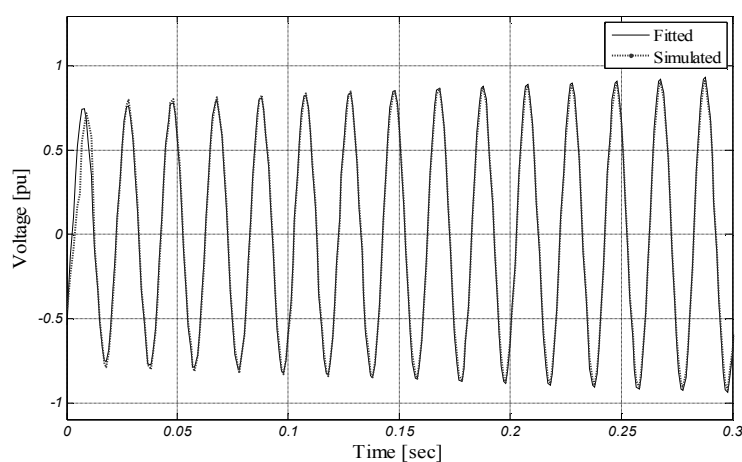
همانگونه که بیان شد، الگوریتم ژنتیک دارای ماهیت تصادفی بوده و بنابراین پاسخ‌های بدست آمده در هر اجرای الگوریتم، اندکی متفاوت خواهند بود. در اینجا برای رسیدن به جواب‌های دقیق‌تر، این الگوریتم سه بار اجرا شده و پارامترهای ماشین از میانگین آنها بدست آمده است. جدول (۶-۳) پارامترهای بدست آمده در هر اجرا و میانگین آنها را نشان می‌دهد.

رابطه (۶-۶) با هر کدام از مجموعه پارامترهای مختلف بدست آمده از الگوریتم ژنتیک با دقت بسیار بالایی نتایج عملی را دنبال می‌کند. شکل (۶-۱۳) چند سیکل اولیه از ولتاژ قطع بار ماشین را که از شبیه‌سازی بدست آمده است، نشان می‌دهد. در این شکل، منحنی حاصل از رابطه (۶-۶) و میانگین پارامترهای نشان داده شده در جدول (۶-۳) نیز رسم شده است. انطباق دقیق این دو منحنی، بیانگر دقت و صحت پارامترهای تعیین شده می‌باشد.

از آنجائیکه در سیستم پریونیت، مقادیر اندوکتانس‌ها و راکتانس‌های ماشین برابر است، پارامترهای نشان داده شده در جدول (۳-۶) را می‌توان با نتایج حاصل از آزمایش اتصال کوتاه سه‌فاز که در جدول (۲-۶) نشان داده شده است، مقایسه نمود. این مقایسه انطباق قابل قبولی بین نتایج هر یک از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

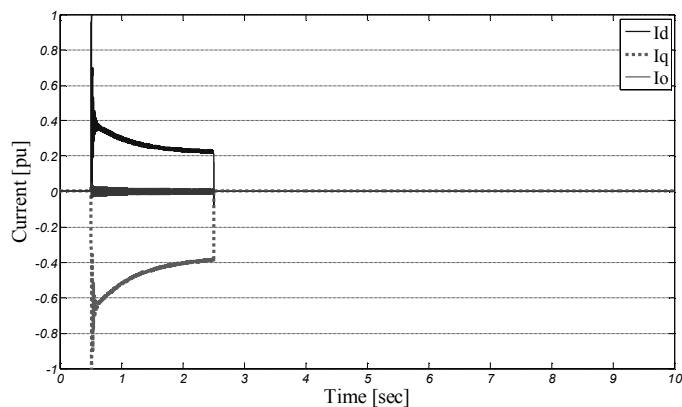
جدول ۳-۶: پارامترهای دینامیکی حاصل از قطع بار 1pu و 0.8 پس فاز و الگوریتم ژنتیک

Dynamic Parameters [pu]	I	II	III	Average
Ld	1.66	1.66	1.68	1.66
L'd	0.61	0.63	0.61	0.61
L''d	0.44	0.41	0.43	0.42
Lq	0.68	0.64	0.65	0.65
L''q	0.48	0.45	0.51	0.48
T'd0	4.82	4.9	4.88	4.86
T''d0	0.034	0.031	0.028	0.031
T''q0	9.64	10.38	9.31	9.77



شکل ۳-۶: ولتاژهای شبیه‌سازی شده و محاسبه شده فاز a هنگام قطع بار 1pu و 0.8 پس فاز

پارامترهای تعیین شده از آزمایش قطع بار و الگوریتم ژنتیک، مستقل از میزان و نوع بار قطع شده است، برای اطمینان بیشتر، پارامترهای دینامیکی ماشین براساس روش پیشنهادی و داده‌های اندازه‌گیری شده در قطع بارهای مختلف محاسبه شده و در تمامی موارد، نتایج مشابه جدول (۳-۶) بدست می‌آیند. به عنوان مثال برای بار 1 پریونیت و 0.6 پس‌فاز تنها تفاوت عمده در رابطه (۶-۶) مربوط به مقادیر جریان‌های محورهای d و q در لحظه قبل از قطع بار است. شکل (۱۴-۶) این جریان‌ها را هنگام قطع و وصل بار مذکور نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مقادیر جریان‌های i_{d0} و i_{q0} به ترتیب برابر 0.22 و -0.4 پریونیت می‌باشند. مشابه حالت قبلی، جدول (۴-۶) پارامترهای تعیین شده در سه مرحله اجرای برنامه و میانگین آنها را نشان می‌دهد که موید نتایج قبلی می‌باشند.



شکل ۱۴-۶: جریان‌های d و q هنگام قطع و وصل بار 1 pu و 0.6 پس‌فاز

جدول ۴-۶: پارامترهای دینامیکی حاصل از قطع بار 1 pu و 0.6 پس‌فاز و الگوریتم ژنتیک

Dynamic Parameters [pu]	I	II	III	Average
Ld	1.65	1.66	1.65	1.65
L'd	0.62	0.63	0.58	0.61
L''d	0.44	0.4	0.41	0.41
Lq	0.66	0.62	0.62	0.63
L''q	0.49	0.47	0.52	0.49
T'd0	4.77	4.85	4.86	4.82
T''d0	0.031	0.029	0.026	0.028
T''q0	9.72	9.98	9.43	9.71

فصل هفتم

روش‌های مدرن حالت ایستای

تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین

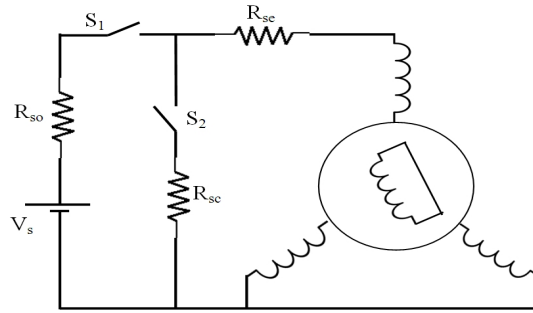
همانگونه که در فصل قبل بیان شد، روش‌های کلاسیک تقریب‌های نسبتاً مناسبی از پارامترهای دینامیکی ماشین ارائه می‌دهند اما تمام پارامترهای ماشین با این روش‌ها قابل تعیین نبوده و با هر یک از آنها تنها تعدادی از پارامترهای ماشین بدست می‌آیند. روش‌های جدید قادرند تمام پارامترهای دینامیکی ماشین را با یک آزمایش بدست آورند. این روش‌ها به دو دسته روش‌های حالت ایستا و روش‌های در حین کار تقسیم می‌شوند که در این فصل به بررسی روش‌های حالت ایستا می‌پردازیم. از آنجائیکه در این روش‌ها ماشین در حالت سکون قرار دارد، در پارامترهای شناسایی شده، عوامل غیرخطی و نیروهای الکترو دینامیکی و مکانیکی لحاظ نشده و اغلب احتیاج به تصحیح دارند. همچنین عدم انجام آزمایش در نقطه کار ماشین باعث خواهد شد تا حرارت سیم‌پیچ‌های آن بین 60 تا 100 درجه سانتیگراد از شرایط کار عادی ماشین پایین‌تر باشد. لذا تصحیح دیگری در مقادیر پارامترها بدلیل تغییر مقاومت‌ها نیز ضروری است. البته این آزمایش‌ها کاملاً غیر مخرب بوده و انجام آن نسبتاً آسان است. آزمایش‌های حالت ایستا شامل روش‌های حوزه زمان و روش‌های حوزه فرکانس می‌باشند. در این فصل آزمایش افول جریان مستقیم بعنوان یکی از روش‌های ایستای حوزه زمان و آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا بعنوان روش ایستای حوزه فرکانس، بررسی و شبیه‌سازی می‌شوند.

۱-۷. آزمایش افول جریان مستقیم^۱

اعمال یک ولتاژ مستقیم به استاتور ماشین در حالتی که رتور آن ساکن است، منجر به ایجاد یک جریان DC در استاتور خواهد شد. چگونگی افت این جریان پس از خروج منبع ولتاژ از مدار استاتور، می‌تواند بیانگر رفتار دینامیکی ماشین باشد. براین اساس می‌توان پارامترهای دینامیکی ماشین را با پردازش اطلاعات مربوط به افول جریان مستقیم در سیم‌پیچ‌های استاتور، استخراج نمود. محل قرار گرفتن رتور نسبت به شار مستقیم درون ماشین، یکی از عوامل تاثیرگذار بر افول جریان در ماشین‌های قطب برجسته است. آزمایش افول جریان مستقیم در دو محور طولی و عرضی ماشین بطور جداگانه انجام شده و از هر یک از آنها، پارامترهای مربوط به همان محور بدست می‌آیند.

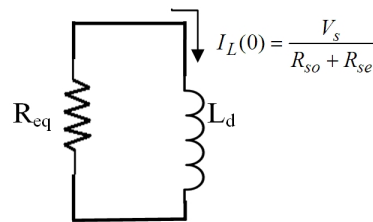
در این آزمایش منبع ولتاژ DC مطابق شکل (۱-۷) به استاتور ماشین اعمال می‌شود. البته این ولتاژ می‌تواند تنها به یک فاز ماشین و یا دو فاز سری شده استاتور نیز اعمال شود اما آرایش نشان داده شده در شکل (۱-۷) به لحاظ درگیر شدن هر سه فاز استاتور در آزمایش، مناسب‌تر است. در آزمایش محور طولی، رتور بگونه‌ای قرار می‌گیرد که محور d آن در راستای شار ناشی از استاتور باشد اما در آزمایش محور عرضی، محور q رتور هم راستای شار استاتور است. سیم‌پیچ رتور بایستی اتصال کوتاه باشد اما گاهی این آزمایش در وضعیت اتصال باز رتور نیز انجام می‌شود. با بسته شدن کلید S_1 ، جریان فاز استاتور رو به افزایش می‌گذارد. پس از رسیدن جریان به مقدار دائمی خود، کلید S_1 باز شده و همزمان کلید S_2 بسته می‌شود. قطع منبع تغذیه و اتصال کوتاه شدن دو سر آن بطور همزمان، باعث افول نمایی جریان در سیم‌پیچ استاتور خواهد شد. این آزمایش کاملاً غیرمخرب بوده، مدار آن بسیار ساده و انجام آن به تجهیزات گرانیقیمت نیاز ندارد. اما از آنجائیکه سطح ولتاژ و جریان اعمال شده به استاتور نسبتاً پایین است، اثرات غیرخطی و اشباع در نتایج منظور نمی‌شود. از سوی دیگر، عدم چرخش ماشین باعث در نظر نگرفتن تاثیرات نیروهای الکترو دینامیکی و مکانیکی بر نتایج حاصله می‌شود. روابط حاکم بر افول جریان در استاتور با تحلیل مدار معادل ماشین مشخص می‌شود [31].

^۱ DC Decay Test



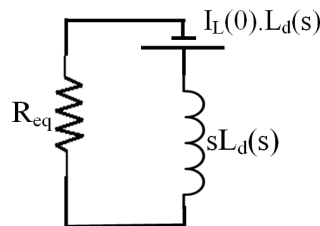
شکل ۷-۱: مدار ماشین سنکرون در آزمایش افول جریان مستقیم

مدار آزمایش در دوره افول جریان بصورت مدار ساده زیر خلاصه می‌شود. هنگامیکه شار استاتور در راستای محور طولی رتور قرار دارد، بیانگر اندوکتانس محور طولی ماشین بوده و مجموع $R_{eq} = R_{se} + R_{sc}$ کل مقاومت مدار در طی دوره افول جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲: مدار معادل ماشین در دوره افول جریان

این مدار در حوزه لاپلاس به شکل زیر تبدیل می‌شود.



شکل ۷-۳: مدار معادل ماشین در حوزه لاپلاس

استفاده از قانون ولتاژ (KVL) جریان این مدار را بصورت زیر در حوزه فرکانس پیش‌بینی می‌کند.

$$I_d(s) = \frac{I_L(0) \cdot L_d(s)}{R_{eq} + sL_d(s)} \quad (1-7)$$

با تقسیم این جریان بر مقدار حالت دائمی آن، جریان نرمال شده نزولی در استاتور بدست می‌آید.

$$I(s) = \frac{L_d(s)}{R_{eq} + sL_d(s)} \quad (2-7)$$

در این رابطه، $L_d(s)$ اندوکتانس عملیاتی محور طولی ماشین بوده و بصورت زیر بیان می‌شود.

$$L_d(s) = L_d \frac{(1+sT'_d)(1+sT''_d)}{(1+sT'_{do})(1+sT''_{do})} \quad (3-7)$$

جایگزینی رابطه (3-7) در (2-7) جریان را بصورت زیر نتیجه می‌دهد.

$$I(s) = \frac{L_d (1+sT'_d)(1+sT''_d)}{R_{eq}(1+sT'_{do})(1+sT''_{do}) + sL_d (1+sT'_d)(1+sT''_d)} \quad (4-7)$$

$$= \frac{s^2(L_d T'_d T''_d) + s(L_d T'_d + L_d T''_d) + L_d}{s^3(L_d T'_d T''_d) + s^2(R_{eq} T'_{do} T''_{do} + L_d T'_d + L_d T''_d) + s(R_{eq} T'_{do} + R_{eq} T''_{do} + L_d) + R_{eq}}$$

جریان بدست آمده را می‌توان با رابطه ساده‌ای به شکل زیر بیان کرد.

$$I(s) = \frac{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}{s^3 + \beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0} \quad (5-7)$$

طبق رابطه (4-7) ضرایب این معادله با روابط زیر به ثوابت زمانی ماشین مربوط می‌شوند.

$$\alpha_0 = \frac{1}{T'_d T''_d} \quad (6-7)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{T'_d} + \frac{1}{T''_d} \quad (7-7)$$

$$\beta_0 = \frac{R_{eq}}{L_d T'_d T''_d} \quad (8-7)$$

$$\beta_1 = \frac{R_{eq}(T'_{do} + T''_{do})}{L_d T'_d T''_d} + \frac{1}{T'_d T''_d} \quad (9-7)$$

$$\beta_2 = \frac{R_{eq} T'_{do} T''_{do}}{L_d T'_d T''_d} + \frac{1}{T'_d} + \frac{1}{T''_d} \quad (10-7)$$

از سوی دیگر، رابطه (5-7) را می‌توان بصورت زیر تجزیه کرد.

$$I(s) = \frac{A_1}{s + \tau_1} + \frac{A_2}{s + \tau_2} + \frac{A_3}{s + \tau_3} \quad (11-7)$$

لذا جریان استاتور در حوزه زمان بصورت زیر خواهد بود.

$$I(t) = A_1 e^{\tau_1 t} + A_2 e^{\tau_2 t} + A_3 e^{\tau_3 t} \quad (12-7)$$

با انطباق منحنی (12-7) بر جریان اندازه‌گیری شده از آزمایش افول جریان مستقیم در محور

طولی، ضرایب A_i و τ_i مشخص می‌شوند. تساوی روابط (11-7) و (5-7)، ضرایب α_i و β_i را بصورت

تابعی از A_i و τ_i نتیجه خواهد داد.

$$\alpha_0 = \frac{A_1}{\tau_2 \tau_3} + \frac{A_2}{\tau_1 \tau_3} + \frac{A_3}{\tau_1 \tau_2} \quad (13-7)$$

$$\alpha_1 = A_1 \left(\frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} \right) + A_2 \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_3} \right) + A_3 \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \quad (14-7)$$

$$\beta_0 = \frac{1}{\tau_1 \tau_2 \tau_3} \quad (15-7)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{\tau_1 \tau_2} + \frac{1}{\tau_2 \tau_3} + \frac{1}{\tau_1 \tau_3} \quad (16-7)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} \quad (17-7)$$

با مشخص شدن ضرایب α_i و β_i می‌توان ثوابت زمانی محور طولی ماشین را محاسبه کرد. روابط

(۶-۷) و (۷-۷) نشان می‌دهند که معادله درجه دوم زیر به ازای T'_d و T''_d برقرار است.

$$\alpha_0 x^2 - \alpha_1 x + 1 = 0 \quad (18-7)$$

از آنجائیکه همواره $T'_d > T''_d$ است، این مقادیر از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$T'_d = \frac{\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0}}{2\alpha_0} \quad (19-7)$$

$$T''_d = \frac{\alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0}}{2\alpha_0} \quad (20-7)$$

ضرایب T'_{do} و T''_{do} نیز به روش مشابهی از حل معادله درجه دوم زیر بدست می‌آیند.

$$\left(\frac{\beta_0}{\beta_2 - \alpha_1} \right) x^2 - \left(\frac{\beta_1 - \alpha_0}{\beta_2 - \alpha_1} \right) x + 1 = 0 \quad (21-7)$$

پس از محاسبه ثوابت زمانی محور طولی ماشین، می‌توان راکتانس‌های سنکرون، گذرا و زیرگذرای

این محور را نیز از روابط زیر تعیین کرد. راکتانس سنکرون با استفاده از رابطه (۷-۸) تعیین می‌شود.

$$X_d = \frac{\omega R_{eq}}{\beta_0 T'_d T''_d} \quad (22-7)$$

$$X'_d = X_d \frac{T'_d}{T'_{do}} \quad (23-7)$$

$$X''_d = X'_d \frac{T''_d}{T''_{do}} \quad (24-7)$$

بدین ترتیب کلیه پارامترهای محور طولی ماشین محاسبه خواهند شد. در مورد محور عرضی نیز،

هنگامیکه محور q رتور در راستای شار استاتور قرار دارد، می‌توان با استدلال مشابهی جریان نرمال

شده نزولی استاتور را در حوزه لاپلاس بصورت زیر بیان کرد.

$$I(s) = \frac{L_q(s)}{R_{eq} + sL_q(s)} \quad (25-7)$$

در این رابطه نیز $L_q(s)$ اندوکتانس عملیاتی محور عرضی ماشین بوده و بصورت زیر بیان می‌شود.

$$L_q(s) = L_q \frac{(1 + sT_q'')}{(1 + sT_{qo}'')} \quad (26-7)$$

جریان نزولی ماشین با جایگزینی رابطه (26-7) در رابطه (25-7) بدست می‌آید.

$$I(s) = \frac{L_q(1 + sT_q'')}{R_{eq}(1 + sT_{qo}'') + sL_q(1 + sT_q'')} = \frac{s(L_q T_q'') + L_q}{s^2(L_q T_q'') + s(R_{eq} T_{qo}'' + L_q) + R_{eq}} \quad (27-7)$$

مشابه محور طولی، این جریان را نیز می‌توان با رابطه ساده زیر بیان کرد.

$$I(s) = \frac{s + \alpha_0}{s^2 + \beta_1 s + \beta_0} \quad (28-7)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{T_q''} \quad (29-7)$$

$$\beta_0 = \frac{R_{eq}}{L_q T_q''} \quad (30-7)$$

$$\beta_1 = \frac{R_{eq} T_{qo}''}{L_q T_q''} + \frac{1}{T_q''} \quad (31-7)$$

رابطه (28-7) بصورت زیر نیز قابل بیان است.

$$I(s) = \frac{A_1}{s + \tau_1} + \frac{A_2}{s + \tau_2} \quad (32-7)$$

بنابراین در حوزه زمان، جریان استاتور تابع رابطه زیر خواهد بود.

$$I(t) = A_1 e^{\tau_1 t} + A_2 e^{\tau_2 t} \quad (33-7)$$

با انطباق منحنی (33-7) بر جریان اندازه‌گیری شده از آزمایش افول جریان مستقیم در محور

عرضی، ضرایب A_i و τ_i مشخص می‌شوند. تساوی روابط (32-7) و (28-7)، ضرایب α_i و β_i را بر

حسب A_i و τ_i نتیجه خواهد داد.

$$\alpha_0 = \frac{A_1}{\tau_2} + \frac{A_2}{\tau_1} \quad (34-7)$$

$$\beta_0 = \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \quad (35-7)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \quad (36-7)$$

با مشخص شدن ضرایب α_i و β_i می‌توان ثوابت زمانی و راکتانس‌های محور عرضی ماشین را محاسبه کرد.

$$T_q'' = \frac{1}{\alpha_0} \quad (37-7)$$

$$T_{qo}'' = \frac{\beta_1 - \alpha_0}{\beta_0} \quad (38-7)$$

$$X_q = \frac{\omega R_{eq}}{\beta_0 T_q''} \quad (39-7)$$

$$X_q'' = X_q \frac{T_q''}{T_{qo}''} \quad (40-7)$$

بدین ترتیب پارامترهای محور عرضی ماشین نیز تعیین می‌شوند. به نظر می‌رسد که افول جریان مستقیم، آزمایشی بسیار ساده بوده که تمامی پارامترهای ماشین را نتیجه می‌دهد. اما در واقع انجام این آزمایش در عمل با دشواری‌های خاص خود همراه است. مثلاً تعیین موقعیت دقیق محورهای طولی و عرضی برای رتور به سادگی امکان‌پذیر نبوده و نیازمند انجام آزمایش‌های خاصی روی ماشین است. همچنین مراحل مختلف برداشت اطلاعات آزمایش همراه با نویز فراوان است که در فرآیند انطباق منحنی و پردازش اطلاعات ایجاد مشکل می‌کند. همانند آزمایش‌های معرفی شده در فصول قبلی، بسیاری از مسائل مربوط به انجام عملی این آزمایش نیز با استفاده از روش شبیه‌سازی مرتفع خواهد شد.

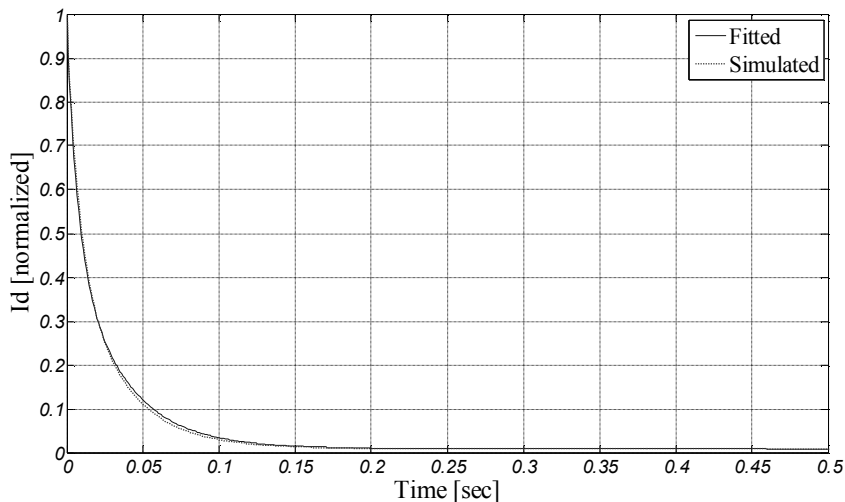
7-1-1. شبیه‌سازی آزمایش افول جریان مستقیم

شبیه‌سازی این آزمایش بسادگی با مدل معرفی شده در فصل چهارم برای عملکرد موتور ماشین انجام می‌شود. فازهای b و c در ترمینال ماشین به یکدیگر متصل شده و از طریق یک منبع تغذیه DC قابل کنترل به فاز a متصل می‌شوند. سیگنال کنترل این منبع در ابتدا برابر 5 ولت بوده و پس از 1 ثانیه ناگهان صفر می‌شود. مقدار منبع تغذیه رتور نیز برابر صفر قرار داده می‌شود تا بصورت اتصال کوتاه مدل شود. مدل دینامیک رتور از سیستم حذف شده و زاویه رتور برابر 0.671^{rad} قرار داده

می‌شود تا در راستای محور d قرار گیرد. صفر شدن منبع ولتاژ DC باعث افول جریان در استاتور خواهد شد. مقاومت کل مدار در حین افول جریان از مقاومت‌های خط انتقال و سیم‌پیچ استاتور تشکیل شده و بصورت زیر تعیین می‌شود.

$$R_{eq} = [0.5 + (0.5 \parallel 0.5)] + [0.199 + (0.199 \parallel 0.199)] = 0.4485 \Omega \quad (41-7)$$

شکل (۴-۷) منحنی نرمال شده جریان نزولی استاتور هنگامیکه رتور در محور d قرار دارد را نشان می‌دهد. در این شکل، منحنی منطبق شده حاصل از معادله (۷-۱۲) نیز ترسیم شده است. در فرآیند انطباق منحنی، مانند روش‌های فصل قبل از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.



شکل ۴-۷: جریان‌های نرمال محاسبه شده و شبیه سازی شده نزولی استاتور هنگامیکه رتور در محور d قرار دارد

ضرایب A_i و τ_i که از انطباق منحنی حاصل شده‌اند، در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۱-۷: پارامترهای انطباق منحنی برای محور طولی

A_1	A_2	A_3	τ_1	τ_2	τ_3
0.4942	0.4961	0.0097	0.0313	0.0078	4.5695

ضرایب α_i و β_i مطابق روابط بیان شده، بصورت زیر بدست می‌آیند.

جدول ۲-۷: پارامترهای واسطه برای محور طولی

α_0	α_1	β_0	β_1	β_2
57.0655	80.9790	896.3805	4131.1	160.3729

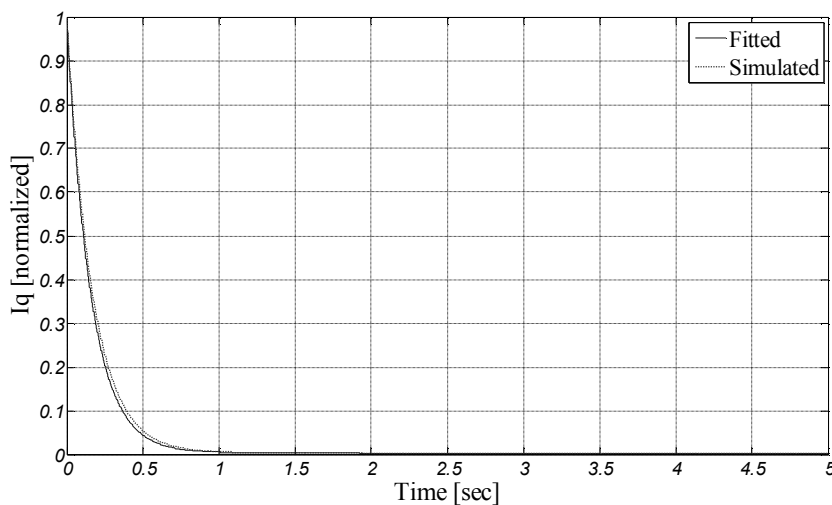
اکنون می‌توان پارامترهای دینامیکی محور d ماشین را محاسبه کرد.

جدول ۷-۳: پارامترهای دینامیکی محور طولی

X_d	X'_d	X''_d	T'_d	T''_d	T'_{do}	T''_{do}
8.97003	2.7881	1.7747	1.4065	0.01245	4.5253	0.0195

در جدول فوق مقادیر راکتانس‌ها بر حسب اهم و ثوابت زمانی بر حسب ثانیه هستند. چنانچه مقادیر راکتانس‌ها با مبنای $Z_{base}=5.4857\Omega$ پریونیت شوند، تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایش‌های قبلی خواهند داشت.

بطور مشابه در محور عرضی نیز می‌توان معادله (۷-۳۳) را بر منحنی جریان نزولی شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک منطبق کرد. این جریان‌ها در شکل (۷-۵) نشان داده شده است.



شکل ۷-۵: جریان‌های نرمال محاسبه شده و شبیه‌سازی شده نزولی استاتور هنگامیکه رتور در محور q قرار دارد

جدول زیر پارامترهای معادله (۷-۳۳) را برای انطباق بر جریان نزولی محور عرضی و ضرایب α_i و β_i را که از آنها حاصل شده‌اند، نشان می‌دهد.

جدول ۷-۴: پارامترهای منحنی و پارامترهای واسطه برای محور عرضی

A_1	A_2	τ_1	τ_2	α_0	β_0	β_1
0.0039	0.9961	17.9375	0.1683	0.0787	0.3312	5.9968

اکنون می‌توان پارامترهای دینامیکی محور q ماشین را محاسبه کرد.

جدول ۷-۵: پارامترهای دینامیکی محور عرضی

X_q	X''_q	T''_q	T''_{q0}
3.67282	2.61176	12.70618	17.8682

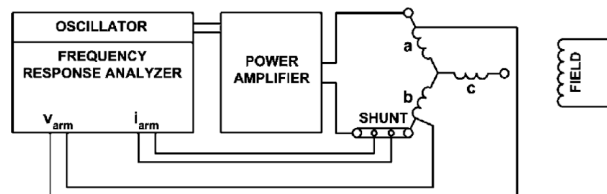
مقادیر راکتانس‌های جدول فوق نیز بر حسب اهم بوده و ثوابت زمانی با واحد ثانیه بیان شده‌اند. تقریباً هیچ یک از مشکلات مرتبط با آزمایش عملی افول جریان مستقیم، در مدل شبیه‌سازی شده آزمایش وجود ندارند. همچنین بکارگیری ابزار قدرتمندی مانند الگوریتم ژنتیک در فرآیند پردازش اطلاعات و انطباق منحنی، خطای نتایج حاصله را تا حد ممکن کاهش می‌دهد. در مجموع، شبیه‌سازی آزمایش افول جریان مستقیم، روشی نسبتاً دقیق و مطمئن بوده که به آسانی پارامترهای دینامیکی هر دو محور ماشین را نتیجه می‌دهد.

۷-۲. آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا^۱

گزارش کمیته IEEE منتشر شده در سال ۱۹۸۰، تئوری اساسی تخمین پارامترهای ماشین براساس تست پاسخ فرکانسی ماشین در حالت ایستا را بنا نهاده است [4]. در این گزارش پاسخ الکتریکی ماشین به یک اغتشاش کوچک بررسی شده است. اعمال اغتشاش از طریق کمیت‌های استاتور یا روتور حول نقطه کاری، پارامترهای توابع تبدیل اساسی ماشین را تحریک می‌نماید. اندازه‌گیری امپدانس‌های عملیاتی ماشین در یک طیف فرکانسی مشخص، می‌تواند پارامترهای دینامیکی ماشین را تعیین کند. علاوه بر این با تعیین پاسخ‌های دیگری از ماشین در همین طیف فرکانسی، می‌توان مدل‌های مراتب بالاتر ماشین را بدست آورد. شرح مبسوطی از این روش جهت تعیین مدل‌های مراتب مختلف ماشین در استاندارد IEEE std 512 بیان شده است [11]. در اینجا اصول این روش برای تعیین پارامترهای دینامیکی محورهای طولی و عرضی ماشین مرور می‌شود.

¹ Stand-Still Frequency Response Test (SSFR)

برای آزمایش محور طولی، سیم‌پیچ میدان رتور اتصال کوتاه شده و استاتور به منبع تغذیه متناوب با فرکانس متغیر مطابق شکل (۶-۷) متصل می‌شود. رتور به گونه‌ای ثابت می‌شود که محور d آن در راستای شار ناشی از استاتور باشد. ولتاژی با دامنه کم و در محدوده فرکانسی وسیع (حدود 0.001 تا 200 هرتز) توسط اسیلاتور به استاتور ماشین اعمال می‌شود. جریان ورودی به استاتور در هر فرکانس، اندازه‌گیری شده و اختلاف فاز آن با ولتاژ اعمالی، توسط تحلیل‌گر پاسخ فرکانسی مشخص می‌شود. علاوه بر این، نسبت دامنه ولتاژ به جریان استاتور نیز تعیین می‌شود. این دو کمیت بترتیب بیانگر زاویه و اندازه امپدانس عملیاتی آرمیچر ماشین (Z_{armd}) می‌باشند.



شکل ۶-۷: چگونگی اتصالات ماشین در آزمایش پاسخ فرکانسی محور طولی

از آنجائیکه دو فاز از استاتور در مدار قرار دارد، امپدانس عملیاتی محور طولی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$Z_d(s) = \frac{1}{2} Z_{armd}(s) \quad (42-7)$$

مشابه آزمایش افول جریان مستقیم، استفاده از سه فاز آرمیچر، نتیجه بهتری را خواهد داشت. در

این حالت امپدانس عملیاتی محور طولی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$Z_d(s) = \frac{2}{3} Z_{armd}(s) \quad (43-7)$$

اندوکتانس عملیاتی محور طولی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

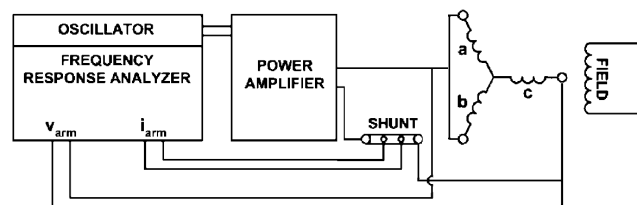
$$L_d(s) = \frac{Z_d(s) - R_a}{s} \quad (44-7)$$

که در آن R_a مقاومت هر فاز استاتور بوده و مقدار آن با برون‌یابی منحنی امپدانس عملیاتی محور طولی در فرکانس صفر مشخص می‌شود. از سوی دیگر، اندوکتانس عملیاتی محور طولی با رابطه زیر قابل بیان است.

$$L_d(s) = L_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do})} \quad (۴۵-۷)$$

برازش منحنی‌های جداگانه برای اندازه و فاز اندوکتانس بدست آمده از آزمایش و رابطه (۴۵-۷)، ثوابت زمانی و راکتانس سنکرون محور طولی را مشخص خواهد کرد. راکتانس‌های گذرا و زیرگذرا نیز از روابط (۲۳-۷) و (۲۴-۷) قابل محاسبه می‌باشند.

آزمایش مشابهی در محور عرضی جهت تعیین پارامترهای دینامیکی این محور نیز انجام می‌شود. در این حالت رتور به گونه‌ای قرار می‌گیرد که محور q آن در راستای شار استاتور باشد. چنانچه از هر سه فاز استاتور استفاده شود، نحوه اتصالات مطابق شکل (۷-۷) خواهد بود.



شکل ۷-۷: چگونگی اتصالات ماشین در آزمایش پاسخ فرکانسی محور عرضی

امپدانس عملیاتی آرمیچر با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان استاتور در همان محدوده فرکانسی قبلی مشخص می‌شود. امپدانس و اندوکتانس عملیاتی محور عرضی از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$Z_q(s) = \frac{2}{3} Z_{armq}(s) \quad (۴۶-۷)$$

$$L_q(s) = \frac{Z_q(s) - R_a}{s} \quad (۴۷-۷)$$

اندوکتانس عملیاتی محور عرضی با رابطه زیر قابل بیان است.

$$L_q(s) = L_q \frac{(1 + sT''_q)}{(1 + sT''_{qo})} \quad (۴۸-۷)$$

برازش منحنی در مورد محور عرضی نیز، پارامترهای دینامیکی این محور را نتیجه خواهد داد. البته گاهی برای مطالعات نوسانات زیرسنکرون، پایدارسازهای سیستم قدرت و... نیاز به مدل‌های دقیق‌تری از ماشین می‌باشد. در این موارد پارامترهای بیشتری برای ماشین فرض شده و مدار معادل‌های محورهای طولی و عرضی نیز پیچیده‌تر خواهند شد. آزمایش پاسخ فرکانسی، امکان تعیین این پارامترها را نیز فراهم می‌کند. توابع عملیاتی دیگری همچون امپدانس انتقالی آرمیچر به میدان

$(\Delta V_{arm}/\Delta i_{fd})$ ، امپدانس انتقالی میدان به آرمیچر $(\Delta e_{fd}/\Delta i_{arm})$ و تابع انتقال آرمیچر به میدان $(\Delta i_{arm}/\Delta i_{fd})$ در تعیین مدل‌های مراتب بالاتر ماشین لازم است که بایستی در آزمایش پاسخ فرکانسی تعیین شوند. اما برای تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین، اندازه‌گیری اندوکتانس‌های عملیاتی محورهای طولی و عرضی کفایت می‌کند. از این حیث، آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا ابزاری کارآمد در تعیین مدل‌های مراتب بالای ماشین است. اما از سوی دیگر، عدم آزمایش در نقطه کار از معایب عمده این روش محسوب می‌شود. بطور کلی می‌توان مزایا و معایب روش پاسخ فرکانسی حالت ایستا را بصورت زیر خلاصه کرد.

• مزایا:

- با توجه به اینکه آزمایش در سطح جریان بسیار پایینی انجام می‌شود، (حدود چند هزارم جریان نامی) احتمال صدمه دیدن ماشین در طی آزمایش بسیار کم است.
- امکان بدست آوردن مدل‌های مرتبه بالاتر ماشین جهت انجام مطالعات دینامیکی، مطالعه نوسانات زیرسنکرون، تنظیم پایدارسازهای سیستم قدرت و... فراهم می‌گردد.
- این آزمایش در محل کارخانه، نیروگاه و در حین تعمیرات واحد نیز قابل انجام است.

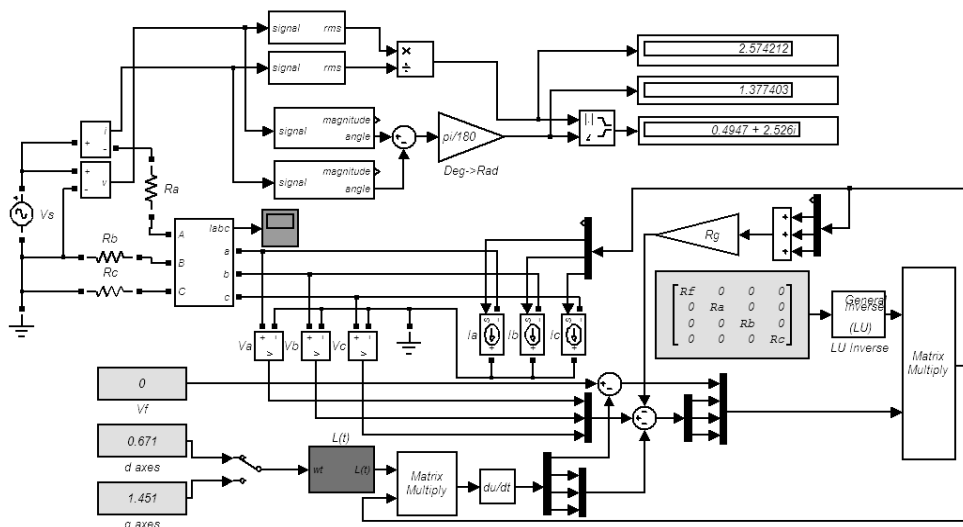
• معایب:

- بعلت پائین بودن سطح جریان‌های اعمالی و بالطبع پائین بودن سطح شار مغناطیسی ایجاد شده، مشخصه‌های بدست آمده مربوط به نقاط کار عادی ماشین نخواهد بود. بنابراین با دور بودن نقطه کار آزمایش از نقطه کار نامی عادی ماشین و همچنین قرار گرفتن نقطه کار عادی ماشین در ناحیه غیرخطی، نتایج بدست آمده باید برای نقطه کار نامی ماشین تصحیح شوند.
- جهت انجام آزمایش به تجهیزات پیشرفته و گران‌قیمت نظیر دستگاه تحلیل گر پاسخ فرکانسی و تقویت‌کننده توان با توان خروجی بالا و دقت قابل قبول نیاز است. دقت دستگاه‌های بکار گرفته شده جهت اندازه‌گیری نیز باید بالا باشد. بویژه در فرکانس‌های پائین که نسبت سینگال به نویز کم است، دقت بالای دستگاه از ضروریات اصلی محسوب می‌شود.

- بعلت ایستا بودن ماشین در طی مدت انجام آزمایش، اثر نیروهای گریز از مرکز در هنگام کار در استخراج پارامترهای ماشین لحاظ نمی‌گردد. این مورد می‌تواند منشأ خطا در تعیین پارامترهای ماشین باشد.
 - از آنجائیکه درجه حرارت سیم‌پیچ‌ها در طول آزمایش، 60 الی 80 درجه سانتیگراد پایین‌تر از شرایط عادی ماشین است، لذا باید عمل تصحیح مقاومت‌ها برای شرایط عادی انجام شود.
- مشابه سایر روش‌های بررسی شده، استفاده از روش شبیه‌سازی و مدل FE ماشین در مورد روش SSFR نیز چاره‌ساز است. در مدل شبیه‌سازی شده، بسیاری از خطاها و مشکلات مذکور وجود ندارد.

۷-۲-۱. شبیه‌سازی آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا

برای آزمایش SSFR از مدل حالت موتوری ماشین شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود. منبع ولتاژ متناوب مطابق شکل (۷-۸) بین فاز a و فازهای b و c قرار می‌گیرد. مدل دینامیک رتور از سیستم حذف شده و زاویه رتور برای آزمایش‌های محور طولی و عرضی بترتیب برابر 0.671^{rad} و 1.451^{rad} قرار می‌گیرد. ولتاژ تحریک برابر صفر شده تا بصورت اتصال کوتاه مدل شود. اندازه و زاویه اندوکتانس عملیاتی، از نسبت مقادیر موثر ولتاژ و جریان منبع و اختلاف فاز بین این دو موج، بدست می‌آیند. مشابه آزمایش قبلی، مقدار مقاومت مدار آزمایش برابر 0.4485^{Ω} خواهد بود.



شکل ۷-۸: مدل شبیه‌سازی شده ماشین سنکرون در آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا

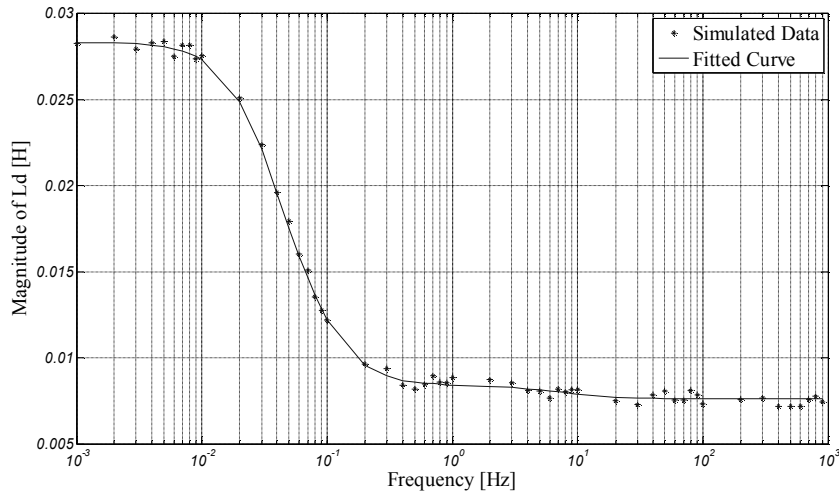
فصل هفتم: روش‌های مدرن حالت ایستای تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین

اندازه و زاویه امپدانس‌های عملیاتی در محورهای طولی و عرضی و در بازه فرکانسی 0.001 Hz تا 900 Hz از مدل شبیه‌سازی شده بدست آمده و در جدول زیر نشان داده شده است. اندوکتانس‌های عملیاتی هر محور نیز از روابط (۷-۴۴) و (۷-۴۷) محاسبه شده و در همین جدول آمده است.

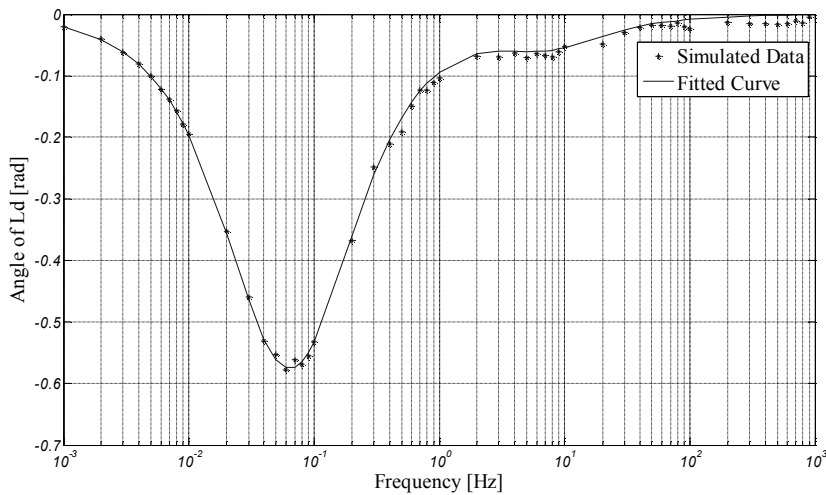
جدول ۷-۶: توابع عملیاتی بدست آمده از آزمایش پاسخ فرکانسی حالت ایستا

Frequency (Hz)	D Axes Test (Impedance)		L_d	Q Axes Test (Impedance)		L_q
	Magnitude(Ω)	Angle(rad)		Magnitude(Ω)	Angle(rad)	
0.001	0.4485	0.0004	0.0282 - 0.0006i	0.4485	0.0002	0.0116 - 0.0002i
0.002	0.4485	0.0008	0.0286 - 0.0011i	0.4485	0.0003	0.0115 - 0.0005i
0.003	0.4485	0.0012	0.0279 - 0.0017i	0.4485	0.0005	0.0112 - 0.0007i
0.004	0.4486	0.0016	0.0282 - 0.0023i	0.4485	0.0006	0.0112 - 0.0009i
0.005	0.4486	0.002	0.0282 - 0.0028i	0.4485	0.0008	0.0112 - 0.0011i
0.006	0.4486	0.0023	0.0273 - 0.0034i	0.4485	0.0009	0.0109 - 0.0013i
0.007	0.4487	0.0027	0.0279 - 0.0039i	0.4486	0.0011	0.0111 - 0.0015i
0.008	0.4487	0.0031	0.0278 - 0.0044i	0.4486	0.0012	0.0107 - 0.0016i
0.009	0.4488	0.0034	0.0269 - 0.0049i	0.4486	0.0014	0.0108 - 0.0018i
0.01	0.4488	0.0038	0.0270 - 0.0053i	0.4486	0.0015	0.0107 - 0.0019i
0.02	0.4496	0.0066	0.0235 - 0.0087i	0.4488	0.0025	0.0089 - 0.0024i
0.03	0.4504	0.0084	0.0200 - 0.0099i	0.4489	0.0035	0.0084 - 0.0022i
0.04	0.451	0.0094	0.0169 - 0.0099i	0.449	0.0043	0.0078 - 0.0019i
0.05	0.4515	0.0106	0.0152 - 0.0094i	0.449	0.0052	0.0074 - 0.0016i
0.06	0.4518	0.0112	0.0134 - 0.0087i	0.449	0.006	0.0071 - 0.0014i
0.07	0.4521	0.0124	0.0127 - 0.0080i	0.449	0.0071	0.0072 - 0.0012i
0.08	0.4522	0.0127	0.0114 - 0.0073i	0.4491	0.0081	0.0072 - 0.0011i
0.09	0.4523	0.0135	0.0108 - 0.0067i	0.4491	0.0089	0.0071 - 0.0010i
0.1	0.4524	0.0146	0.0105 - 0.0062i	0.4491	0.0099	0.0070 - 0.0009i
0.2	0.453	0.0249	0.0090 - 0.0035i	0.4492	0.0192	0.0069 - 0.0005i
0.3	0.4532	0.0378	0.0091 - 0.0023i	0.4493	0.0287	0.0068 - 0.0004i
0.4	0.4534	0.0455	0.0082 - 0.0018i	0.4494	0.0379	0.0068 - 0.0002i
0.5	0.4541	0.0555	0.0080 - 0.0015i	0.4498	0.0487	0.0070 - 0.0002i
0.6	0.4543	0.0692	0.0083 - 0.0013i	0.4499	0.0574	0.0068 - 0.0002i
0.7	0.455	0.0856	0.0088 - 0.0011i	0.4502	0.0678	0.0069 - 0.0002i
0.8	0.4558	0.0938	0.0085 - 0.0010i	0.4506	0.0765	0.0069 - 0.0002i
0.9	0.4564	0.1054	0.0085 - 0.0009i	0.4511	0.0867	0.0069 - 0.0002i
1	0.4576	0.1209	0.0088 - 0.0009i	0.4512	0.0954	0.0068 - 0.0001i
2	0.4688	0.2347	0.0087 - 0.0006i	0.458	0.1907	0.0069 - 0.0001i
3	0.4868	0.3355	0.0085 - 0.0006i	0.4678	0.2798	0.0069 - 0.0001i
4	0.5041	0.4152	0.0081 - 0.0005i	0.4807	0.3613	0.0068 - 0.0000i
5	0.5304	0.4961	0.0080 - 0.0006i	0.4957	0.437	0.0067 - 0.0000i
6	0.549	0.5535	0.0077 - 0.0005i	0.5195	0.5225	0.0069 - 0.0000i
7	0.5936	0.6502	0.0082 - 0.0005i	0.5398	0.5831	0.0068 - 0.0000i
8	0.6228	0.6997	0.0080 - 0.0006i	0.5589	0.6357	0.0066 - 0.0000i
9	0.6614	0.7668	0.0081 - 0.0005i	0.5941	0.7068	0.0068 - 0.0001i
10	0.6973	0.8207	0.0081 - 0.0004i	0.6213	0.7572	0.0068 - 0.0000i
20	1.06	1.0857	0.0075 - 0.0004i	0.9799	1.088	0.0069 - 0.0001i
30	1.4492	1.2261	0.0072 - 0.0002i	1.3932	1.2363	0.0070 - 0.0000i
40	2.0276	1.3265	0.0078 - 0.0002i	1.7872	1.3127	0.0069 - 0.0000i
50	2.5742	1.3774	0.0080 - 0.0001i	2.1896	1.3629	0.0068 - 0.0000i
60	2.8729	1.3968	0.0075 - 0.0001i	2.6379	1.3988	0.0069 - 0.0000i
70	3.3427	1.4176	0.0075 - 0.0001i	3.1071	1.4219	0.0070 - 0.0000i
80	4.0979	1.4465	0.0081 - 0.0001i	3.3908	1.4301	0.0067 - 0.0001i
90	4.4571	1.4497	0.0078 - 0.0002i	3.9768	1.4575	0.0070 - 0.0000i
100	4.6252	1.4497	0.0073 - 0.0002i	4.3936	1.4671	0.0070 - 0.0000i
200	9.516	1.5105	0.0076 - 0.0001i	8.535	1.5173	0.0068 - 0.0000i
300	14.4801	1.5249	0.0077 - 0.0001i	12.8426	1.5292	0.0068 - 0.0000i
400	18.0438	1.5303	0.0072 - 0.0001i	17.1965	1.5405	0.0068 - 0.0000i
500	22.505	1.5338	0.0072 - 0.0001i	21.3143	1.5475	0.0068 - 0.0000i
600	27.0558	1.5394	0.0072 - 0.0001i	24.9209	1.5464	0.0066 - 0.0000i
700	33.2317	1.5471	0.0076 - 0.0001i	30.7238	1.55	0.0070 - 0.0000i
800	39.0048	1.5449	0.0078 - 0.0001i	33.5017	1.5569	0.0067 - 0.0000i
900	42.0174	1.5563	0.0074 - 0.0000i	38.6913	1.5553	0.0068 - 0.0000i

شکل‌های (۷-۹) و (۷-۱۰) اندازه و فاز اندوکتانس عملیاتی محور طولی را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، نمودار حاصل از برازش منحنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک نیز رسم شده است.



شکل ۷-۹: مقادیر شبیه سازی شده و محاسبه شده برای اندازه اندوکتانس عملیاتی محور طولی



شکل ۷-۱۰: مقادیر شبیه سازی شده و محاسبه شده برای زاویه اندوکتانس عملیاتی محور طولی

پارامترهای حاصل از انطباق منحنی‌های فوق، مطابق جدول زیر می‌باشد.

جدول ۷-۷: پارامترهای انطباق منحنی در محور طولی

L_d	T'_d	T''_d	T'_{do}	T''_{do}
0.0283	1.361	0.0214	4.582	0.0228

در این جدول، ثوابت زمانی بر حسب ثانیه و اندوکتانس L_d بر حسب هنری است. مقدار مبنای اندوکتانس در استاتور بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$L_{base} = \frac{Z_{base}}{2\pi f} = \frac{5.4857}{100\pi} = 0.01746 \quad (49-7)$$

از آنجائیکه مقادیر اندوکتانس و راکتانس در سیستم پریونیت برابر هستند، راکتانس سنکرون ماشین در محور طولی بصورت زیر تعیین می‌شود.

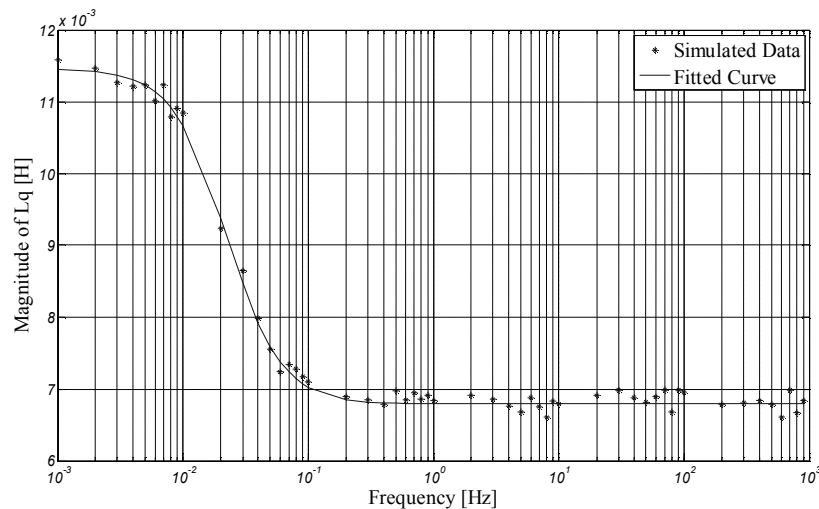
$$X_d = L_d = \frac{0.0283}{0.01746} = 1.64^{pu} \quad (50-7)$$

با محاسبه راکتانس‌های گذرا و زیرگذرای ماشین از روابط (۲۳-۷) و (۲۴-۷) جدول (۷-۷) بصورت زیر کامل می‌شود.

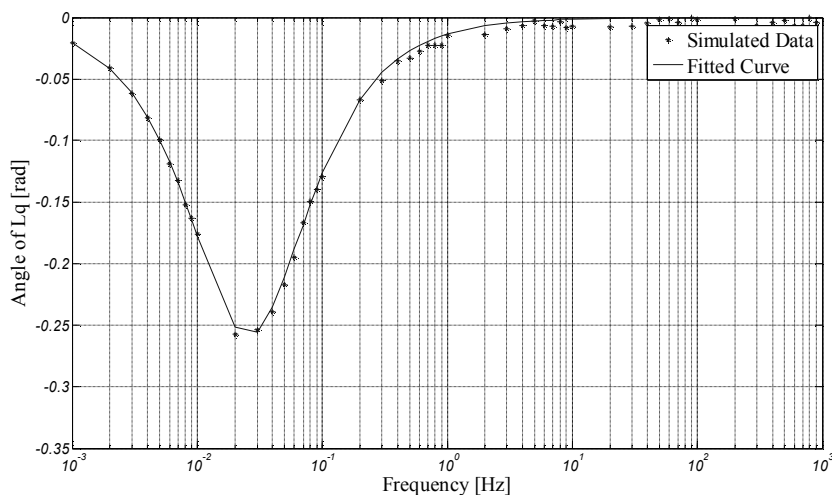
جدول ۷-۸: پارامترهای دینامیکی محور طولی

X_d	X'_d	X''_d	T'_d	T''_d	T'_{do}	T''_{do}
1.64	0.487	0.457	1.361	0.0214	4.582	0.0228

بطور مشابه، نتایج حاصل از آزمایش SSFR در محور عرضی و منحنی‌های انطباق یافته بر اندازه و زاویه اندوکتانس این محور نیز در شکل‌های (۷-۱۱) و (۷-۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۷-۱۱: مقادیر شبیه سازی شده و محاسبه شده برای اندازه اندوکتانس عملیاتی محور عرضی



شکل ۷-۱۲: مقادیر شبیه سازی شده و محاسبه شده برای زاویه اندوکتانس عملیاتی محور عرضی

پارامترهای حاصل از انطباق منحنی در این محور نیز، مطابق جدول زیر می‌باشد.

جدول ۷-۹: پارامترهای انطباق منحنی در محور عرضی

L_q	T''_q	T''_{qo}
0.01146	4.813	8.092

مشابه محور طولی، با پریونیت کردن اندوکتانس و محاسبه راکتانس زیر گذرا، جدول (۷-۹) بصورت

زیر کامل می‌شود.

جدول ۷-۱۰: پارامترهای دینامیکی محور عرضی

X_q	X''_q	T''_q	T''_{qo}
0.666	0.396	4.813	8.092

مقایسه نتایج حاصل از آزمایش SSFR و آزمایش افول جریان مستقیم، انطباق مناسبی را نشان می‌دهد. دقت هر دو روش با شبیه‌سازی آزمایش‌ها بیشتر شده و مشکلات تکنیکی و عملی آزمایش کاهش یافته است. البته ایستایی ماشین در حین آزمایش و دامنه پایین سیگنال‌های اعمالی، از عوامل عمده خطا در هر دو روش محسوب می‌شود.

فصل هشتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۸-۱. نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، روش‌های متداول جهت تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین سنکرون، با شبیه‌سازی یک مدل دقیق از ماشین، بررسی شدند. روش‌های مدرن قادر به تعیین تمامی پارامترهای دینامیکی ماشین هستند اما با هر یک از روش‌های کلاسیک، تنها تعدادی از پارامترها بدست می‌آیند. با این وجود، مقایسه پارامترهای بدست آمده از روش‌های مختلف، انطباق مناسبی را نشان می‌دهد. این پارامترها در جدول زیر نشان داده شده‌اند.

جدول ۸-۱: پارامترهای دینامیکی بدست آمده از روش‌های مختلف

Dynamic Parameters	OCC & SCC	Slip Test	Reluctance Motor	Maximum Lag Current	Three Phase Short Circuit	Load Rejection	DC Decay	SSFR
X_d	1.62	1.63	-	-	1.64	1.66	1.63	1.64
X'_d	-	-	-	-	0.64	0.61	0.51	0.49
X''_d	-	-	-	-	0.58	0.42	0.32	0.45
X_q	-	0.66	-	0.65	-	0.65	0.67	0.66
X''_q	-	-	-	-	0.53	0.48	0.47	0.4
T'_d	-	-	-	-	1.64	-	1.4	1.36
T''_d	-	-	-	-	0.044	-	0.012	0.021
T'_{do}	-	-	-	-	-	4.86	4.5	4.58
T''_{do}	-	-	-	-	-	0.031	0.019	0.022
T''_q	-	-	-	-	-	-	12.7	4.8
T'''_{qo}	-	-	-	-	-	9.77	17.8	8.1
X_d/X_q	-	-	2.33	-	-	-	-	-

بعضی از این پارامترها مانند راکتانس‌های سنکرون دارای اهمیت بیشتری در تحلیل عملکرد ماشین بوده و برخی دیگر مانند ثوابت زمانی زیرگذرا از اهمیت کمتری برخوردارند. البته تعیین پارامترهای با اهمیت کمتر، مشکل‌تر بوده و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مختلف، مقادیر تقریباً متفاوتی را برای این پارامترها نشان می‌دهند. تعیین دقیق پارامترهای با گذرای بیشتر نیازمند تحریک بیشتر مودهای دینامیکی ماشین است. در روش‌های مدرن بدلیل پایین بودن دامنه سیگنال اغتشاشی، مودهای دینامیکی ماشین بطور کامل تحریک نمی‌شوند. مقادیر محسوس تفاوت در

پارامترهای گذرا و بویژه ثوابت زمانی زیرگذرا، ضعف روش‌های مدرن را در تعیین این پارامترها نشان می‌دهد.

نکته قابل توجه در همه روش‌های بررسی شده مربوط به عدم اطمینان از یکتایی پاسخ نهایی است. تمام این روش‌ها به نوعی درگیر مساله برازش منحنی می‌باشند. روش‌های سنتی همچون تجزیه گرافیکی برای حل مساله برازش منحنی، اغلب به جواب یکتایی می‌رسند. اما روش‌های هوشمند و پیشرفته‌ای همچون الگوریتم ژنتیک، امکان جستجوی بسیاری از پاسخ‌های احتمالی مساله را داشته و معمولاً قادر به تعیین پاسخ‌های متفاوت ممکن در مسائل مطرح شده می‌باشند. این پاسخ‌ها در مورد روش اتصال کوتاه سه فاز، تعیین شده و به تفصیل بررسی شدند. سایر روش‌های مطرح شده نیز استعداد دارا بودن پاسخ‌های متفاوت در برازش منحنی را دارند. زیرا بطور کلی در فرآیند برازش منحنی، تعداد زیادی مجهول از حل تنها یک معادله بدست می‌آیند. لذا می‌توان اینطور نتیجه‌گیری کرد که پاسخ‌های حاصل از روش‌های درگیر با برازش منحنی، هیچ‌گاه به تنهایی قابل اطمینان نبوده و همواره صحت آنها مورد تردید است.

از سوی دیگر روش‌های بیان شده برای تعیین راکتانس‌های سنکرون، با مشکل برازش منحنی مواجه نبوده و مقایسه نتایج آنها دقت تحسین برانگیزی را نشان می‌دهد. مشخص بودن راکتانس‌های سنکرون می‌تواند تعداد متغیرهای مستقل در مساله برازش منحنی سایر روش‌ها را کاهش داده و تاثیر شگرفی در جهت یکتایی پاسخ داشته باشد. بر این اساس پیشنهاد می‌شود برای تعیین پارامترهای دینامیکی ماشین سنکرون توسط هر یک از روش‌های مدرن یا کلاسیک، ابتدا راکتانس‌های طولی و عرضی آن توسط یکی از روش‌های لغزش، موتور رلوکتانسی و یا جریان پس‌فاز ماکزیمم، تعیین شده و در فرآیند برازش منحنی آزمایش اصلی، مقادیر راکتانس‌های سنکرون ثابت فرض شوند. این راهکار در مورد روش‌های بررسی شده در این پایان‌نامه، بدون آنکه ذکر شود بکار گرفته شد و نتیجه آن یکتایی پاسخ این آزمایش‌ها می‌باشد. در غیر اینصورت آزمایش‌هایی همچون افول جریان مستقیم، به شدت با مشکل عدم یکتایی پاسخ برازش منحنی روبرو بودند.

۸-۲. پیشنهاداتی جهت تکمیل و ادامه کار

روش‌های مدرن در حین کار، گروهی از روش‌های پیشرفته در تخمین پارامترهای ماشین بوده که در این پایان‌نامه بررسی نشده‌اند. این روش‌ها بر مدل‌سازی ماشین و سپس شناسایی مدل استوار است. بطور کلی سه روش عمده برای مدل‌سازی ماشین مطرح می‌شود:

الف) مدل‌سازی تحلیلی یا جعبه سفید^۱:

در این نوع مدل‌سازی رابطه بین ورودی و خروجی با استفاده از قوانین فیزیکی حاکم بر سیستم و روابط المان‌های آن بدست می‌آید. پارامترهای سیستم را از طریق این روش نمی‌توان بدست آورد.

ب) مدل‌سازی آزمایشی یا جعبه سیاه^۲:

در این روش برای بدست آوردن رابطه بین ورودی و خروجی از اطلاعات بدست آمده از آزمایش استفاده می‌کنند. به عبارت دیگر در این روش، سیستم شناسایی می‌شود اما پارامترهای شناسایی شده معنای مشخصی ندارند، بلکه فقط روابط ورودی-خروجی سیستم را مشخص می‌کنند.

ج) مدل‌سازی ترکیبی یا جعبه خاکستری^۳:

این نوع مدل‌سازی دارای دو قسمت مجزا می‌باشد. ابتدا ساختار و مدلی از روش تحلیلی و با استفاده از قوانین فیزیکی برای سیستم تعیین می‌شود. سپس با استفاده از آزمایش، پارامترهای ساختار تعریف شده بدست می‌آیند.

روش مدل‌سازی ترکیبی در ارتباط با ماشین سنکرون بسیار رایج بوده و پارامترهای مدل با آزمایش‌های مدرن در حین کار تعیین می‌شوند. در این آزمایش‌ها با اعمال یک سیگنال اغتشاشی به ماشین و بکارگیری روش‌های شناسایی سیستم، پارامترهای مدل که شامل برخی پارامترهای دینامیکی ماشین نیز می‌باشند، تعیین می‌شود. مدل‌سازی جعبه سیاه ماشین سنکرون نیز بر روش‌های شناسایی سیستم استوار است که برخی پارامترهای دینامیکی ماشین در آن ظاهر می‌شوند. روش‌های متنوعی برای شناسایی سیستم‌ها ارائه شده که هر یک نیازمند مدل بخصوصی برای سیستم

¹ White Box

² Black Box

³ Gray Box

مورد مطالعه هستند. معروفترین این روش‌ها برای تخمین پارامترهای دینامیکی ماشین سنکرون شامل موارد زیر است [32-33]:

الف) روش‌های کلاسیک

شناسایی مبتنی بر پاسخ‌های ضربه و پله

شناسایی سیستم‌های پیوسته با استفاده از دیاگرام بد

ب) روش‌های مرسوم تخمین پارامتر

شناسایی سیستم به روش حداقل مربعات (LS)

شناسایی سیستم به روش حداقل مربعات وزن‌دهی شده (WLS)

شناسایی سیستم به روش متغیرهای کمکی (IV)

شناسایی سیستم به روش خطای پیشگویی (PEM)

شناسایی سیستم به روش بیشترین شباهت (ML)

ج) روش‌های شناسایی بازگشتی

روش حداقل مربعات بازگشتی (RLS)

روش شناسایی بازگشتی متغیرهای کمکی (RIV)

روش بازگشتی حداقل مربعات توسعه یافته (RELS)

روش شناسایی بیشترین شباهت بازگشتی (RML)

د) شناسایی با روش‌های محاسبات نرم

روش شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)

روش الگوریتم ژنتیک (GA)

روش منطق فازی (FL)

شناسایی مبتنی بر تبدیل موجک

در این پایان نامه، مدل تحلیلی یا جعبه سفید ماشین سنکرون با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود بدست آمده و در محیط MATLAB شبیه‌سازی شده است. استفاده از این مدل و روش‌های فوق می‌تواند منجر به شناسایی جعبه سیاه ماشین گردد. همواره می‌توان تابع انتقال ماشین را بگونه‌ای فرض کرد که برخی پارامترهای دینامیکی در آن ظاهر شوند. شناسایی جعبه سیاه ماشین و مشخص شدن تابع انتقال آن منجر به تعیین این پارامترهای دینامیکی خواهد شد. از سوی دیگر برای هریک از روش‌های شناسایی فوق، می‌توان مدل جعبه خاکستری بخصوصی از ماشین تعریف نمود که شامل برخی پارامترهای دینامیکی باشد. شبیه‌سازی روش‌های فوق و شناسایی این مدل‌ها نیز، پارامترهای ماشین را مشخص خواهد کرد. ضمن آنکه این شبیه‌سازی‌ها و شناسایی مدل‌های مختلف می‌تواند درک عمیق‌تری از عملکرد دینامیکی ماشین سنکرون را ارائه دهد.

ضمیمه

۱- مقادیر نامی و پریونیت ماشین

مقادیر نامی استاتور ماشین بصورت زیر است:

$$P_{rated} = 31500 \text{ W}$$

$$V_{rated} = 240 \text{ V}$$

بنابراین مقادیر پریونیت در سمت استاتور بصورت زیر تعیین می‌شوند:

$$P_{base} = \frac{31500}{3} = 10500 \text{ W}$$

$$V_{base} = 240 \text{ V}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{P_{base}} = 5.4857 \Omega$$

$$I_{base} = \frac{P_{base}}{V_{base}} = 43.75 \text{ A}$$

مقادیر نامی و پریونیت رتور نیز بصورت زیر هستند:

$$V_{base} = V_{rated} = 20 \text{ V}$$

$$Z_{base} = R_{rotor} = 3.7 \Omega$$

$$I_{base} = \frac{V_{base}}{Z_{base}} = 5.4 \text{ A}$$

۲- ماتریس اندوکتانس فضایی ماشین

ماتریس اندوکتانس فضایی ماشین بصورت زیر فرض می‌شود:

$$\mathbf{L}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} \\ L_{af} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bf} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cf} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

عناصر این ماتریس بر حسب هانری (H) مطابق محاسبات انجام شده در فصل سوم بصورت زیر است:

$$L_{ff} = 2.086471$$

$$L_{fa} = (0.200753095) \cos(2\theta + 1.83259581)$$

$$+ (0.000697599) \cos(10\theta + 2.879827959)$$

$$+ (0.000249698) \cos(14\theta - 2.8798369)$$

$$\begin{aligned}
L_{aa} &= (1.31137837 \times 10^{-2}) \\
&+ (0.005095737) \cos(4\theta - 2.61799383) \\
&+ (1.21262422 \times 10^{-4}) \cos(8\theta + 1.047204472) \\
&+ (3.53962868 \times 10^{-5}) \cos(12\theta - 1.57077744) \\
&+ (1.19904604 \times 10^{-5}) \cos(16\theta + 2.09447430) \\
&+ (5.84624347 \times 10^{-6}) \cos(20\theta + 2.61788131) \\
&+ (3.57955425 \times 10^{-6}) \cos(24\theta - 3.14145820) \\
&+ (8.38259564 \times 10^{-6}) \cos(28\theta + 0.523629389) \\
L_{ab} &= (-6.51601136 \times 10^{-3}) \\
&+ (0.005770421) \cos(4\theta + 1.63704569) \\
&+ (1.11941105 \times 10^{-4}) \cos(8\theta - 1.095897511) \\
&+ (3.12355783 \times 10^{-5}) \cos(12\theta + 0.602627888) \\
&+ (3.29090539 \times 10^{-5}) \cos(16\theta + 0.339920335) \\
&+ (1.54135268 \times 10^{-5}) \cos(20\theta - 1.90334556) \\
&+ (4.78508636 \times 10^{-6}) \cos(24\theta + 1.186959968) \\
&+ (2.38942623 \times 10^{-5}) \cos(28\theta - 1.22370229) \\
L_{bb}(\theta) &= L_{aa}(\theta - \frac{\pi}{3}) \\
L_{cc}(\theta) &= L_{aa}(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\
L_{bc}(\theta) &= L_{ab}(\theta - \frac{\pi}{3}) \\
L_{ca}(\theta) &= L_{ab}(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\
L_{bf}(\theta) &= L_{af}(\theta - \frac{\pi}{3}) \\
L_{cf}(\theta) &= L_{af}(\theta - \frac{2\pi}{3})
\end{aligned}$$

۳- مقاومت های رتور و استاتور

$$\begin{aligned}
R_a = R_b = R_c &= 0.199 \Omega \\
R_f &= 3.7 \Omega
\end{aligned}$$

۴- پارامترهای AVR

$$\begin{aligned}
T_f = 0.046, \quad K_p = 4.8, \quad T_{d1} = 0.345, \quad T_{d2} = 0.0067 \\
T_i = 13, \quad I_{\max} = 5.1, \quad I_{\min} = -5.1, \quad 0 < V_f < 1
\end{aligned}$$

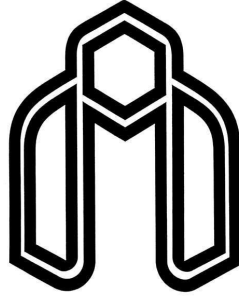
- [1] Park R.H., (1929) "Two-Reaction Theory of Synchronous Machines, generalized method of analysis, Part I", **AIEE Transactions**, 48, pp 716-730.
- [2] Kilgore L.A., (1931) "Calculation of Synchronous Machine Constants-Reactances and Time Constants Affecting Transient Characteristics", **AIEE Transactions**, 50, pp 1201-1213.
- [3] British Standard 4296, (1960) "Methods of Test for determining synchronous machine quantities".
- [4] IEEE Committee Report (Dandeno P., Chair), (1980) "Supplementary Definitions and Associated Test Methods for Obtaining Parameters for Synchronous Machine Stability Study Simulations", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-99, 4, pp 1625-1633.
- [5] Turner P.J., Reece A.B.J., Macdonald D.C., (1989) "The DC Decay Test for Determining Synchronous Machine Parameters: Measurement and Simulation", **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 4, 4, pp 616-623.
- [6] Coultres M.E., Watson W., (1981) "Synchronous Machine Models by Standstill Frequency Response Tests", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100, 4, pp 1480-1489.
- [7] Wamkeue R., Kamwa I., (2001) "Detailed Analysis of Load Rejection Test of Autonomous Synchronous Generator", Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, 1, pp 421-428, Shenyang, China.
- [8] Bortoni E.C., Jardini J.A., (1977) "Synchronous Machines Parameter Identification Using Load Rejection Test Data", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 4, 4.
- [9] Krause P.C., (1986) "**Analysis of Electric Machinery**", McGraw-Hill, New York.
- [10] IEEE Std 1110, (2002) "IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Application in Power System Stability Analysis".
- [11] IEEE Std 115-1995, (1995) "IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines".
- [12] Darabi A., Tindall C.E., (2002) "Brushless Exciter Modelling for Small Salient Pole Alternators using Finite Elements", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 17, 3, pp 306-312.
- [13] Darabi A., Tindall C.E., Ferguson S., (2004) "Finite-Element Time-Step Coupled Generator, Load, AVR and Brushless Exciter Modelling", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 19, 2, pp 258-264.
- [14] Darabi A., Tindall C.E., (2004) "Damper Cages in Genset Alternators: FE Simulation and Measurement", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 19, 1, pp 73-80.
- [15] Darabi A., (2005) "Auxiliary Windings, Supplying the AVR of a Brushless Synchronous Generator", Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1, P81-85.
- [16] Darabi A., Soleamani S.A., Hassannia A., (2008) "Fuzzy Based Digital Automatic Voltage Regulator of a Synchronous Generator with Unbalanced Loads", **American journal of Engineering and Applied Science**, 4, 4, pp 280-286.

- [17] Darabi A., Tindall C.E., (2002) "Analogue AVR model for use in real time transient simulation of small salient pole alternators", **IEE Conference Publication, Power Electronics, Machines and Drives**, 487, pp 451-455.
- [18] Gulliver J.S., (1990) "**Hydropower Engineering Handbook**", ISBN 007025-51932, McGraw-Hill, New York.
- [19] IEEE Committee Report, (1973) "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies", **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, PAS-92, 6, pp 1904-1915.
- [20] Hassannia A., Darabi A., Madadi A., (2008) "A Multi Variable Fuzzy-Based Frequency Control System for a Hydraulic Power Plant", Proceeding of International Conference on Electrical Engineering, O-083, Okinawa, Japan.
- [21] BimBhra P.S., (1986) "**Electrical Machinery: Theory, Performance and Application**", Khanna Publisher, Delhi.
- [22] Sugiura O., Akiyama Y., (1993) "Precise Method for Measuring Xd and Xq Based on Slip Test of Synchronous Machines", Conference Record of the 1993 IEEE, Industry Applications Society Annual Meeting, 1, pp 155-162.
- [23] Hassannia A., Darabi A., Alshamali M., (2009) "Estimation of Dynamic Parameters of a Synchronous Generator using Genetic Algorithm", **Accepted for Publication in IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, 4, 4.
- [24] Bruns R.A., Saunders R.M., (1955) "**Analysis of Feedback Control Systems**", McGraw-Hill Book Co., Inc.
- [25] Tindall C.E., Martin J.P., Morrow D.J., Calvert P.A.J., (1996) "Transient characteristics of small salient-pole alternators", **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 11, 3, pp 539-546.
- [26] IEEE Guide, (1983) "Test Procedures for Synchronous Machines", IEEE std. 115-1983.
- [27] Martin J.P., Tindall C.E., Morrow D.J., (1999) "Synchronous Machine Parameter Determination using the Sudden Short-circuit Axis Currents", **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 14, 3, pp 454-459.
- [28] Crappe M., (1984) "Experimental Determination of Large Turbo-generator Dynamic Parameters by Computer Aided Analysis", **CIGRE-84**, Paper 38-10.
- [29] Kamwa I., Viarouge P., Mahfoudi R., (1994) "Phenomenological models of large synchronous machines from short-circuit tests during commissioning-a classical/modern approach", **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 9, 1, pp 85-97.
- [30] Bortoni E.C., Jardini J.A., (2002) "Identification of synchronous machine parameters using load rejection test data", **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 17, 2, pp 242-247.
- [31] Sellschopp F.S., Arjona M.A., (2006) "DC decay test for estimating d-axis synchronous machine parameters: a two-transfer-function approach", **IEE Proceeding on Electrical Power Application**, 153, 1.
- [32] Eykhoff P., (1979) "**System Identification and Parameter Estimation**", John Wiley.
- [33] Ljung L., (1987) "**System Identification: Theory for User**", Prentice Hall.

Abstract:

Nowadays, dynamic studies of power systems are of great importance regarding to reliability evaluation in transient conditions. So, it is important to describe the power system elements by dynamic models. Synchronous generator is the most important elements of every power system which has an extended dynamic operating range. Two axes based modeling is the basic dynamic modeling of synchronous machines. Accuracy of every model depends on exact identification of synchronous machine dynamic parameters. In recent decades, identification methods of dynamic parameters were developed greatly. These methods always have been with difficult and expensive test on synchronous machines, either with approximations rising from test instrumentals. So, the researchers always work on decreasing the inaccuracy and cost of test to reach to more precise and cheaper results. In this thesis, the most important synchronous machines dynamic parameters identification approaches were investigated and some new algorithms were proposed to obtain the results more exactly. The desired test results were obtained with no approximation or extra cost by simulation an exact model of synchronous generator via MATLAB/Simulink. This model is based on space dependent harmonic inductances which have achieved from finite elements based synchronous machines analysis. This model presents a very actual like behavior.

Key words: Synchronous Machine, Dynamic Parameters, Finite Elements Method.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Evaluation of Dynamic Transient Parameters of a Synchronous Machine using FE

By:

Amir Hassannia

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

Thesis Submitted for the Degree of Master of Science

January 2009