

به نام خداوند بخشنده‌ی مهربان

۱۴۰۰/۰۷/۹ - ۲۰۳۲۱۰۰



۸۹۴۰۲۰۷۹

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

گروه برق

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد

عنوان:

تجزیه و تحلیل پایداری موتورهای الکتریکی شش فاز

Stability Analysis of Six- Phase Induction Motor

نگارش:

مهدی دیلمانی

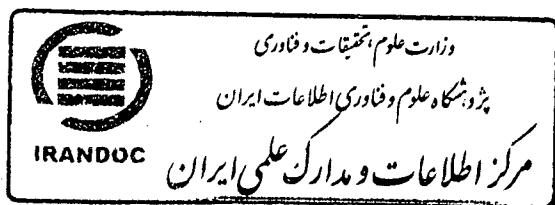
اساتید راهنما:

دکتر رضا کیانی نژاد، دکتر قدرت ا... سیف السادات

استاد مشاور:

دکتر سعید... مرتضوی

بهمن ۱۳۸۹



۱۶۰۰۷۹

۱۳۹۰/۳/۲۹

نسخه تعالی

(نتیجه ی ارزشیابی پایان نامه ی دوره ی کارشناسی ارشد)

بدینوسیله گواهی می گردد پایان نامه ی آقای مهدی دیلمانی دانشجوی رشته ی مهندسی برق -

قدرت از دانشکده ی مهندسی به شماره دانشجویی ۸۷۳۱۸۰۲ تحت عنوان :

تجزیه و تحلیل پایداری موتورهای الکتریکی شش فاز

جهت اخذ درجه ی کارشناسی ارشد در تاریخ ۱۳۸۹/۱۱/۱۰ توسط هیئت داوران مورد ارزشیابی قرار گرفت و با درجه ی عالی تصویب گردید.

۱- اعضای هیئت داوران:

مرتبه ی علمی امضاء

دانشیار

الف: استاد راهنمای اول: دکتر رضا کیانی نژاد

استاد راهنمای دوم: دکتر سید قدرت اله سیف السادات

استادیار

پ: استاد مشاور: دکتر سعیداله مرتضوی

استادیار

ج: داور ۱: دکتر محسن صنیعی

استادیار

د: داور ۲: دکتر کریم انصاری اصل

استادیار

ه: نماینده ی تحصیلات تکمیلی دانشگاه (استاد ناظر): دکتر یوسف صیفی کلویان

استادیار

۲- مدیر گروه: دکتر رضا کیانی نژاد

دانشیار

۳- معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر سید رضا علوی زارع

استادیار

۴- مدیر کل تحصیلات تکمیلی: دکتر رحیم پیغان

استاد



تقدیم به پدر و مادر عزیزم

که در تمام مراحل زندگی یار و یاورم بودند و هستند

با تشکر فراوان از ...

اساتید راهنما، دکتر کیانی نژاد و دکتر سیف السادات، که دلسوزانه مرا در تمام مراحل تحقیق یاری کردند و راهگشای مسیر بودند. همچنین استاد مشاور، دکتر مرتضوی، که هیچ محبتی را از من دریغ نداشتند. برای همه‌ی اساتید توفیق خدمت به این مملکت را آرزومندم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	چکیده
	مقدمه
	فصل اول:

مدلسازی موتور القایی شش فاز در حالت سالم و قطع فاز

۱	۱-۱- مدلسازی موتور القایی شش فاز سالم
۱	۱-۱-۱- معادلات ولتاژ موتور در فضای شش بعدی <i>qdz 6</i>
۱۱	۲-۱-۱- دستگاه مرجع استاتور
۱۲	۳-۱-۱- دستگاه مرجع سنکرون
۱۳	۴-۱-۱- محاسبه ی گشتاور موتور
۱۵	۵-۱-۱- موتور در دستگاه پریونیت
۱۶	۶-۱-۱- شار رتور به عنوان متغیر حالت
۱۸	۷-۱-۱- شبیه سازی موتور القایی شش فاز سالم
۲۰	۲-۱- مدل سیگنال کوچک موتور القایی شش فاز
۲۴	۳-۱- مدلسازی موتور شش فاز در حالت قطع فاز
۲۴	۱-۲-۱- تعریف فضای پنج بعدی جدید <i>qdz 5</i>
۲۹	۲-۲-۱- محاسبه ی گشتاور
۳۰	۳-۲-۱- محاسبه ی ولتاژ فازها
۳۳	۴-۲-۱- نتایج شبیه سازی
۳۵	۵-۲-۱- روشی برای تخمین زدن ولتاژ فازها

فصل دوم:

پایداری کنترل کننده های خطی و نقطه ی تعادل موتور القایی شش فاز

۳۹	۱-۲- مقدمه ای بر پایداری
۴۰	۱-۱-۲- سیستم غیرخطی و خطی و نقطه ی تعادل
۴۱	۲-۱-۲- تعاریف پایداری
۴۵	۳-۱-۲- دو روش لیپانوف
۴۷	۲-۲- پایداری کنترل کننده های خطی
۴۸	۱-۲-۲- کنترل حلقه باز ولتاژ/فرکانس
۵۴	۲-۲-۲- کنترل سرعت با تنظیم لغزش
۶۱	۳-۲-۲- کنترل سرعت با کنترل شار و گشتاور
۶۲	۳-۲- پایداری نقطه ی تعادل موتور القایی شش فاز

- ۶۳ ۱-۳-۲- نقطه ی تعادل موتور وقتی ورودی صفر است
- ۶۴ ۲-۳-۲- نقطه‌ی تعادل موتور وقتی موتور کم بار است

فصل سوم

پایداری کنترل میدان‌گرای غیرمستقیم موتور شش‌فاز با خطای قطع فاز

- ۶۹ ۱-۳-۱- دستگاه مرجع سنکرون برای موتور شش‌فاز با خطای قطع فاز
- ۷۳ ۲-۳- کنترل میدان‌گرا
- ۷۵ ۱-۲-۳- کنترل میدان‌گرای مستقیم
- ۷۷ ۲-۲-۳- کنترل میدان‌گرای غیرمستقیم
- ۸۰ ۳-۳- تنظیم ولتاژ اینورتر
- ۸۱ ۴-۳- پایداری کنترل میدان‌گرای غیرمستقیم در حالت ایده‌آل
- ۸۴ ۵-۳- بررسی پایدار محلی کنترل میدان‌گرای غیرمستقیم در حالت غیر ایده‌آل
- ۸۴ ۱-۵-۳- معرفی سیستم
- ۸۶ ۲-۵-۳- یافتن نقاط تعادل
- ۸۷ ۳-۵-۳- بررسی یکتایی جواب
- ۹۰ ۴-۵-۳- تنظیم کنترل‌کننده‌ی PI برای رویاست بودن
- ۹۵ ۵-۵-۳- پرش بین نقاط تعادل
- ۹۸ ۶-۳- بررسی پایداری کنترل میدان‌گرای غیرمستقیم از دید کنترل غیرخطی (بررسی پسیو بودن سیستم)
- ۹۸ ۱-۶-۳- معرفی سیستم
- ۱۰۱ ۲-۶-۳- تجزیه‌ی سیستم
- ۱۰۳ ۳-۶-۳- پایداری جامع
- ۱۰۸ ۴-۶-۳- بازه‌های عملکرد

فصل چهارم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱۱۱ ۱-۴- نتیجه‌گیری
- ۱۱۳ ۲-۴- پیشنهادات

پیوست

مراجع

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱. مدل مداری موتور القایی با اینورتر تغذیه کننده ۳
- شکل ۲-۱. صفحه ی شارهای استاتور ۷
- شکل ۳-۱. نمایش بردارهای دستگاه مرجع گردان در دستگاه مرجع ساکن ۱۱
- شکل ۴-۱. نمایش بردارهای دستگاه مرجع گردان در دستگاه مرجع ساکن ۱۲
- شکل ۵-۱. سرعت موتور ۱۹
- شکل ۶-۱. گشتاور الکتریکی موتور ۱۹
- شکل ۷-۱. جریان های شش فاز استاتور ۲۰
- شکل ۸-۱. جریان رتور ۲۰
- شکل ۹-۱. شبیه سازی خطی موتور حول نقطه ی کار ۲۳
- شکل ۱۰-۱. مقایسه ی پاسخ موتور خطی شده و غیر خطی به تغییر بار ۲۳
- شکل ۱۱-۱. موتور شش فاز در حالت قطع فاز a از اینورتر ۲۴
- شکل ۱۲-۱. صفحه ی شار موتور در حالت قطع فاز a ۲۶
- شکل ۱۳-۱. بلوک دیاگرام مدلسازی موتور شش فاز در حالت خطای قطع فاز ۲۳
- شکل ۱۴-۱. سرعت موتور در حالت قطع فاز ۱۴
- شکل ۱۵-۱. گشتاور تولیدی موتور در حالت قطع فاز ۱۵
- شکل ۱۶-۱. جریانهای i_{z3} و i_{z4} در دستگاه شش بعدی qdz ۳۵
- شکل ۱۷-۱. مجموع جریانهای i_{z3} و i_{z4} در دستگاه شش بعدی qdz ۳۵
- شکل ۱۸-۱. مقایسه ولتاژ فاز b از هر دو روش ۲۸
- شکل ۱-۲. مفهوم پایداری در مسیر حالت سه سیستم مختلف ۴۲
- شکل ۲-۲. مسیر حالت گردش محدود که منجر به ناپایداری می شود ۴۳
- شکل ۳-۲. کنترل حلقه باز ولتاژ/فرکانس ۴۹
- شکل ۴-۲. تاثیر تغییر بار و ولتاژ تغذیه بر کنترل حلقه باز ۵۰
- شکل ۵-۲ (a). عملکرد گذرای کنترل حلقه باز ولتاژ/فرکانس ۵۰
- شکل ۵-۲ (b). عملکرد گذرای کنترل حلقه باز ولتاژ/فرکانس ۵۱
- شکل ۶-۲. فرمان فرکانسی ω_e^* در کنترل حلقه باز ولتاژ/فرکانس ۵۱
- شکل ۷-۲. پاسخ سرعت به تغییر فرمان فرکانسی ۵۲
- شکل ۸-۲. پاسخ گشتاور به تغییر فرمان فرکانسی ۵۲
- شکل ۹-۲. مکان هندسی مقدار ویژه ماتریس حالت A به ازای تغییر مقاومت رتور ۵۴
- شکل ۱۰-۲. رفتار ناپایدار موتور به ازای مقادیر خاصی از مقاومت رتور ۵۴
- شکل ۱۱-۲. کنترل سرعت با تنظیم لغزش ۵۵

- شکل ۲-۱۲. پاسخ کنترل تنظیم لغزش به تغییر بار و تغییر ولتاژ تغذیه ۵۵
- شکل ۲-۱۳. پاسخ کنترل کننده ی PID به ورودی پله گشتاور بار ۵۸
- شکل ۲-۱۴. مکان هندسی قطب های سیستم کنترلی تنظیم لغزش ۵۸
- شکل ۲-۱۵. نمایی بهتر از مکان هندسی ریشه ها در شکل ۲-۱۶ ۵۹
- شکل ۲-۱۶. مکان هندسی ریشه ها بعد از تغییر مکان صفرهای کنترل کننده ۵۹
- شکل ۲-۱۷. پاسخ زمانی سیستم بعد از تغییر مکان صفرهای کنترل کننده ۶۰
- شکل ۲-۱۸. مقایسه عملکرد کنترل کننده در دو سیستم خطی و غیر خطی ۶۰
- شکل ۲-۱۹. عملکرد کنترل کننده در راه اندازی موتور ۶۱
- شکل ۲-۲۰. کنترل سرعت با کنترل شار و گشتاور ۶۱
- شکل ۳-۱. موتور معادل موتور خطادار در زیر فضای qd ۷۰
- شکل ۳-۲. مدار معادل موتور در دستگاه مرجع سنکرون ۷۳
- شکل ۳-۳. تزویج شارها بر روی یکدیگر در معادله ی ولتاژ رتور ۷۴
- شکل ۳-۴. هم جهت کردن راستای محور d دستگاه مرجع سنکرون با بردار شار رتور ۷۴
- شکل ۳-۵. شمای کلی کنترل میدان گرای مستقیم ۷۵
- شکل ۳-۶. تخمین گر شار رتور ۷۶
- شکل ۳-۷. سرعت موتور پس از اعمال کنترل میدان گرای مستقیم ۷۷
- شکل ۳-۸. گشتاور موتور پس از اعمال کنترل میدان گرای مستقیم ۷۷
- شکل ۳-۹. شمای کلی کنترل میدان گرای غیرمستقیم ۷۸
- شکل ۳-۱۰. سرعت موتور پس از اعمال کنترل میدان گرای غیرمستقیم ۷۹
- شکل ۳-۱۱. گشتاور موتور پس از اعمال کنترل میدان گرای مستقیم ۷۹
- شکل ۳-۱۲. موتور القایی پس از اعمال کنترل میدان گرای غیرمستقیم ۸۲
- شکل ۳-۱۳. اعمال کنترل PI برای کنترل سرعت موتور ۸۲
- شکل ۳-۱۴. موتور وقتی کنترل $IFOC$ به صورت ایده آل انجام شود ۸۳
- شکل ۳-۱۵. تابع f بر حسب r وقتی $k > 3$ ۸۹
- شکل ۳-۱۶. نمودار بیفرکیشن ۸۹
- شکل ۳-۱۷. مقدار q_1 در بازه ی D وقتی $\eta = 24$ ۹۳
- شکل ۳-۱۸. پاسخ سیستم وقتی $\eta = 10$ ۹۴
- شکل ۳-۱۹. پاسخ سیستم وقتی $\eta = 16$ ۹۴
- شکل ۳-۲۰. پاسخ سیستم وقتی $\eta = 24$ ۹۵
- شکل ۳-۲۱. مکان مقادیر ویژه ی سه ماتریس ژاکوبین در صفحه ی اعداد مختلط به صورت شماتیک وقتی $\eta = 4$ ۹۶
- شکل ۳-۲۲. مکان مقادیر ویژه ی سه ماتریس ژاکوبین در صفحه ی اعداد مختلط به صورت شماتیک وقتی $\eta = 24$ ۹۷
- شکل ۲-۲۳. خطای سرعت و جریان به ازای افزایش بار وقتی $k = 2$ ۹۷
- شکل ۲-۲۴. خطای سرعت و جریان به ازای افزایش بار وقتی $k = 4$ ۹۸
- شکل ۳-۲۵. شکل اتصال دو زیر سیستم G_1 و G_2 ۱۰۲

شکل ۳-۲۶. سرعت و گشتاور موتور وقتی $R_p = 6$ ۱۱۰

شکل ۳-۲۷. سرعت و گشتاور موتور وقتی $R_p = 4$ ۱۱۰

نام خانوادگی: دیلمانی	نام: مهدی
عنوان پایان نامه: تجزیه و تحلیل پایداری موتورهای الکتریکی شش فاز	
اساتید راهنما: دکتر رضا کیانی نژاد، دکتر قدرت ا... سیف السادات	
درجه‌ی تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: برق گرایش: قدرت
محل تحصیل (دانشگاه): دانشگاه شهید چمران اهواز	
دانشکده: مهندسی	
تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۰ بهمن ۱۳۸۹	تعداد صفحات: ۱۲۰
کلید واژه‌ها: موتور القایی شش فاز، خطای قطع فاز، کنترل اسکالر، پایداری، کنترل میدان‌گرا	
<p>چکیده:</p> <p>در این پایان‌نامه به بررسی پایداری موتور القایی شش‌فاز در کنترل حلقه باز و حلقه بسته می‌پردازیم. در ابتدا موتور را در حالت سالم و قطع فاز مدلسازی می‌کنیم. سپس با معرفی یک فضای مرجع سنکرون جدید الگوریتم کنترلی میدان‌گرای مستقیم و غیرمستقیم را برای شرایط قطع فاز تنظیم و آن را بر مدل استخراج شده در قسمت قبل اعمال می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب این کنترل‌کننده را نشان می‌دهند. ولی نتایج بدست آمده به شرطی صادق است که مقاومت رتور معلوم و بدون تغییر باشد که در حقیقت اینطور نیست. در اینجا مقاومت رتور را برای کنترل‌کننده تخمین زده و بازه‌ی تغییر مقاومت رتور را که در آن سیستم پایداری مجانبی جامع خود را حفظ می‌کند را مشخص می‌کنیم. علاوه بر کنترل میدان‌گرا پایداری روش‌های کنترل اسکالر برای موتور القایی شش‌فاز را نیز بررسی کرده‌ایم. پروپوزیونی که در کنترل‌کننده‌ی PI در کنترل سرعت با تنظیم لغزش با استفاده از مکان هندسی ریشه‌ها ارائه شده است شبیه‌سازی‌های انجام شده در هر بخش صحت نتایج بدست آمده در محاسبات را نشان می‌دهند.</p>	

موتورهای القایی نسبت به دیگر انواع موتورهای الکتریکی دارای کاربرد فراوان و گسترده‌تری هستند تا جایی که گفته شده این موتورها بار صنعت را به دوش می‌کشند [۱]. موتورهای القایی در توان‌های مختلف بین چند دهه وات تا چندصد اسب بخار ساخته می‌شوند. کاربرد وسیع آنها به دلیل ساختار ساده، ارزان بودن و تعمیر و نگهداری کم آنهاست. در چند دهه‌ی اخیر نسل جدیدی از موتورهای القایی معرفی شده است که موتورهای القایی چندین فاز (multi-phase IM) نام دارند. این موتورها نسبت به نوع معمول سه فاز دارای مزایای فراوانی هستند که از مهمترین آنها قابلیت اطمینان بالای آنهاست. زیرا همانطور که دیده خواهد شد این موتور در صورت قطع یک فاز نه تنها به عملکرد خود ادامه می‌دهد، بلکه می‌توان آن را در این شرایط بگونه‌ای کنترل کرد که شاهد یک عملکرد روان و قابل قبول باشیم.

در بسیاری از کاربردهای صنعتی لازم به کنترل سرعت و گشتاور موتور است. ولی موتورهای القایی بر خلاف موتورهای جریان مستقیم رفتاری به شدت غیرخطی از خود نشان می‌دهند و کنترل آنها همواره مورد بحث و تحقیق بوده است. تاکنون روش‌های کنترلی زیادی برای موتورهای القایی پیشنهاد شده که می‌توان آنها را به دو دسته کنترل‌های خطی و غیرخطی دسته‌بندی کرد. هر کدام از این روشهای کنترلی دارای مزایا و معایبی است. کنترل‌کننده‌های خطی برای مدت زیادی است که در صنعت به طور وسیعی کاربرد دارند. دلیل آن سادگی و قابل فهم بودن، آسانی در پیاده‌سازی و ارزان بودن آنهاست. علاوه بر آن کنترل‌کننده‌های خطی نسبت به تغییر پارامترهای سیستم مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. از سوی دیگر این روش‌های کنترلی معمولاً دارای عملکرد نسبتاً کند هستند و فقط در محدوده‌ی خطی‌سازی شده عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهند. با بالا رفتن سطح انتظارات برای سرعت و دقت بیشتر، کنترل‌کننده‌های غیرخطی با سرعت بالا شروع به رشد و تکامل کرده‌اند و هر روز بیش از پیش جایگزین کنترل‌کننده‌های خطی در صنعت می‌شوند. عملکرد این کنترل‌کننده‌ها معمولاً سریعتر و دقیق‌تر است و بر خلاف کنترل‌کننده‌های خطی دامنه‌ی عملکرد وسیعی‌تری دارند. در کاربردهایی مثل رباتیک و هوافضا و ... که کیفیت عملکرد سیستم‌ها بسیار مهم است از این نوع کنترل‌کننده‌ها استفاده می‌شود [۱۰].

اولین مسئله‌ای که درباره‌ی هر روش کنترلی مطرح می‌شود پایداری آن است. زیرا سیستمی که پایدار نباشد نه تنها غیرقابل استفاده بلکه بالقوه خطرناک نیز است. در کنترل خطی مسئله‌ی پایداری به سادگی قابل حل است. زیرا در آن یک نوع پایداری بیشتر مطرح نیست و آن پایداری جامع‌نمایی است که به راحتی با بررسی مکان هندسی مقادیر ویژه‌ی سیستم مشخص می‌شود. در طرف مقابل کنترل‌کننده‌های غیرخطی

قرار دارند که نه تنها طراحی آنها به سادگی کنترل‌کننده‌های خطی نیست بلکه بررسی پایداری آن نیازمند داشتن شناخت دقیقی از سیستم و ریاضیات خاصی است که در هر سیستم با سیستم دیگر متفاوت است. به همین دلیل امروزه پایداری کنترل‌کننده را اساس طراحی آن قرار می‌دهند.

مسئله‌ی دیگر روبات بودن کنترل‌کننده است. یعنی پایداری و عملکرد مطلوب کنترل‌کننده را با تغییر پارامترهای سیستم مورد بررسی قرار می‌دهند. این مسئله درباره‌ی کنترل موتور القایی به شدت مورد توجه است زیرا مقاومت رتور یا ثابت زمانی آن با تغییر شرایط کاری (مثل تغییر حرارت محیط) تغییر می‌کند. کنترل میدان‌گرا یکی از مهمترین انواع کنترل‌کننده‌های موتور القایی است. این روش کنترلی سعی دارد ولتاژ تغذیه‌ی موتور را به گونه‌ای تنظیم کند که رفتار موتور القایی مشابه رفتار خطی موتور جریان مستقیم شود و سپس سرعت آن را توسط کنترل‌کننده‌های خطی معمول مثل کنترل‌کننده PI کنترل کند. ولی این هدف کنترل‌کننده به شرطی تحقق پیدا می‌کند که الگوریتم کنترل به صورت ایده‌آل پیاده سازی شود که با تغییر مقاومت رتور این امر محقق نمی‌شود. در الگوریتم کنترلی برای مقاومت رتور یک مقدار تخمینی در نظر می‌گیرند. دامنه‌ی تغییرات رتور که در آن پایداری سیستم حفظ شود موضوع کار بسیاری از محققان بوده است.

در زمینه کنترل موتور القایی سه فاز و چندین فازه تحقیقات زیادی انجام شده است. آقای کرووز در [۵] به مدلسازی موتور القایی سه فاز در حالت سالم و قطع فاز می‌پردازد و در [۹] پایداری کنترل حلقه باز موتور القایی سه فاز را با فرض تغییر پارامترهای موتور مورد بررسی قرار داده است. پس از آن آقای تولیت در [۳] موتور القایی پنج فاز در حالت قطع یک فاز را موضوع کار خود قرار می‌دهد. آقای لپیو در [۶] مدلسازی موتور القایی شش فاز را مدلسازی می‌کند. سپس در [۴] مدلسازی موتور را در حالت قطع یک فاز مورد بررسی قرار داده و در [۱۳] کنترل میدان‌گرای مستقیم را در شرایط خطا به گونه‌ای تنظیم می‌کند که کنترل موتور به نرمی صورت گیرد. در [۲] آقای کیانی نژاد این مسئله را با رویکردی دیگری مورد توجه قرار می‌دهد و گشتاور موتور در شرایط خطا را به دو مقدار ثابت و نوسانی تجزیه می‌کند. قانون کنترلی را به گونه‌ای مشخص می‌کند که این مولفه‌ی نوسانی گشتاور برابر صفر شود.

در زمینه بررسی پایداری و روبات بودن الگوریتم‌های کنترلی می‌توان به کارهای آقای بازانلا در [۱۴] و [۱۷] اشاره کرد که کنترل محلی نقطه تعادل این کنترل‌کننده را مورد بررسی قرار می‌دهد و در [۱۶] سعی می‌کند با استفاده از روش‌های عددی تابع لیاپانوف مناسب را برای اثبات پایداری جامع سیستم را نشان دهد. آقای اوگاتا در مقالات زیادی از جمله [۱۵] و [۱۹] به بررسی پایداری کنترل میدان‌گرای غیرمستقیم می‌پردازد.

هدف از انجام این پایان‌نامه بررسی پایداری کنترل حلقه‌باز و حلقه‌بسته‌ی موتور القایی در شرایط کارکرد سالم و خطای تک‌فاز است. ولی پیش از انجام هر تحقیق و بررسی نیازمند یک مدلسازی دقیق از موتور القایی شش فاز در شرایط سالم و مخصوصاً قطع‌فاز هستیم. همانطور که گفته شد کنترل خطی با وجود اینکه به عنوان کنترل‌کننده‌های نسل گذشته محسوب می‌شوند ولی استفاده‌ی گسترده‌ی آنها در صنعت ما را بر آن داشت که بخشی از این پایان‌نامه را به بررسی پایداری این روش‌های کنترلی اختصاص دهیم.

پیش از بررسی پایداری موتور القایی شش‌فاز در شرایط خطا، به معرفی کنترل‌کننده‌های میدان‌گرایی می‌پردازیم که برای کنترل موتور در شرایط خطا بهینه شده‌اند. این کار با استفاده از یک فضای سنکرون جدید انجام می‌شود. پس از آن پایداری این کنترل‌کننده‌ها را با فرض عدم اطلاع از مقاومت رتور مورد بررسی قرار می‌دهیم. این بررسی شامل دو بخش بررسی پایداری محلی و جامع می‌شود. نتیجه‌ی آن بدست آمدن بازه‌ای برای تخمین مقاومت رتور است که در این بازه پایداری سیستم حلقه بسته حفظ می‌شود.

فصل اول

مدل سازی موتور القایی شش فاز در حالت سالم و قطع فاز

در این فصل قصد داریم به مدل سازی موتور القایی در حالت سالم و قطع فاز بپردازیم. ترتیب ارائه‌ی مطالب به این صورت است: ابتدا موتور القایی شش فاز مدل سازی می‌شود. سپس آن را برای بررسی پایداری محلی در فصل سوم خطی سازی کرده و مدل سیگنال کوچک آن را استخراج می‌کنیم. در قسمت بعد مدل سازی موتور را در حالت قطع فاز مورد بررسی قرار می‌دهیم. این مدل در فصل‌های بعد برای کنترل موتور در حالت قطع فاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پایان نیز یک روش تقریبی برای تخمین ولتاژ فازها ارائه شده است. برای اطمینان از صحت مدل سازی انجام شده نتیجه این دو روش را با هم مقایسه می‌کنیم.

۱-۱- مدل سازی موتور القایی شش فاز سالم

۱-۱-۱- معادلات ولتاژ موتور در فضای شش بعدی $qdz 6$

در بین انواع مختلف موتورهای جریان متناوب موتور القایی مخصوصاً نوع قفس سنجابی آن در صنعت کاربرد فراوانی دارد. این موتور از لحاظ اقتصادی بسیار به صرفه است و ساختاری مقاوم دارد. علاوه بر آن قابلیت اطمینان آن نسبتاً بالاست و در اندازه‌های مختلفی از کمتر از یک اسب بخار تا چند مگاوات ساخته می‌شوند. موتورهای کم‌قدرت معمولاً به صورت تک‌فاز هستند ولی در درایوهای کنترل سرعت از نوع چندفاز (سه فاز به عنوان مثال) استفاده می‌شود [۱].

در کاربردهایی که به قابلیت اطمینان بالاتری نیاز است به جای استفاده از موتورهای القایی سه‌فاز معمول از موتورهای القایی با تعداد فاز بیشتر مثل موتورهای پنج یا شش فاز استفاده می‌شود [۲]. این موتورها نسبت به موتورهای سه‌فاز دارای مزایایی هستند که از جمله‌ی آنها [۳]:

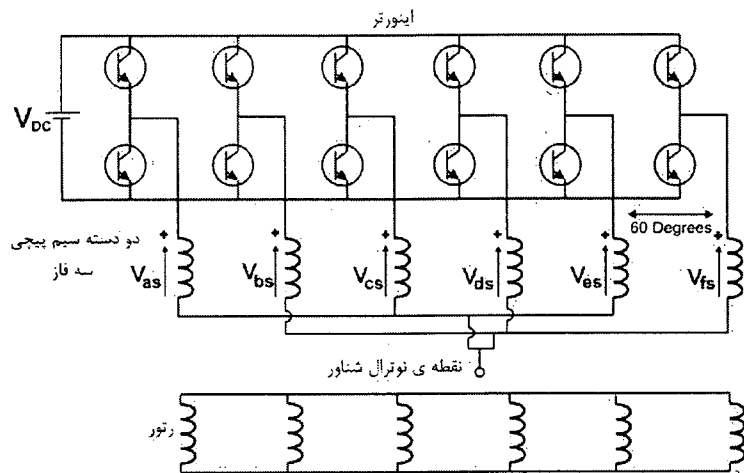
- برای یک توان مساوی مقدار توان عبوری که هر فاز باید تحمل کند کمتر است. یعنی مقدار جریان در فاز را می‌توان کاهش داد بدون اینکه لازم باشد ولتاژ در فاز را افزایش دهیم.

- تحمل موتور در شرایط خطا مثل قطع یک یا چند فاز بیشتر می‌شود.
- درجه‌ی آزادی کنترل‌کننده‌ای که بتواند موتور را در شرایط قطع فاز کنترل کند افزایش می‌یابد.
- دامنه‌ی پالس‌های ناخواسته‌ی گشتاور کمتر و فرکانس آنها بیشتر می‌شود.
- باعث کاهش هارمونیک‌های لینک dc می‌شود.

همان‌طور که گفته شد با قطع شدن یک فاز از استاتور موتور به کار خود ادامه می‌دهد هر چند که گشتاور و سرعت آن همراه با لغزش است. در صورتی که موتور به عنوان درایو مثل کنترل میدان‌گردان مستقیم یا غیرمستقیم استفاده شود این لغزش‌ها باعث به هم ریختن عملکرد کنترل‌کننده می‌شود. ولی مزیت اصلی موتور القایی شش فاز در این است که در این شرایط خطا درایو را می‌توان به گونه‌ای تنظیم کرد که شاهد عملکردی روان و مناسب همانند حالت کارکرد سالم باشیم. به همین دلیل قابلیت اطمینان موتور به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد [۴].

موتورهای القایی معمولاً به صورت قفس‌سنجایی استفاده می‌شوند. زیرا این موتورها مقاوم‌تر، سبک‌تر و ارزان‌ترند. ولی در این حالت کنترلی روی مقاومت رتور وجود ندارد. البته با ظهور درایوها، کنترل سرعت و گشتاور موتور از طریق تغییر مقاومت رتور تقریباً منسوخ شده است. سیم‌پیچی‌های استاتور می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد. سیم‌پیچ استاتور معمولاً به صورت دو دسته سیم‌پیچی‌های سه‌فاز در نظر گرفته می‌شود. اختلاف زاویه‌ی مکانی بین این دو دسته ممکن است ۳۰ یا ۶۰ درجه باشد. در این جا این زاویه ۶۰ درجه در نظر گرفته شده است. شکل اتصال نقطه‌های نوترال این دو دسته سیم‌پیچی نیز مهم است. این دو نقطه ممکن است به هم متصل باشند یا نباشند که در مدل‌سازی موتور در حالت قطع فاز از اهمیت زیادی برخوردار است. ما آن‌ها را متصل به هم فرض می‌کنیم. نقطه‌ی نوترال سیم‌پیچی استاتور در صنعت معمولاً زمین نمی‌شود و شناور است.

مدل‌سازی موتور القایی سه فاز در [۵] ارائه شده است. مدل‌سازی موتور القایی شش فاز تقریباً به همان شیوه انجام می‌شود ولی این بار در فضای شش بعدی. برای مدل‌سازی موتور از مدل مداری آن استفاده می‌شود. شکل ۱-۱ مدل مداری همراه با اینورتر متصل به آن را نشان می‌دهد. رتور قفس-سنجایی به دلیل ساختار اتصال کوتاهی که دارد را می‌توان با سیم‌پیچی شش فاز مدل کرد [۶].



شکل ۱-۱. مدل مداری موتور القایی با اینورتر تغذیه کننده

پیش از شروع مدل سازی فرض می کنیم:

- سیم پیچی استاتور توزیع سینوسی دارد.
- مسیر شار خطی است.
- از اندوکتانس نشی متقابل صرف نظر شده است.
- نسبت دور رتور و استاتور یک به یک است.

این فرض ها با وجود اینکه محاسبات را تا حدود زیادی ساده می کند، دقت کار کاهش قابل ملاحظه ای نخواهد داشت.

همان طور که می دانیم در یک مدار الکتریکی جریان هر سلف یک متغیر حالت مدار محسوب می شود. استاتور موتور شش فاز از شش سیم پیچی تشکیل شده است و به طور کلی هر یک از آنها می تواند جریان مستقل داشته باشد. این شش جریان می توانند شش متغیر حالت سیستم محسوب شوند. بنابراین ما با یک سیستم در فضای شش بعدی روبرو هستیم. در صورتی که از جریان های استاتور نمونه برداری کرده و آنها را در یک بردار شش بعدی به شکل زیر بیان کنیم.

$$[i_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs} \ i_{ds} \ i_{es} \ i_{fs}]^T \quad (1-1)$$

خود به خود یک فضای شش بعدی معرفی کرده ایم که بردارهای مبنای آن به شکل استاندارد زیر هستند.

$$e_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, e_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \dots e_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

برای ولتاژ اعمالی به شش سیم‌پیچ استاتور و شش جریان رتور نیز به همین شکل بردارهای ولتاژ و جریان تعریف می‌شوند. حال می‌توانیم با استفاده از قانون KVL معادلات ولتاژ را برای مدار رتور و استاتور بنویسیم. برای استاتور داریم:

$$\begin{aligned} [V_s] &= r_s [i_s] + p.([\lambda_s]) = r_s [i_s] + p.([\lambda_{ss}] + [\lambda_{sr}]) \\ &= r_s [i_s] + p.([L_{ss}] \cdot [i_s] + [L_{sr}] \cdot [i_r]) \end{aligned} \quad (3-1)$$

و معادله‌ی ولتاژ رتور:

$$\begin{aligned} [V_r] &= r_r [i_r] + p.([\lambda_r]) = r_r [i_r] + p.([\lambda_{rr}] + [\lambda_{rs}]) \\ &= r_r [i_r] + p.([L_{rr}] \cdot [i_r] + [L_{rs}] \cdot [i_s]) \end{aligned} \quad (4-1)$$

که در آن:

$$[V_s] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs} \ v_{ds}' \ v_{es} \ v_{fs}]^T \quad (5-1)$$

ولتاژ اعمالی به هر فاز استاتور است. ولتاژ فاز d با علامت پریم نشان داده شده است تا این که با ولتاژ در دستگاه $q-d$ اشتباه نشود. در ادامه به معرفی این دستگاه مرجع می‌پردازیم

جریان استاتور:

$$[i_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs} \ i_{ds}' \ i_{es} \ i_{fs}]^T \quad (6-1)$$

ولتاژ رتور به دلیل اتصال کوتاه بودن سرهای میله‌های قفس‌سنجایی رتور به هم صفر است:

$$[V_r] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (7-1)$$

جریان رتور:

$$[i_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr} \ i_{dr} \ i_{er} \ i_{fr}]^T \quad (8-1)$$

اندوکتانس خودی سیم‌پیچ استاتور:

$$[L_{ss}] = L_{ls} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 \\ -1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (9-1)$$

که در آن L_{ls} اندوکتانس نشستی و L_{ms} اندوکتانس مغناطیس کنندگی استاتور است.

$$[L_{rr}] = L_{lr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 \\ -1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (10-1)$$

اندوکتانس متقابل بین استاتور و رتور:

$$[L_{sr}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{3\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{5\pi}{3} + \theta_r\right) \\ \cos\left(\frac{5\pi}{6} + \theta_r\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{3\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_r\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{5\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{3\pi}{3} + \theta_r\right) \\ \cos\left(\frac{3\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{5\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_r\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{3\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{5\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta_r\right) \\ \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{3\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos\left(\frac{5\pi}{3} + \theta_r\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (11-1)$$

اندوکتانس متقابل بین رتور و استاتور:

$$\begin{aligned}
 & [L_{rs}] \\
 & = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\frac{\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{2\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{3\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{4\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{5\pi}{3} - \theta_r) \\ \cos(\frac{5\pi}{6} - \theta_r) & \cos(\theta_r) & \cos(\frac{\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{2\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{3\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{4\pi}{3} - \theta_r) \\ \cos(\frac{4\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{5\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\theta_r) & \cos(\frac{\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{2\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{3\pi}{3} - \theta_r) \\ \cos(\frac{3\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{4\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{5\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\theta_r) & \cos(\frac{\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{2\pi}{3} - \theta_r) \\ \cos(\frac{2\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{3\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{4\pi}{3} - \theta_r) & 0 & \cos(\frac{5\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\theta_r) \\ \cos(\frac{\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{2\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{3\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{4\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\frac{5\pi}{3} - \theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \\
 & \qquad \qquad \qquad (12-1)
 \end{aligned}$$

که زاویه ی θ_r زاویه ی گردش رتور است و بر حسب سرعت زاویه‌ای رتور ω_r به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r dt + \theta_r(0) \qquad (13-1)$$

همان‌طور که می‌دانیم در صورتی که کنترل اینورتر به صورت مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری^۱ باشد فقط ولتاژهای خط اینورتر معلوم است. با نوشتن KVL در مش‌های بین اینورتر و موتور داریم

$$\begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \\ e_{cd} \\ e_{de} \\ e_{ef} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ v_{ds}' \\ v_{es} \\ v_{fs} \end{bmatrix} \qquad (14-1)$$

که در آن e_x ولتاژ خط اینورتر است. بنابراین با معکوس کردن این ماتریس تبدیل ولتاژ فازهای موتور را می‌توان به صورت زیر مشخص کرد.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ v_{ds}' \\ v_{es} \\ v_{fs} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 1 \\ -1 & 4 & 3 & 2 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 3 & 2 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & -3 & 2 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & -3 & -4 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & -3 & -4 & -5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \\ e_{cd} \\ e_{de} \\ e_{ef} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (15-1)$$

همان‌طور که فرض شد به دلیل این‌که طول فاصله‌ی هوایی نسبت به شعاع رتور بسیار کمتر است می‌توان مسیر شار را در فاصله‌ی هوایی شعاعی در نظر گرفت. از طرفی شار در فاصله‌ی هوایی نقش انتقال دهنده‌ی انرژی را بازی می‌کند. چون این شار شعاعی است می‌توان آن را در یک صفحه یا یک فضای

^۱ Space Vector Pulse Width Modulation