بسم الله الرحمن الرحيم

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه میکرو

۴۰۸۲۲

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تقدیم به مرکز

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

۱۳۸۱ /۴/ ۲۶

بررسی اثرات اشباع مغناطیسی دومحوری برروی رفتار ماشین‌های سنکرون سه فاز

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تقدیم به مرکز

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

احمد علیخانی دهقی

۴۰۸۲۲

استاد راهنما

دکتر جعفر سلطانی

مهر ماه ۱۳۸۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت آقای احمد علیخانی دهقی

تحت عنوان

بررسی اثرات اشباع مغناطیسی دومحوری برروی رفتار ماشین‌های سنکرون سه فاز

بررسی اثرات اشباع مغناطیسی دومحوری برروی رفتار ماشین‌های سنکرون سه فاز

در تاریخ ۱۳۸۰/۷/۲۵ توسط کمیته تخصصی زیر بررسی و مورد تأیید نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه — **دکتر جعفر سلطانی**

۲- استاد مشاور پایان نامه — **دکتر سید مرتضی سقائیان‌نژاد**

سرپرست تحصیلات تکمیلی — **دکتر علی‌محمد دوست حسینی**

تقدیر و تشکر

«مَنْ عَلَّمَنِی حَرْفاً فَقَدْ صَیَّرَنِی عَبْداً»

کسیکه مرا حرفی بیاموزد پس به تحقیق مرا بنده خود کرده است

گرچه زبان و قلم توان تقدیر وتشکر از زحمات خداپسندانه و بی شائبه شما را ندارد ولیکن بر حسب وظیفه از استاد محترم ، جناب آقای دکتر جعفر سلطانی استاد راهنمای پایان نامه که سعی و تلاش زیاد و راهنمائیهای دقیق و لازم را در جهت انجام این پایان نامه مبذول داشته اند و افتخار شاگردی محضر درس ایشان را داشته ام ، صمیمانه تشکر و قدردانی می گردد و همچنین از جناب آقای دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد استاد مشاور پایان نامه که حق استادی را بر این حقیر دارند و به خاطر تلاش و زحمات بی شائبه ایشان ، صمیمانه تشکر و قدردانی میگردد .

از زحمات بی دریغ اساتید محترم جناب آقای دکتر مهدی معلم و جناب آقای دکتر حمید رضا کارشناس که افتخار حضور در کلاس های درس ایشان را داشته ام و در جلسه دفاع از پایان نامه حضور داشته اند ، تشکر و قدردانی میگردد . همچنین از جناب آقای دکتر علیمحمد دوست حسینی سر پرست محترم تحصیلات تکمیلی به خاطر زحمات بی شائبه ایشان ، تشکر و قدردانی میگردد و از زحمات خداپسندانه سر کار خانم دیباجی و از کلیه اساتید و کارکنان دانشکده برق و کامپیوتر به خاطر زحمات بی شائبه ایشان ، تشکر و قدردانی میگردد و توفیق روز افزون همه این عزیزان را از خداوند متعال مسئلت داریم .

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات ،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

تقدیم به

پدر ومادر عزیزم وهمسر فداکارم

فهرست مطالب

عنوان — صفحه

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: تئوری ماشین سنکرون

۲-۱- مقدمه ۹

۲-۲- بررسی مدار مغناطیسی ماشین‌های سنکرون ۱۰

۲-۳- اجزاء فوران تولیدی ۱۲

۲-۴- مدل الکتریکی رتور ۱۸

۲-۴-۱- بررسی القاء متقابل بین سیم‌پیچ‌های میراکننده محور d و سیم‌پیچ تحریک ۱۸

۲-۴-۲- بررسی القاء متقابل بین سیم‌پیچهای میراکننده رتور ۲۱

۲-۵- روشهای بررسی اثرات اشباع مغناطیسی بر روی ماشینهای سنکرون ۲۵

۲-۵-۱- بررسی با دو ضریب اشباع (روش A) ۲۵

۲-۵-۲- بررسی با یک ضریب اشباع مشترک (روش B) ۲۸

۲-۶- بررسی پدیده پیوند مغناطیسی عرضی در ماشین‌های سنکرون ۳۰

۲-۷- مدل سازی الکتریکی پدیده پیوند مغناطیسی عرضی ۳۳

فصل سوم: معادلات الکتریکی و مدل نمودن ماشینهای سنکرون سه فاز با در نظرگرفتن تأثیرات اشباع مغناطیسی

۳-۱- مقدمه ۴۱

۳-۲- روابط ریاضی اندوکتانسهای غیرخطی ۴۲

۳-۲-۱- اندوکتانسهای غیرخطی بدون حرکت مکانیکی ۴۲

۳-۲-۲- اندوکتانسهای غیرخطی با حرکت نسبی ۴۳

۳-۳- روابط ریاضی پیوند مغناطیسی عرضی در ماشین قطب صاف ۴۳
۳-۳-۱- مدل ریاضی ماشین قطب صاف ۴۶
۳-۴- روابط ریاضی پیوند مغناطیسی عرضی در ماشین‌های قطب برجسته ۴۷
۳-۴-۱- مدل ریاضی ماشین قطب بر جسته ۵۰
۳-۵- مدل غیر خطی با متغییر حالت آمپر دور بر ثانیه..... ۵۱

فصل چهارم: شبیه سازی کامپیوتری

۴-۱- مقدمه..... ۵۷
۴-۲- راکتانس اصلاح شده ۵۷
۴-۳- اثر مغناطیسی شدن عرضی ۵۸
۴-۴- نمایش اثر مغناطیسسی شدن عرضی..... ۵۹
۴-۵- شرح برنامه کامپیوتری ۶۰
۴-۶- نتایج شبیه سازی ۶۴
۴-۷- اثر اشباع در رفتار ماشین سنکرون با استفاده از منحنی بی‌باری ماشین..... ۶۴
۴-۷-۱- محاسبه معادله منحنی اشباع بی باری ۶۵
۴-۷-۲- محاسبه ولتاژ ترمینال ماشین..... ۶۶
۴-۷-۳- محاسبه ولتاژ rms مربوط به ولتاژ ترمینال..... ۶۶
۴-۷-۴- شبیه سازی کنترل کننده PI..... ۶۷
۴-۸- شرح برنامه کامپیوتری ۶۹

فصل پنجم: بررسی نتایج شبیه سازی ومنحنی‌های بدست آمده

۵-۱- مقدمه..... ۷۱
۵-۲- بررسی نتایج شبیه سازی با استفاده از محاسبه راکتانس سنکرون ۷۱
۵-۲-۱- بررسی رفتار توربوژنراتور سنکرون براثرقطع تحریک ۷۴
۵-۳- بررسی نتایج شبیه سازی موتور سنکرون سه فاز قطب برجسته با استفاده از منحنی بی‌باری ماشین سنکرون..... ۱۰۴
۵-۴- نتیجه‌گیری و پیشنهاد..... ۱۴۳

پیوست‌ها ۱۴۵
مراجع ۱۵۷

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
شعبه مرکزی

چکیده

یافتن مدل دقیق ماشین سنکرون جهت پیشگویی رفتار آن همواره مورد توجه خاصی بوده است. تاکنون مدل‌های گوناگونی جهت بررسی اشباع ارائه شده که در اکثر آنها از همان مدل خطی استفاده می‌شود. در مورد اندازه‌گیری دقیق راکتانس‌های سنکرون اشباع مغناطیسی دو محوری ماشینهای سنکرون کارهای تحقیقاتی شایان توجهی انجام گرفته است. این نتایج نشان می‌دهد که راکتانس سنکرون محور q یعنی X_q پارامتری مؤثر در اندازه‌گیری زاویه رتور(δ_r) و از طرفی دیگر راکتانس سنکرون محور d یعنی X_d پارامتری غالب در اندازه‌گیری ولتاژ بی‌باری تحریک و نهایتاً مشخصه استاتیکی زاویه قدرت بار ماشین‌های سنکرون می‌باشد. بعلاوه X_d نقش مهمی را در محاسبات جریان اتصال کوتاه به عهده دارد. یکی از روشهایی که اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است، استفاده از فاکتورهای اشباع دو محوری است.

گروهی دیگر از محققین اندازه‌گیری اشباع X_{ds} و X_{qs} را بر اساس رسم مسیر شارهای مغناطیسی در داخل ماشین با استفاده از روش اجزاء محدود بیان داشته‌اند. این روش اگر چه دقیق می‌باشد، ولی از نظر حجم و زمان محاسباتی غیر اقتصادی می‌باشد.

در این پروژه با استفاده از چند تکنیک ریاضی و تعریف پارامترهای جدید به طوریکه با در نظر گرفتن اثرات پیوند مغناطیسی عرضی، برای یک ماشین سنکرون سه‌فاز(قطب صاف) پارامترهای راکتانس اشباع دو محوری X_{ds} و X_{qs} در هر لحظه محاسبه و در اختیار برنامه کامپیوتری مدل کننده ماشین قرار می‌گیرد. در قسمت بعدی این پروژه به شبیه‌سازی اثر اشباع در یک موتور سنکرون قطب برجسته با استفاده از منحنی بی‌باری ماشین پرداخته و نتایج کامپیوتری برای حالتهای کاری ماشین و همچنین برای انواع خطاهای الکتریکی موازی (سه فاز ـ دو فاز و تک فاز) مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل اول
مقدمه

فرآیندهای الکتریکی و الکترومکانیکی در ماشینهای سنکرون، نقش مهم و عمده‌ای در ارزیابی سیستمهای قدرت با قابلیت اطمینان بالا و اندازه حفاظت‌های آن ایفا می‌کنند. پیش‌بینی دقیق پاسخ روشهای کنترل و نیاز به انتقال توان اقتصادی، محدوده پایداری سیستمهای قدرت را کاهش می‌دهد. بنابراین اهمیت مطالعات پایداری افزایش یافته و نیاز به پیش بینی دقیق پایداری سیستمهای قدرت را به همراه خواهد داشت. مطالعه چنین فرآیندهایی اطلاعات مهمی برای طراحی ماشینهای سنکرون در اختیار قرار می‌دهد که در نتیجه اهمیت شبیه‌سازی ماشینهای سنکرون و کاربرد فراوان آن در تحلیل سیستمهای قدرت و مطالعه ماشینهای مجزا روشن می‌شود. طراحی اقتصادی، عملکرد ماشین در ناحیه اشباع مغناطیسی را ایجاب می‌کند و چون مقداری از جریان تحریک برای جریان مغناطیسی غیر خطی مورد نیاز است، مدل دقیق و قابل قبول برای پارامترهای مغناطیسی غیر خطی رهگشای طراحی خوب و مناسب خواهد بود به همین دلیل مقادیر پارامترهای ماشین سنکرون روز به روز بحرانی‌تر از گذشته شده است.

پیشرفتهای اخیر مدل ریاضی ماشین سنکرون، نیازمند تحقیقاتی جهت بهبود روشهای اندازه‌گیری یا محاسباتی پارامترهای مورد نیاز ماشین در این مدل می‌باشد. به دلیل قیمت بالای ماشین سنکرون، هر روش اندازه‌گیری باید دقیق و آسان بوده و هیچگونه خطری برای ماشین بوجود نیاورد و به همین ترتیب هر روش محاسبات نیز علاوه بر دقت کافی، باید قابلیت کاربرد در طراحی ماشینها را داشته باشد.

به دلایل ذکر شده در فوق در ۱۰۰ سال گذشته توجه بسیاری از دانشمندان به مدل دقیق میدان مغناطیسی ماشین سنکرون در حالت اشباع، جهت پیش‌بینی رفتار آن جلب شده است. وجود چند فاکتور سبب پیچیدگی موضوع شده است. هادی‌های آرمیچر در شیارها قرار دارند که موجب تجمع خطوط شار در دندانه‌ها می‌شوند. این امر هم در توزیع چگالی شار شعاعی فاصله هوایی[1] اعوجاج[2] بوجود می‌آورد و هم سبب اشباع مغناطیسی دندانه‌ها می‌شود. مورب بودن شیارها و اثرات انتهای سیم‌پیچ[3] نیز تغییراتی در میدان در راستای طول شکاف هوایی بوجود می‌آورد. برجستگی قطبها سبب ایجاد پدیده لبه در شار، در فاصله بین قطبها[4] و همچنین غیر یکنواختی فاصله هوایی می‌شود. به همین دلایل پیک مؤلفه اصلی توزیع چگالی شار در راستای پیک توزیع آمپر دور منتجه نخواهد بود. نمایش توزیع آمپر دور سیم‌پیچهای تحریک از پیچیدگی خاصی برخوردار است، زیرا سیم‌پیچ‌ها پشت سر هم[5] در قطبهای میدان قرار گرفته‌اند و مانعی برای این کار خواهند بود. ضمناً شار از لبه‌های قطب[6] به سوی خارج پراکنده می‌شود[7]. توزیع آمپر دور را می‌توان به صورت تئوری تعیین نمود، اما پیک مؤلفه اصلی آن در هر زاویه‌ای ممکن است قرار بگیرد که این زاویه به بار و ضریب توان ماشین بستگی دارد. اشباع تقریباً کلیه قسمتهای آهنی ماشین را تحت تأثیر قرار داده که بیشترین شدت اشباع در ناحیه دندانه‌های آرمیچر و بعد از آن کفشهای قطب و سپس هسته‌ها می‌باشد. اثرات اشباع در این نواحی حتی زمانیکه ماشین در شرایط نامی کار می‌کند نیز وجود دارد.

تئوری دو محوری اولین بار توسط Blondel در اوایل قرن بیستم توسعه داده شد تا اختلافی که بین مسیرهای مغناطیسی محورهای مستقیم و ربعی وجود دارد به طور دقیق‌تری مورد بحث قرار گیرد. پس از پیشرفتهایی که در این تئوری حاصل شد برای حالت ماندگار و خطی کاملاً دقیق و مناسب بود. Doherty و Shirley اثر موج غیرسینوسی میدان را بررسی و آزمایش کردند و در تخمین جریانهای اتصال کوتاه بهبودی حاصل نمودند و برای اولین بار اصل شار پیوندی ثابت[8] را در شروع حالت گذرا جهت حل معادلات دیفرانسیل به کار بردند. در این مدت رفتار مغناطیسی در ماشینهای قطب برجسته با استفاده از روشهای گرافیکی ساده[9]، تکنیکهای ترسیمی تطبیقی[10]، ضرائب کارتر[11] و شبیه‌سازی مدارهای مغناطیسی تخمین زده می‌شد. تمام این روشها بسیار مشکل و پر زحمت بوده و فقط در شرایط ایده‌آل دارای دقت کافی بودند. در ضمن اشباع در این روشها در نظر گرفته نمی‌شد. Stevenson و Park و Wieseman در سال ۱۹۲۷ تئوریی برای حل گرافیکی میدان در شرایطی که چگالی جریان صفر نباشد بکار بردند. گرچه این تئوری فقط برای پرمابیلیته بی‌نهایت مناسب بود و خطاهای

1- air gap radial flux density distribution
2- ripple
3- end windings effects
4- interpolar
5- set back
6- pole tips
7- fringes out
8- constant flux linkage
9- simple graphical techniques
10- comformal mapping techniques
11- carter´s coefficients

انسانی[1] را نیز شامل می‌شد، با این وجود با دقت خوبی میدان را در فاصله هوایی ماشین قطب برجسته خطی پیشگویی می‌کرد. این روش گرافیکی را Doherty و Nickle در بسیاری از مقالات مهم بکار بردند که در نهایت منجر به روش دو محوری Blondel برای محاسبه هارمونیکهای آمپر دور و زاویه گشتاور در شرایط ماندگار و اتصال کوتاه سه فاز و تک فاز شد. گر چه درباره چگونگی محاسبه اثرات اشباع نیز روشهایی ذکر شده است ولی خطی بودن، یکی از فرضیات اساسی این مقالات است. در همان زمانیکه Doherty و Nickle کارهایشان را منتشر می‌کردند، Park روشی عمومی برای تحلیل ماشین در حالت ایده‌آل ارائه داد [۲۴]. اشباع، هیسترزیس و فوکو در روش پارک صرف نظر می‌شد اما برجستگی قطب و سیم‌پیچهای مرکب و چندلا[2] را در نظر می‌گرفت و آمپر دور سینوسی فرض می‌شد. روش Park در تحلیل ماندگار و گذرا، مناسب برای کامپیوتری است. این روش را Gabriel Kron توسعه داد و در دهه ۳۰ و ۴۰ قرن بیستم میلادی بکار برد. پاره‌ای از مشکلات این روش که به تفضیل عنوان شده است عبارتند از:

۱ ـ ماشین خطی فرض می‌شود. ۲ ـ در ماشینهای قطب برجسته آمپر دور مؤثر سیم‌پیچهای تحریک در فاصله هوایی، سینوسی نیستند. ۳ ـ تعیین المانهای ماتریس امپدانس مشکل است.

در اواسط دهه ۳۰ قرن بیستم، تئوری جامع ماشینهای سنکرون در حالت خطی کاملاً توسعه داده شد. مشکل بعدی چگونگی محاسبه اثرات اشباع در این مدل بود. بسیاری از تحلیل‌های ماندگار ماشین سنکرون بر اساس مدلی شامل یک ولتاژ سری با راکتانس سنکرون پایه‌گذاری شد که هم ولتاژ و هم راکتانس تابعی از اشباع بودند. Putman روشی را که راکتانس سنکرون تابعی از ولتاژ فاصله هوایی بود بیان نمود [۲۷]. خیلی بیش از آن در سال ۱۹۰۰ میلادی Potier اشباع در ماشین‌های قطب صاف را تابعی از ولتاژ روی راکتانس پوتیه نشان داده بود. این راکتانس را Beckwith برابر با راکتانس گذاری محور d وقتی فقط قطبها اشباع شوند در نظر گرفت. March و Cary راکتانس پوتیه را با راکتانس نشتی استاتو وقتی فقط استاتور اشباع شده باشد برابر گرفتند. اما این نه به صورت تحلیلی و نه به صورت آزمایشگاهی ثابت شده است. Cary در کتابی که در سال ۱۹۴۵ منتشر نمود برای دقت بیشتر پارامترهای غیر خطی را تابعی از چند متغیر مختلف گرفت.

در دهه ۳۰ و ۴۰ قرن بیستم بسیاری از دانشمندان بر آن شدند تا اشباع در ماشین را بر اساس منحنی مغناطیس شوندگی بی‌باری و نتایج آزمایشگاهی پایه ریزی کنند. این روشها موفقیت محدودی به همراه داشت زیرا منحنی مغناطیسی بی‌باری، اشباع را فقط در محور d تحریک در نظر گرفته و اشباع محور q را نادیده می‌گیرد. در ضمن منحنی‌های مغناطیسی بی‌باری فقط برای ماشینهای موجود قابل دسترس است و کاربرد آن در طراحی ماشین قبل از ساخت آن بسیار مشکل است. Crary و Skildneck و March راکتانس‌های سنکرون معادل را بکار بردند

1- human error

2- multiple windings

ولی این روش محدود به تغییرات حول نقطه کار می‌شد[۳۵].

برای ماشینهای قطب صاف Kingsley راکتانس‌های سنکرون اشباع را به جای راکتانس ثابت پوتیه ارائه کرد. Kilogore از داده‌های آزمایش شده برای بهبود منحنی‌های تجربی جهت تعریف راکتانس‌های مختلف استفاده نمود. Robertson و Rogers و Dalziel راکتانس محور ربعی اشباع شده را که از آزمایش‌های لغزش بدست آمده بود بکار بردند. Rüdenburg روشی بکار برد که در آن از روش گرافیکی برای ترکیب منحنی مغناطیسی بی‌باری با معادلات ماندگار و دیفرانسیلی استفاده می‌شد. در دهه ۵۰ و ۶۰ کلیه تحقیقات بر اساس منحنی مغناطیس شوندگی بی‌باری متمرکز شد و بسیاری از کوشش‌ها برای محاسبه اشباع در معادلات عمومی ماشین انجام شد.

در نیمه دهه ۶۰، با پیشرفت کامپیوترهای دیجیتال، روش اختلاف محدود[1] در محاسبات میدان با در نظر گرفتن اشباع بکار برده شد. از فواید این روش تعیین توزیع شار در قسمتهای آهنی ماشین بود که اشباع نیز در نظر گرفته می‌شد. محاسبات بسیار زیاد و مربع‌های اختلاف محدود[2] که با سطح مقطع‌های دایره‌ای شکل[3] ماشین به راحتی قابل تطبیق نبود مشکلات عمده این روش به شمار می‌روند. روش اختلاف محدود برای محاسبه راکتانس‌های ماندگار نیز بکار برده شد. این راکتانس‌ها در معادلات پایداری، گشتاور بهتری را نسبت به راکتانس‌های خطی ارائه می‌دادند.

در اوایل دهه ۷۰ تحلیل المان محدود[4] در مسائل ماشین به وسیله Silvester و Chari بیان شد [۳۶و۳۷]. این روش مدل‌سازی میدان، متداول‌ترین روش در طراحی‌های اولیه ماشین است زیرا المانهای مثلثی[5] به سهولت برای مدل‌سازی سطح مقطع‌های دایره‌ای شکل بکار برده می‌شود. به کمک روش‌های ریاضی قوی، تحلیل المان محدود به ابزاری قدرتمند تبدیل شد. مشکلی که مانند روش اختلاف محدود وجود دارد نیاز به محاسبات بسیار زیاد است. این مشکل زمانیکه المان محدود برای حل میدانها در مدت هر گام زمانی[6] از مراحل شبیه‌سازی بکار برده می‌شود دو چندان خواهد شد. در نتیجه روش المان محدود اغلب همگام با مدل‌های دیگر برای محاسبات بکاربرده می‌شود. Kreefta و Wasynczuk کاربرد المان محدود بر پایه مدل‌های حالت[7] را نشان دادند [۳۸]. روش المان محدود برای تعیین پارامترهای مورد نیاز معادلات عمومی ماشین و مدل‌های مداری در مراجع [۲۹ و ۲۵]بکار برده شده است.

اخیراً نیاز به سادگی، سرعت و دقت و قبول مدل‌های ماشین در تحلیل گذاری شبکه [۴] و کنترل تحریک برای درایوهای سرعت متغیر، موجب شده تا مقالات بسیاری در مدل‌سازی گذرا و ماندگار ماشین با اثر اشباع

1- finite difference method
2- finite difference rectangles
3- circular cross-sections
4- finite element analysis
5- triangular mesh elements
6- time step
7- state model

نوشته شود. Shackshaft ضریب اشباع یکسانی برای محورهای مغناطیسی d و q فرض کرد، سپس اختلاف بین مقدار راکتانسهای اشباع محور d و q را مقداری ثابت در نظر گرفت. این دو فرض برای ماشینهای قطب صاف قابل قبول است، اما در حالت قطب برجسته مناسب نمی‌باشند. Demerdash و Ramshaw اشباع میدان مغناطیسی را توسط تحلیل عددی میدانهای مغناطیسی دو بعدی بررسی کردند که علاوه بر پیچیدگی محاسبات کامپیوتری، با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مطابقت نداشت. Ramshaw و Xi از تبدیل خطی Kron برای حالت غیر خطی و قطب صاف استفاده کردند و فقط مؤلفه اصلی توزیع آمپر دور و شار را ـ حتی در حالت اشباع ـ در نظر گرفتند [۹]. آنها دو سال بعد اشباع منغاطیسی را توسط رابطه بین شار و آمپر دور در ماشین قطب برجسته شبیه‌سازی کردند [۱۳]. بیشتر کارهای اخیر به بیان جملات تابع اشباع، در معادلات عمومی ماشین متمرکز شده‌اند. پیچیدگی معادلات بیان شده و مشکلات مربوط به برجستگی قطب و همچنین نیاز به دقت بهتر، سبب توسعه مدل‌های قدیمی با تقریب‌های جدید شده است. برای مثال Shi و Li منحنی مغناطیسی محور d و q اندازه‌گیری شده را به جای منحنی محور به‌کار بردند و Slemon مدارهای معادل مغناطیسی را برای مدل قسمتهای آهنی ماشین به طور مجزا و جداگانه به‌کار برد [۲۲]. Fahmy و Browne و Borton و دیگران به دلیل نیاز به سادگی، سرعت و دقت قابل قبول، بهبودی در مدل ماشین سنکرون قطب برجسته اشباع شده ایجاد کردند [۲۲]. آنها به بحث در دو موضوع، یکی بهبود مدل چگالی شار با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و دیگری بررسی مدل چگالی شار بر اساس مقایسه‌ای بین توزیع چگالی شار فاصله هوایی و گشتاورهای مدل شده و اندازه‌گیری شده تحت شرایط سکون[1] پرداختند. در زمانیکه همه توجهات به شبیه‌سازی اشباع شار اصلی متمرکز شده بود و از اشباع راکتانسهای نشتی صرف‌نظر می‌شد Flores و Buckley و Mcpherson اشباع را در راکتانسهای نشتی آرمیچر در نظر گرفتند. در اتصال کوتاه یا هر حادثه‌ای که جریان استاتور از 1.5 P.U. بیشتر شود، صرف‌نظر کردن از راکتانس نشتی صحیح نمی‌باشد و میزان اشباع راکتانسهای نشتی آرمیچر نقش مهمی در انتخاب مدار شکن‌ها (Circuit Breaker) و قدرت قطع آنها و همچنین گشتاور اتصال کوتاه دارد. در همان زمان Lipo و Consoli مدلی که اشباع راکتانس‌های نشتی را در ماشین‌های القایی در نظر می‌گرفت ارائه دادند.

با گذشت زمان دقت شبیه‌سازی اشباع شار اصلی فاصله هوایی روز به روز بیشتر شد. با وجود تمام این دقتها اختلاف زیادی بین زاویه رتور محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در ماشین سنکرون در حالت اشباع وجود داشت.

چنین مشکلی نشان می‌داد که اشباع در مدل‌های ماشین سنکرون کاملاً شبیه‌سازی نمی‌شود. اشباع معمولاً به شکل تعریف پارامترهای ماشین سنکرون در دو محور d و q به صورت جداگانه انجام می‌شد. در چنین حالتی هیچ پیوند مغناطیسی عرضی[2] بین محورهای d و q در نظر گرفته نمی‌شد و به همین دلیل چنین روشهایی اشباع را

1- Static conditions

2- magnetic cross-coupling