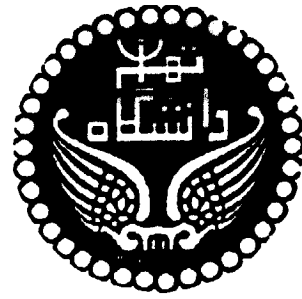


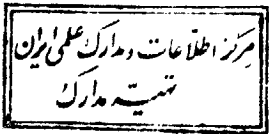
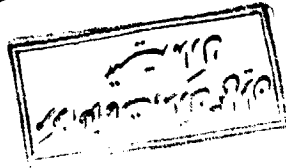
دانشگاه تهران



دانشکده فنی

گروه مهندسی برق و کامپیوتر

۸ / ۲۱ / ۶۳۷۶



پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق - قدرت

موضوع:

بررسی و مطالعه رفتار ژنراتور القایی سه فاز

شامل حالت‌های گذرا و ماندگار

توسط:

داود امینی

استاد راهنما:

مهندس سید محمد تقی نبوی

۰۰۹۹۵۹

زمستان ۱۳۷۵

۹۲۱۴

«بنام خدا»

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی برق
گرایش برق - قدرت

موضوع :

بررسی و مطالعه رفتار ژنراتور القایی سه فاز
شامل حالت‌های گذرا و ماندگار

از این پایان نامه در تاریخ ۲۵/۱۱/۲۰ در مقابل هیئت داوران دفاع بعمل آمد
و مورد تصویب قرار گرفت.

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی : دکتر خسروبرگی

مدیر گروه آموزشی : دکتر محمود کمره‌ای

نماینده تحصیلات تکمیلی گروه : دکتر پرویز جبه‌دار مارالانی

استاد راهنما : مهندس سید محمد تقی نبوی

استاد مشاور : دکتر حمید لسانی

عضو هیئت داوران : دکتر عابدی

عضو هیئت داوران : دکتر افشارنیا

۹۲۱۴

« بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ »

با سپاس و تشکر از:

- جناب آقای دکتر لسانی
- جناب آقای دکتر محمد حسن مدیر شانه‌چی
- سرکارخانم هاجر یعقوبی

سپاسگذاری و تشکر ویژه:

از جناب آقای مهندس محمدتقی نبوی، استاد راهنمای اینجانب که بدون مساعدتهای بیدریغ، نظارت و راهنمایی ایشان انجام پروژه حاضر میسر نبود، کمال تشکر را داشته و از خداوند متعال توفیق روزافزون ایشان را خواهانم.

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم،

که زندگی خود را وقف تربیت فرزندان خویش کرده‌اند.

فهرست

موضوع	صفحه
فصل اول: مقدمه	۱-۶
فصل دوم: مدل سازی عددی یک ژنراتور القایی	۷-۲۲
۱-۲ تاریخچه مدل دومحوری ماشین القایی	۷
۲-۲ مدل دومحوری ماشین القایی با صرف نظر کردن از اثر اشباع	۱۰
۱-۲-۲ معادلات تبدیل یافته ولتاژ	۱۲
۲-۲-۲ معادلات تبدیل یافته فلوی پیوندی	۱۴
۳-۲-۲ معادله تبدیل یافته گشتاور مغناطیسی	۱۶
۳-۲ مدل دومحوری ژنراتور القایی	۱۶
۴-۲ معادلات حالت	۱۷
۵-۲ مدل ژنراتور القایی در حالت ماندگار	۱۷
۶-۲ تئوری فضای برداری	۱۹
فصل سوم: راه اندازی ژنراتور القایی	۲۳-۴۳
۱-۳ پدیده تحریک خودی	۲۴
۱-۱-۳ تعبیر پروسه تحریک خودی براساس مدار معادل RLC	۲۴
۲-۱-۳ تعبیر پروسه تحریک خودی براساس سیستم های خودنوسانی	۲۶
۱-۲-۱-۳ توصیف سیستم خودنوسانی	۲۶
۲-۲-۱-۳ سیستم ماشین القایی - خازن بعنوان یک سیستم خودنوسانی	۲۸

- ۳-۱-۳ تعبیر پروسه تحریک خودی براساس پسماند مغناطیسی ۳۳
- ۳-۱-۳-۱ بررسی های تئوریکي ۳۵
- ۳-۱-۳-۲ اندرکنش بین مدها ۳۹
- ۳-۲ نکات عملی در راه اندازی ژنراتور القایی ۴۰

فصل چهارم: شبیه سازی کامپیوتری پدیده ولتاژسازی در ژنراتور القایی ۴۴-۸۲

- ۴-۱ ترکیب سیستم مورد بررسی و نوع آن ۴۴
- ۴-۲ توصیف اشباع ۴۶
- ۴-۳ بدست آوردن معادله حالت براساس متغییر جریان ۴۸
- ۴-۳-۱ تئوری ۴۹
- ۴-۱-۱-۳ مولفه های d و q معادلات دیفرانسیل ولتاژ ۵۰
- ۴-۱-۳-۲ فرم کلی معادلات جدید ۵۵
- ۴-۱-۳-۳ فرم کلی معادلات در یک دستة مرجع ویژه ۵۷
- ۴-۳-۲ مدل دومحوری بانک خازنی و بار ۵۹
- ۴-۳-۳ کاربرد معادلات بدست آمده ۶۰
- ۴-۴ بدست آوردن معادله حالت براساس متغییر فلوی پیوندی ۶۳
- ۴-۴-۱ تئوری ۶۴
- ۴-۵ مقایسه معادلات حالت برحسب جریان و فلوی پیوندی ۶۷
- ۴-۶ شبیه سازی کامپیوتری پدیده ولتاژسازی ۶۸
- ۴-۶-۱ نتایج کامپیوتری ۶۹
- ۴-۶-۱-۱ روش جریان ۷۰
- ۴-۶-۱-۲ روش فلوی پیوندی ۷۱
- ۴-۶-۲ مقایسه با نتایج عملی ۸۲

فصل پنجم: بررسی حالت ماندگار ژنراتور القایی ۸۳-۱۳۹

۱-۵ لیست پارامترها ۸۳

۲-۵ کارکرد حالت ماندگار ۸۴

۳-۵ تعیین حالت تعادل در فرکانس تحریک f ۸۵

۴-۵ شبکه معادل در فرکانس تحریک f ۸۶

۵-۵ روشهای بررسی حالت ماندگار ۸۶

۶-۵ محاسبه F و X_m براساس مدار معادل ماندگار ۸۷

۱-۶-۵ بدست آوردن F و X_m با متد امپدانس حلقه ۸۸

۱-۱-۶-۵ روش نیوتن رانسون برای حل معادلات تعادل ۸۹

۲-۱-۶-۵ روش حذف متغیر برای حل معادلات تعادل ۹۰

۲-۶-۵ بدست آوردن F و X_m با متد امپدانس گره ۹۱

۱-۲-۶-۵ روش تکرار برای حل معادلات تعادل ۹۲

۲-۲-۶-۵ روشهای پیشنهادی برای حل معادلات تعادل ۹۴

۳-۶-۵ مقایسه روشها ۹۵

۷-۵ محاسبه F و X_m به روش فرکانس مختلط ۹۸

۱-۷-۵ مدار معادل کاربردی برای محاسبه F و X_m ۹۸

۲-۷-۵ مدار معادل در محوری برای محاسبه F و X_m ۹۹

۸-۵ آنالیز حالت ماندگار ژنراتور القایی ۱۰۱

۱-۸-۵ محاسبه ولتاژ فاصله هوایی و مقاومت r_c ۱۰۱

۲-۸-۵ محاسبه کمیت‌های ولتاژ، جریان، توان و بازده ۱۰۳

۹-۵ عملکرد حالت ماندگار ژنراتور القایی ۱۰۳

۱-۹-۵ تئوری عملکرد حالت ماندگار ۱۰۴

۲-۹-۵ آنالیز عملکرد حالت ماندگار ۱۰۵

- ۳-۹-۵ عملکرد ماندگار: کنترل کردن سرعت ۱۰۶
- ۱-۳-۹-۵ مشخصه‌های کنترل سرعت ۱۰۷
- ۴-۹-۵ عملکرد ماندگار: کنترل کردن خازن ۱۱۸
- ۱-۴-۹-۵ روشهای تعیین خازنهای قطع ۱۱۹
- ۲-۴-۹-۵ استفاده از مدار معادله ماندگار برای تعیین C_I و C_{II} ۱۲۰
- ۳-۴-۹-۵ روش فرکانس مختلط برای محاسبه C_I و C_{II} ۱۲۳
- ۴-۴-۹-۵ مشخصه‌های کنترل خازن ۱۲۴
- ۵-۹-۵ عملکرد ماندگار: کنترل کردن امپدانس بار ۱۳۵
- ۱۰-۵ بهینه‌سازی کارکرد ژنراتور القایی براساس محدودیت‌های کاری ۱۳۷
- ۱۱-۵ عملکرد ماندگار ژنراتور القایی در یک مشخصه ۱۳۷

فصل هشتم: مثالهایی از حالت‌های گذرا در ژنراتور القایی ۱۴۰-۱۶۷

- ۱-۶ اتصال بار اهمی به ژنراتور القایی ۱۴۰
- ۲-۶ اتصال کوتاه سه فاز متقارن ۱۴۴
- ۳-۶ اتصال کوتاه دوفاز ۱۴۸
- ۴-۶ اتصال کوتاه دوفاز به زمین ۱۵۵
- ۵-۶ اتصال کوتاه یک فاز به زمین ۱۶۰
- ۶-۶ اثر شتاب روتور بر روی پدیده تحریک خودی ۱۶۵

فصل نهم: جمع‌بندی و پیشنهادات ۱۶۸-۱۷۱

لیست مراجع: ۱۷۲-۱۷۶

چکیده

هدف از پروژه حاضر بررسی رفتار ژنراتور آسنکرون (القایی) سه فاز بود. در سالهای اخیر کاربرد ژنراتور القایی در تولید برق میکرو هیدرو و بادی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. چراکه سادگی نگهداری و کاهش منابع انرژی سنتی و توانایی ژنراتورهای القایی برای تبدیل توان مکانیکی در فاصله وسیعی از سرعت روتور موجب شده تا به فکر جایگزینی انرژی باد بجای سوختهای فسیلی بیافتند. انبوه پژوهشها و مقالات منتشره پیرامون این نوع ژنراتور نشانگر توانایی آن در رفع مشکلات حاضر می باشد.

پس از بررسی سوابق تاریخی و مباحث مربوطه از ژنراتور القایی، ابزار لازم یعنی مدل ریاضی ماشین برای بررسی رفتار گذرا و ماندگار بدست آمده است. سپس با طرح مسئله مهم راه اندازی که شامل پدیده تحریک خودی است با سه تعبیر مختلف این پدیده مورد بررسی قرار گرفته و نکات عملی لازم برای شروع ولتاژ سازی و ایجاد تحریک خودی توضیح داده شده است.

با معلوم شدن خطوط اساسی بررسی و اصلاح مدل ریاضی قبلی با دخالت دادن اشباع مغناطیسی، رفتار گذرای ولتاژ سازی با دوروش جریان و شار به کمک کامپیوتر شبیه سازی گردید و نتایج این دوروش با نتایج عملی یک ژنراتور القایی کوچک ۱/۵ کیلووات مقایسه شد. مقدار خطا در محدوده قابل قبولی قرار داشته و نتایج تقریباً بر هم منطبق بودند. از آنجاییکه سرعت، بار، توان خروجی و فرکانس ژنراتور القایی به شدت به یکدیگر وابسته هستند، این امر تجزیه و تحلیل ماندگار را مشکل می سازد. بنابراین در بررسی ماندگار، با ارائه متدی جدید برای محاسبه فرکانس تولیدی و راکتانس مغناطیس کننده نشان داده شد که روشهای پیشنهادی سریعتر و راحت تر می باشند. با کمک روش پیشنهادی، عملکرد ژنراتور و محدودیتهای کاری آن مورد بررسی قرار گرفت و نتایج جالب و منسجمی برای کارکرد ژنراتور القایی سه فاز بدست آمد.

در آخر رفتار گذاری ژنراتور القایی ایزوله بهنگام وقوع اتصال کوتاه در ترمینالهای آن و همچنین اثر مهم شتاب روتور بر روی پسماند مغناطیسی و تحریک خودی که غالباً با آزمایشات عملی بررسی می شود، به کمک کامپیوتر شبیه سازی و بررسی شد.

در پایان پیشنهاداتی برای انجام پژوهش به منظور بهبود دقت محاسبات، تعیین محدودیت های کاری در شبکه بعمل آمده است.

فصل اول

مقدمه

در اوایل قرن بیستم به این واقعیت پی برده شد که ماشین القایی بعد از قطع ولتاژ خط ممکن است در حالت تحریک باقی بماند. ولی برای ایجاد و حفظ چنین تحریکی، شرایط خاصی مورد نیاز بود. محققان بعد از پژوهش و تحقیق دریافتند که با اتصال خازنهایی به ترمینال موتور القایی در حال چرخش (توسط توان مکانیکی بیرونی) شرط تحریک پایدار بوجود آمده و ولتاژ بطور پیوسته تولید می شود. بنابراین یک سیستم تولید جدیدی متولد شد که در آن ولتاژ خروجی شدیداً به مقدار خازن تحریک، سرعت روتور و بار بستگی داشت.

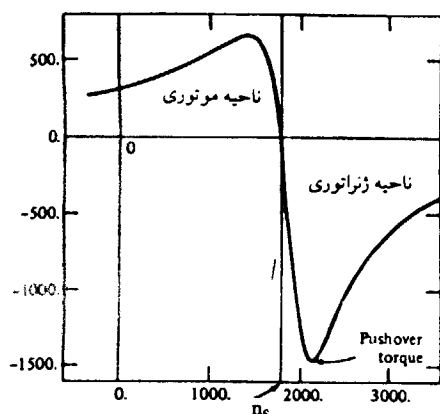
این نوع تولید و استفاده از آن تا سالهای ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ به ورطه فراموشی سپرده شد و مطالب کمی در مورد آن به رشته تحریر درآمد. علت این بی توجهی در اهمیت عملی کم چنین تولیدی مستتر بود. چراکه ژنراتور القایی به تنهایی توانایی کنترل ولتاژ و فرکانس

تولیدی را ندارد. از اینرو ژنراتورهای سنکرون در واحدهای تولیدی پیش گرفته و هر ساله مقدار زیادی سوخت صرف تولید برق ac می شود. طبیعی است با استفاده روزافزون آلترناتورهای سنکرون، از نظر مقادیر نامی، روشهای خنک سازی، تکنولوژی ساخت و مدلسازی این نوع ژنراتورها دستخوش رشد و تحول شدند. اما ساختار اساسی آنها بدون تغییر باقی ماند.

ولی بدلیل نگرانی از نرخ کاهشی شدید منابع انرژی تجدید ناپذیر و به طبع آن صعود چشمگیر قیمت نفت در سال ۱۹۷۳ از یک طرف و ظهور و رشد قطعات نیمه هادی قدرت و پیشرفت کنترل صنعتی از طرف دیگر، ژنراتور القایی بازگشت مجددی یافت. از آن زمان بدلیل قیمت بالای انرژی، قسمت مهمی از مسائل اقتصادی اغلب پروسه های صنعتی از جمله تولید برق به بازیابی انرژی تخصیص داده شد. طبق ادعای دانشمندان علوم اتمسفری، توان خام قابل دسترس در باد بسیار زیاد می باشد. آقای پالمر^(۱) که از پیشروان تحقیقات مربوط به انرژی باد است، مقدار توان کل اتمسفر را 10^{14} MW محاسبه کرده است و ادعا می کند 10^6 MW آن قابل بازیابی می باشد. اخیراً آقای فون ارکس^(۲) با محاسبات دقیقی این توان را 10^6 MW تخمین زده است. این مقدار حداقل 10^6 برابر بزرگتر از توان هیدرولیک موجود در جهان است [۱]. از اینرو علاقمندی زیادی برای استفاده از انرژی های تجدید پذیری مثل باد جهت جایگزینی سوخت و کاهش نرخ مصرف سوخت های فسیلی ایجاد گردید و توجه به ژنراتور القایی بدلیل مزایای خاصی که دارد بیشتر شد. ماشین القایی دارای منحنی مشخصه گشتاور - سرعت مثل شکل (۱-۱) می باشد. طبق این مشخصه اگر موتور القایی سرعتی بیش از n_s داشته باشد جهت گشتاور القایی معکوس شده و بعنوان ژنراتور عمل خواهد کرد. با افزایش گشتاور اعمالی به شفت، مقدار توان تولیدی نیز افزایش می یابد. همانطوریکه در شکل (۱-۱) معلوم است، در مد

۱- Palmer C. Putnam

۲- W.S. Von Arx



شکل ۱-۱ - مشخصه گشتاور- سرعت ماشین القایی.

ژنراتوری یک گشتاور القایی ماکزیمم دارد که با افزایش توان ورودی، گشتاور^(۳) القایی به این حد ماکزیمم رسیده و بعد از آن ژنراتور به ناحیه ناپایدار وارد می شود. در این حالت فلوی پیوندی بین روتور و استاتور شکسته شده و بطور ناگهانی روتور آزادانه می چرخد، در نتیجه هیچ توانی تولید نمی شود.

ماشین القایی در مد ژنراتوری دارای محدودیتهای جدی است. بعلت عدم وجود مدار تحریک جداگانه، نمی تواند توان راکتیو تولید کند. بنابراین مصرف کننده توان راکتیو بوده و برای حفظ میدان مغناطیسی استاتور نیاز به یک منبع توان راکتیو بیرونی دارد. علاوه بر این، چنین منبع توان راکتیوی بعلت عدم وجود جریان تحریک مستقل می تواند به کنترل ولتاژ خروجی نیز کمک کند. چراکه در کار ژنراتور القایی اشباع هسته نقش عمده ای دارد و برای دستیابی به یک سطح ولتاژ معین، خازنهای تحریک باید جریان مغناطیس کننده متناظر با آن سطح را تولید کنند.

در راه اندازی ژنراتور القایی پدیده ای بنام تحریک خودی مطرح می شود که بر اساس آن ولتاژ سازی صورت می گیرد. از این نظر ژنراتور القایی بسیار شبیه ژنراتور DC شنت بوده و در واقع خازنهای تحریک معادل مقاومت تحریک (یا میدان) در ژنراتور DC شنت می باشند. همچنین بطور مشابه با اضافه کردن خازنهای سری می توان ژنراتور القایی را بصورت کمپوند اضافی بکار برد. با افزایش توان راکتیو ناشی از خازنهای سری، مقداری از توان راکتیو مورد نیاز بار جبران شده و از افت ولتاژ جلوگیری می شود. طبق مشخصه گشتاور - سرعت، با تغییر بار فرکانس ژنراتور القایی تغییر می کند. اما از آنجاییکه این

۳- Pull-out یا Pushover

منحنی در محدوده نرمال کاری شیب تندی دارد، تغییر فرکانس یا لغزش معمولاً کمتر از پنج درصد می‌باشد. چنین تغییری در فرکانس ژنراتورهای ایزوله و متصل به شبکه قابل قبول است.

مزایای یک ژنراتور القایی در کاربرد ایزوله بهای کم واحد تولیدی، روتور بدون جاروبک، ساختمان ساده و محکم (روتور قفس سنجابی)، عدم وجود منبع DC جداگانه برای تحریک، نگهداری آسان می‌باشد و در ضمن لازم نیست که روتور را بطور مداوم در سرعت ثابتی چرخاند. بخاطر مزایای فوق و سادگی کنترل نسبت به ژنراتور سنکرون و قابلیت اطمینان بالا باعث شده این ژنراتور انتخاب بسیار مناسبی برای نیروگاههای بادی و آبی کوچک یا کاربرد ژنراتورهای تکمیلی و اضطراری برای شبکه قدرت موجود باشد. در کاربردهای متصل به شبکه قدرت با استفاده از خازن، تصحیح ضریب توان صورت گرفته و ولتاژ ترمینال را می‌توان به کمک بار یا خود شبکه قدرت کنترل کرد [۲].

اصولاً سیستمهای مبدل انرژی باد به الکترونیسته را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد [۳]:

I - سیستم سرعت متغیر و فرکانس ثابت (VSCF).

II - سیستم سرعت ثابت و فرکانس ثابت (CSCF).

III - سیستم سرعت متغیر و فرکانس متغیر (VSVF).

در اینجا برای اینکه از کلیت موضوع کاسته نشود و بحث منحصر به نیروگاههای

بادی نگردد، در سرتاسر پروژه فرض می‌شود سیستم VSVF باشد. همچنین دو نوع توربین

در بررسی می‌توان در نظر گرفت:

I - توربین قابل تنظیم و کنترل.

II - توربین بدون تنظیم.

در این پروژه توربین قابل کنترل مورد نظر بوده و در هر شبیه سازی و بررسی

محدودیت‌های لازم اعمال شده است.

مقصود از این پروژه بررسی دقیق و شناخت ژنراتور آسنکرون (القایی) سه فاز

می‌باشد. در سالهای قبل از ۱۹۸۰ بیشتر سعی می‌شد بطور تحلیلی و با بدست آوردن فرمولهای بفرم بسته به بررسی ژنراتور القایی پردازند. برای چنین منظوری طبق عادت از گذرای مدار استاتور صرفنظر می‌شد [۴]. ولی بعلاوه اثر شدید مدار استاتور در پروسه‌های گذرای ژنراتور القایی و حتی موتور القایی ثابت می‌شود [۵] که خطای ناشی از صرفنظر کردن ثابتهای زمانی استاتور در دستگاههای مرجع مختلف مقدار متفاوتی داشته و نمی‌توان در تمام حالتها گذرا چنین فرضی را بکار برد. از اینرو در فصل دوم پروژه سعی شده است که ابزار دقیقی یعنی مدل ریاضی مناسب برای بررسی انتخاب شود بطوریکه مطمئن از جوابهای گذرا بود. در این فصل دو تئوری اساسی ماشینهای الکتریکی توضیح داده شده و در آخر با انتخاب مدل دو محوری بحث به پایان رسیده است.

در فصل سوم راه اندازی و پدیده تحریک خودی مورد بررسی کامل قرار گرفته است. از آنجاییکه این پدیده در سایر سیستمهای الکتریکی نیز ظاهر می‌شود بهمین جهت سعی گردیده از تعبیرهای مختلف به توضیح فیزیک پروسه تحریک خودی استفاده شود. بعد از توضیح پدیده بر اساس مدارهای RLC، به تشریح آن طبق سیستمهای خودنوسانی ادامه داده و دید قویتری نسبت به ایجاد نوسانات ارائه شده است. در قسمت آخر فصل سوم بررسی پدیده تحریک خودی بر اساس پسماند مغناطیسی انجام پذیرفته و با بیان چند توصیه عملی برای راه اندازی بحث به پایان رسیده است.

در فصل چهارم با مطرح کردن اثر اشباع مغناطیسی متقابل بین محورهای d و q ، اقدام به اصلاح مدل بدست آمده در فصل دوم شده است. برای مقایسه جوابهای تئوری بخاطر بحثهایی که همواره برای انتخاب بردار حالت (جریان یا شار) وجود دارد، معادلات حالت برای هر دو متغیر حالت بدست آمده و در آخر به کمک کامپیوتر و برنامه نویسی حل معادلات دیفرانسیل غیر خطی انجام پذیرفته و همچنین این نتایج با نتایج عملی موجود مقایسه گردیده است.

بررسی عملکرد ماندگار ژنراتور القایی در فصل پنجم صورت گرفته است، با توجه

به اینکه سه عنصر بیرونی سرعت، مقدار خازن تحریک و بار قابل کنترل می باشد بهمین جهت عملکرد ماندگار بر اساس این سه کنترل انجام شده و نتایج بصورت گرافیکی برای یک ژنراتور نمونه ارائه شده است. در آخر فصل فوق برای جلوگیری از سردرگمی تمامی محدودیتهای تعریف شده برای کار پایدار در یک شکل خلاصه می شود.

در فصل ششم مثالهایی از حالت‌های گذرا بهنگام اتصال کوتاه شبیه سازی گردیده است. در هر مورد بعد از تعیین شرایط تبدیل یافته، از حل معادلات حالت جریان کمیتهای الکتریکی بدست آمده است. همچنین در آخرین قسمت فصل ششم اثر شتاب روتور روی نحوه شروع ولتاژ سازی و تحریک بررسی شده که قبلاً در فصل سوم طی نکات عملی توضیح داده شده بود.

سرانجام در فصل هفتم پروژه، بررسی مختصری از عوامل خطا و طرق کاهش آن و افزایش دقت روش پیشنهادی بعمل آمده و پیشنهادهای به منظور ادامه کار صورت گرفته است. البته روشن می باشد که موفقیت در ادامه این تحقیق مانند هر پژوهش دیگر محتاج صرف وقت و نیروی کافی خواهد بود.

امید است این پروژه، انگیزه لازم را برای ادامه کار در آینده فراهم نماید. و مقبول نظر خواننده افتد.

فصل دوم

مدل سازی عددی یک ژنراتور القایی

در این قسمت مدل ریاضی ماشین القایی بررسی می شود تا بتوان با استفاده از آن در اغلب شرایط مشخصات ماشین را بدست آورد. اصولاً اساس توسعه و طرح این مدلها، جایگزینی ماشین واقعی با ماشین معادل یا تبدیل یافته می باشد و هدف از ماشین معادل نیز دستیابی به معادلاتی است که نسبت به معادلات اصلی راحتتر حل شوند.

عمل ریاضی که توسط آن متغیرهای ماشین واقعی مثل جریانها، ولتاژها بصورت متغیرهای ماشین معادل بیان می گردند، تبدیل نامیده می شود. تبدیلهای ممکن است حقیقی یا مختلط باشند، یعنی تمام درآیه های ماتریس تبدیل از کمیتهای حقیقی یا مختلط تشکیل شوند. در ضمن تبدیلهای همیشه دارای معنی فیزیکی نیستند، بلکه امکان دارد صرفاً یک مفهوم ریاضی باشند [۶].

دو روش اساسی برای بدست آوردن ماتریس تبدیل یک ماشین الکتریکی وجود دارد. در روش اول از تئوریهای موجود در جبر خطی و ماتریسها بدون هیچگونه تأمل فیزیکی استفاده می شود ولی در روش دوم دید فیزیکی دخالت دارد. سیر تاریخی تبدیلهای حاکی از کاربرد روش دوم است، در اینجانباز تبدیلهایی که به کمک فیزیک حاکم بر مسئله بدست آمده، استفاده خواهد شد.

۱-۲ - تاریخچه مدل دو محوری ماشین القایی

مدل ریاضی ماشین القایی بر حسب کمیتهای فازی از معادلات دیفرانسیل خطی تشکیل یافته است که با فرض سرعت ثابت روتو، ضرایب آنها اندوکتانس های پریودیک

متغیر با زمان می‌باشند. درک طبیعت رفتار ماشین در رابطه با اندوکتانس‌های متغیر بسیار مشکل است.

در اواخر سال ۱۹۲۰ پارک^(۱) شیوه جدیدی برای آنالیز ماشین الکتریکی پیشنهاد کرد. او متغیرهای استاتور ماشین سنکرون را به دستگاه مرجعی که روی روتور قرار دارد، تبدیل کرد. تبدیل پارک که انقلابی بزرگ در آنالیز ماشین‌های الکتریکی بوجود آورد، دارای خاصیت منحصر به فردیست که باعث حذف اندوکتانس‌های متغیر با زمان در معادلات ولتاژ ماشین سنکرون می‌شود که این تغییرات از حرکت نسبی و تغییر رلوکتانس مغناطیسی بوجود می‌آیند. بنابراین از آن زمان یک ساده سازی بزرگی در توضیح ریاضی ماشین سنکرون بدست آمد.

بعدها استانلی^(۲)، کران^(۳) و بررتن^(۴) کار پارک را برای آنالیز ماشین القایی توسعه دادند. آنها سه دستگاه مرجع متفاوت را بکار بردند:

- ۱- دستگاه مرجع ساکن: دستگاه مرجعی که ساکن است.
- ۲- دستگاه مرجع سنکرون: دستگاه مرجعی که با سرعت سنکرون می‌چرخد.
- ۳- دستگاه مرجع روتور: دستگاه مرجعی که بر روی روتور قرار داشته و هم سرعت با آن می‌چرخد.

در سال ۱۹۶۵، کراس متوجه شد که تمامی تبدیلهای حقیقی بکار رفته در آنالیز ماشین‌های القایی (آسنکرون) توسط یک تبدیل عمومی قابل بیان است، بطوریکه با انتقال متغیرهای روتور و استاتور به دستگاه مرجعی که با سرعت زاویه‌ای دلخواهی می‌چرخد و یا ساکن است، اندوکتانس‌های متغیر با زمان حذف می‌گردند. بنابراین، تمام تبدیلهای حقیقی شناخته شده با نسبت دادن سرعت گردش مناسب به دستگاه مرجع دلخواه (اختیاری) بدست خواهند آمد.

۱-R.H.Park

۲-H.C.Stanly

۳-G.Cron

۴-D.S.Bererton

معنی فیزیکی تبدیل پارک و سایر تبدیلهایی ماتریسی حقیقی، تعریف یک مجموعه جدیدی از متغیرهای استاتور و روتور (odq) بر حسب متغیرهای سیم بندی واقعی (abc) است. کمیت‌های جدید از تصویر متغیرهای واقعی روی مجموعه دو محوری جدید یعنی d و q بدست می‌آیند و مؤلفه صفر یا 0 توزیع نیروی محرکه مغناطیسی برآیند را در سرتاسر فاصله هوایی یکسان نگه می‌دارد. از نظر ریاضی، تبدیل پارک فقط یک تبدیل خطی است که ماتریس اندوکتانس استاتور و روتور را قطری می‌سازد و همه اندوکتانس‌ها را ثابت و بدون تغییر می‌کند. بنابراین، در آنالیز گذرای ماشینهای سنکرون و القایی اغلب از معادلات تبدیل یافته استفاده می‌شود.

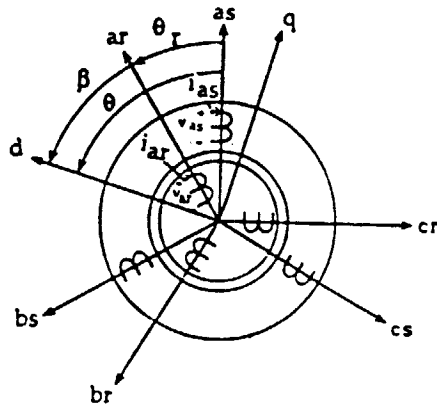
از نظر تاریخی، تبدیلهای فوق در مطالعات گوناگون برای ماشین القایی یا آسنکرون بکار برده شده است. در بررسی ماشینهای سنکرون بخصوص قطب برجسته فقط تبدیل پارک مؤثر می‌باشد.

ذکر این نکته ضروری بنظر می‌رسد که در موارد زیادی اندوکتانس‌ها، تغییرات سینوسی ایده‌آل ندارند یا ضرایب اندوکتانس‌ها یک تقارن معین را نشان نمی‌دهند. در چنین حالتی با بکار بستن تبدیلهای فوق، به علت عدم حذف جملات وابسته به مکان، جوابی برای معادلات حاصل نمی‌شود. ولی فرمول سازی در دامنه زمان روشی برای حل معادلات پیشنهاد می‌کند که ما را به پارامترهای ماشین محدود نمی‌سازد. بعلاوه مدل دامنه زمان جواب گذرا را حتی در صورت وجود عدم تقارن و غیر خطی بودن، مستقیماً می‌دهد. ساده‌ترین روش دستیابی به مدل دامنه زمان، نوشتن معادلات دینامیکی حرکت به فرم معادلات حالت است.

در بخش‌های ۲ تا ۵ این فصل، مدل دو محوری ماشین القایی بر اساس تئوری جامع ماشینها و ماتریس تبدیل حقیقی پرداخته می‌شود. ولی برای کامل شدن بحث، تئوری فضای برداری نیز توضیح داده خواهد شد که ماتریس تبدیل در آن مختلط است.

۲-۲ - مدل دو محوری ماشین القایی با صرف نظر کردن از اثر اشباع

ماشین‌های القایی عموماً تحریک استاتوری داشته و در روتور فقط جریان‌هایی القاء می‌شود. روتور ممکن است از نوع قفسی یا از نوع روتور سیم پیچی باشد. در اینجا یک ماشین القایی معمولی با روتور و استاتور سیلندری شکل و متقارن با سیم پیچی‌های سه فاز



متعادل در نظر گرفته شده است. شکل (۱-۲) چنین ماشینی را بطور شماتیک نمایش می‌دهد. حال سیم پیچی سه فاز به سیم پیچی دو فاز تبدیل می‌گردد، بطوریکه محور دومین فاز معادل ۹۰ درجه باشد. در اینصورت سیم‌بندی‌های استاتور به دو کویل محوری ثابت d_s و q_s تبدیل می‌گردند.

شکل ۱-۲ - دیاگرام شماتیکی ماشین القایی.

همانطوریکه در بالا اشاره شد، روتور یا از نوع قفسی است و یا از نوع سیم پیچی می‌باشد. در نوع دوم امکان تبدیل سیم پیچها به کویل‌های محوری d و q ثابت وجود دارد ولی مسئله در مورد روتور قفسی کمی پیچیده و بفرنج است. اما تا آنجاییکه روتور بتواند صرف‌نظر از هارمونیک‌های فضایی، نیروی محرکه عکس‌العمل آرمیچری مشابه روتور سیم پیچی تولید کند، امکان بیان آن توسط کویل‌های محوری ثابت وجود دارد. کویل‌های معادل روتور با d_r و q_r نشان داده شده است.

دستگاه مرجع dq را در نظر بگیرید که با سرعت دلخواه ω می‌چرخد. ابتدا سیم‌بندی استاتور به دو سیم پیچ در دستگاه dq تبدیل می‌گردد، سپس سیم‌بندی‌های روتور به دستگاه فوق انتقال می‌یابد. برای این منظور از تبدیل پارک استفاده می‌شود. همانطوریکه بعداً خواهیم دید، این تبدیل دارای خاصیت پایایی توان است. این تبدیل را در دستگاه مرجع دلخواه که دارای سرعت ω می‌باشد در نظر بگیرید. بنابراین برای تبدیل متغیرهای

استاتور و روتور در دستگاه مرجع دلخواه تبدیلهای عمومی زیر تعریف می شود :

$$f_{odqs} = K_s f_{abcs} \quad \text{ولت، آمپر، وبردور} \quad (۲-۱)$$

$$f_{odqr} = K_r f_{abcr} \quad \text{ولت، آمپر، وبردور} \quad (۲-۲)$$

ماتریسهای تبدیل نیز به شرح زیر است :

$$K_s = \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{1/2} & \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{1/2} & \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{1/2} \\ \cos\theta & \cos\theta^- & \cos\theta^+ \\ \sin\theta & \sin\theta^- & \sin\theta^+ \end{bmatrix} \quad (۲-۳)$$

$$K_r = \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{1/2} & \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{1/2} & \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{1/2} \\ \cos\beta & \cos\beta^- & \cos\beta^+ \\ \sin\beta & \sin\beta^- & \sin\beta^+ \end{bmatrix} \quad (۲-۴)$$

که در این روابط داریم :

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad , \quad \theta^- = \theta - \frac{2\pi}{3} \quad , \quad \theta^+ = \theta + \frac{2\pi}{3} \quad (۲-۵)$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi + \theta_r(0) \quad , \quad \beta = \theta - \theta_r \quad , \quad \beta^- = \beta - \frac{2\pi}{3} \quad , \quad \beta^+ = \beta + \frac{2\pi}{3} \quad (۲-۶)$$

در روابط فوق f بیانگر ولتاژ، جریان یا فلوی پیوندی است و زیراندیس های s و r به

ترتیب استاتور و روتور را نشان می دهند. θ و β جابجایی زاویه ای محور فاز a استاتور و

روتور نسبت به محور d دستگاه مرجع دلخواه می باشد (شکل ۱-۲). ω_r و ω به ترتیب

سرعت زاویه ای دستگاه مرجع دلخواه و روتور است.

بر اساس اصول یکایی کردن اگر مقادیر پایه در مدار استاتور واحد گرفته شود [۷]:

$$V_{asB} = 1, I_{asB} = 1, T_B = 1 \quad (۲-۷)$$

در اینصورت مقادیر پایه در مدار روتور برابر خواهد شد با:

$$V_{arB} = \frac{N_r}{N_s}, I_{arB} = \frac{N_s}{N_r}, L_{aarB} = R_{arB} = \left(\frac{N_r}{N_s}\right)^2, L_{abrB} = \frac{N_{ra}N_{rb}}{N_s^2} \quad (۲-۸)$$

در اینجا V_a و I_a کمیتهای جریان و ولتاژ، L_{aa} ، L_{ab} و R_a به ترتیب اندوکتانسهای

خودی و متقابل و مقاومت اهمی می باشند. با این عمل کمیتهای مدار روتور نسبت به

کمیتهای واقعی مدار استاتور یکایی می شوند و با توجه به مقادیر پایه (۲-۷) و (۲-۸) این

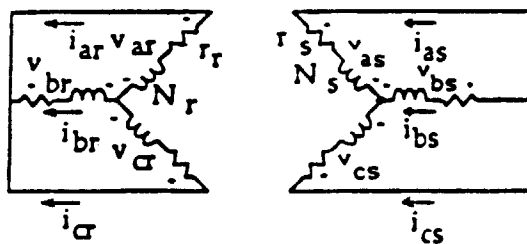
یکایی کردن مشابه انتقال کمیتهای ثانویه یک ترانسفورماتور به اولیه آن است.

۲-۲-۱ - معادلات تبدیل یافته ولتاژ

شکل (۲-۲) دیاگرام شماتیکی سیم بندیهای روتور و استاتور را نشان می دهد.

معادلات ولتاژ، فلوی پیوندی و گشتاور الکترو مغناطیسی برحسب متغیرهای ماشین که به

طرف استاتور انتقال یافته است، بشرح زیر می باشد:



شکل ۲-۲ - دیاگرام شماتیکی سیم بندی استاتور و روتور.

$$V_{abc} = R i_{abc} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc} \quad (۲-۹)$$

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_{abcs} \\ V_{abcr} \end{bmatrix}, i_{abc} = \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix}$$

که در آن:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_s \mathbf{I}_r & \circ \\ \circ & r_r \mathbf{I}_r \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_{abcr} \\ \lambda_{\bar{a}b\bar{c}r} \end{bmatrix}$$

در ماتریس‌های فوق \mathbf{I}_r ماتریس واحد و $f_{abcs} = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}]^T$ و همچنین $f_{\bar{a}b\bar{c}r} = [f_{\bar{a}r} \ f_{\bar{b}r} \ f_{\bar{c}r}]^T$ که f و \bar{f} بیانگر کمیت‌های ولتاژ یا جریان یا شار پیوندی بوده و مغناطیسی نیز به ترتیب خواهیم داشت:

$$\boldsymbol{\lambda}_{abc} = \mathbf{L} \mathbf{i}_{abc} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{\bar{a}b\bar{c}r} \end{bmatrix} \quad \text{و بر - دور} \quad (2-11)$$

$$T_e = - \left(\frac{p}{r} \right) \cdot (i_{abcs})^T \cdot \left[\frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} \right] \cdot i_{\bar{a}b\bar{c}r} \quad \text{نیوتن - متر} \quad (2-12)$$

به کمک روابط (2-1) و (2-2) معادل روابط فوق در دستگاه مرجع دلخواه بدست می‌آید. ماتریس تبدیل کمیت‌های استاتور و روتور را T نامیده وابتدادر معادله ولتاژ شروع می‌کنیم، بنابراین خواهیم داشت:

$$\mathbf{T} \triangleq \begin{bmatrix} K_s & \circ \\ \circ & K_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}^{-1} \triangleq \begin{bmatrix} K_s^{-1} & \circ \\ \circ & K_r^{-1} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{TV}_{abc} &= \mathbf{TR} (\mathbf{T}^{-1} \mathbf{i}_{odq}) + \mathbf{T} \frac{d}{dt} (\mathbf{T}^{-1} \boldsymbol{\lambda}_{odq}) \\ \mathbf{V}_{odq} &= \mathbf{R} \mathbf{i}_{odq} + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\lambda}_{odq} + [\mathbf{T} \frac{d}{dt} (\mathbf{T}^{-1})] \boldsymbol{\lambda}_{odq} \end{aligned} \quad (2-14)$$

با انجام عملیات ریاضی روی جمله آخر رابطه نهایی زیر نتیجه می‌شود:

$$\mathbf{V}_{odq} = \mathbf{R} \mathbf{i}_{odq} + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\lambda}_{odq} + \mathbf{W} \boldsymbol{\lambda}_{odq} \quad (2-15)$$

که در آن:

$$\mathbf{V}_{odq} = \begin{bmatrix} V_{odqs} \\ V_{odqr} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_{odq} = \begin{bmatrix} i_{odqs} \\ i_{odqr} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\lambda}_{odq} = \begin{bmatrix} \lambda_{odqs} \\ \lambda_{odqr} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \omega \mathbf{k} & \circ \\ \circ & (\omega - \omega_r) \mathbf{k} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k} = \begin{bmatrix} \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \circ \\ \circ & -1 & \circ \end{bmatrix}$$

در ماتریس‌های فوق $f_{odqs} = [f_{os} \ f_{ds} \ f_{qs}]^T$ و $f_{odqr} = [f_{or} \ f_{dr} \ f_{qr}]^T$ که f

بیانگر کمیت‌های ولتاژ، جریان و شار پیوندی می‌باشد. از مقایسه (۲-۹) و تبدیل یافته‌اش

یعنی رابطه (۲-۱۵) می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال تبدیل \mathbf{T} جمله اضافی $\mathbf{W}\boldsymbol{\lambda}_{odq}$ بوجود آمده است که معمولاً ولتاژ چرخشی نامیده می‌شود.

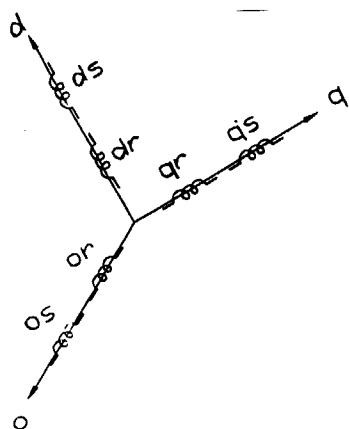
۲-۲-۲ معادلات تبدیل یافته فلوی پیوندی

برای فلوی پیوندی از روابط (۲-۱۱) و (۲-۱۳) معادلات تبدیل یافته را بدست

می‌آوریم:

$$\boldsymbol{\lambda}_{odq} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s \mathbf{L}_s \mathbf{K}_s^{-1} & \mathbf{K}_s \mathbf{L}_{sr} \mathbf{K}_r^{-1} \\ \mathbf{K}_r (\mathbf{L}_{sr})^T \mathbf{K}_s^{-1} & \mathbf{K}_r \mathbf{L}_r \mathbf{K}_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{odqs} \\ i_{odqr} \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

اگر به سیم پیچی‌های معادل مطابق شکل (۲-۳) توجه شود، بدون هیچگونه



شکل ۲-۳ - سیم پیچی‌های معادل

محاسبه‌ای در مورد ماتریس‌های اندوکتانس تبدیل

یافته می‌توان نتیجه گرفت. ماتریس‌های $\mathbf{K}_s \mathbf{L}_s \mathbf{K}_s^{-1}$

و $\mathbf{K}_r \mathbf{L}_r \mathbf{K}_r^{-1}$ قطری هستند. چرا که در اثر

دگردیسی مشابه سیم بندی‌های استاتور و روتور

به سیم پیچی‌های متعامد تبدیل شده‌اند. بطوریکه

اولاً مقادیر اندوکتانس‌ها ثابت هستند، ثانیاً

اندوکتانس متقابل بین سیم بندی‌های معادل

استاتور یا روتور روی هر دو محور d و q صفر می‌باشند. این در واقع ناشی از خاصیت مهم اینگونه تبدیلهای است که قبلاً اشاره شد. همانطوریکه در ابتدا گفتیم وجود محور o جنبه ریاضی دارد و در حقیقت مطرح نمی‌باشد.

بدلیل احکام یکایی کردن اندوکتانس‌های مغناطیسی با هم برابر می‌باشند، پس روی

محورهای d و q داریم [۷]:

$$L_{qs} = L_{dr} = L_{dsr} = L_m, \quad L_{qs} = L_{qr} = L_{qsr} = L_m \quad (۲-۱۸)$$

با توجه به توضیحات فوق می‌توان ماتریس‌های اندوکتانس تبدیل یافته را نوشت:

$$K_s L_s K_s^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} & \circ & \circ \\ \circ & L_{ls} + L_m & \circ \\ \circ & \circ & L_{ls} + L_m \end{bmatrix}; \quad K_s L_{sr} K_r^{-1} = \begin{bmatrix} \circ & \circ & \circ \\ \circ & L_m & \circ \\ \circ & \circ & L_m \end{bmatrix}$$

$$K_r L_r K_r^{-1} = \begin{bmatrix} L_{lr} & \circ & \circ \\ \circ & L_{lr} + L_m & \circ \\ \circ & \circ & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \quad (۲-۱۹)$$

از روابط (۲-۱۷) و (۲-۱۹) براحتی فلوی پیوندی محورهای d و q برای استاتور

و روتور بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{os} \\ \lambda_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} & \circ \\ \circ & L_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{or} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & L_m \\ L_m & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & L_m \\ L_m & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (۲-۲۰)$$

نکته‌ای که بایستی دقت شود از آنجاییکه تحریکی برای روتور وجود ندارد و

جریانهای مؤلفه صفر استاتور (طبق رابطه (۲-۲۰)) فقط فلوهای پراکندگی را تولید

خواهند کرد و در ایجاد شارهای گذرنده از فاصله هوایی دخالتی ندارند پس همواره

خواهیم داشت:

$$V_{odqr} = 0, \quad i_{or} = 0 \quad (2-21)$$

۳-۲-۲ - معادله تبدیل یافته گشتاور مغناطیسی

حال معادله تبدیل یافته گشتاور مغناطیسی T_e را بدست می آوریم. از روابط

(۲-۱۲) و (۲-۱۳) داریم:

$$T_e = -\left(\frac{P}{2}\right)(K_s^{-1} i_{odqs})^T \cdot \left[\frac{\partial}{\partial \theta_r}(K_s^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot K_r)\right] K_r^{-1} \cdot i_{odq} \Rightarrow$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right) \cdot (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (2-22)$$

بنابراین معادلات مکانیکی حاکم بر ماشین القایی عبارتند از:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right) \cdot (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (2-22)$$

$$\left(\frac{J}{P}\right) J \cdot \frac{d}{dt} \omega_r = T_e - T_m \quad (2-23)$$

در این روابط P تعداد قطبها، J ممان اینرسی روتور و T_m گشتاور مکانیکی (بار)

می باشند. در آخرین قسمت بهتر است توان حقیقی بر حسب متغیرهای تبدیل یافته بدست

آورد. از آنجاییکه K_r و K_s ماتریس های متعامد هستند، در نتیجه خاصیت پایایی توان

برقرار خواهد بود:

$$P(t) = V_{(abcs)}^T i_{abcs} = (K_s^{-1} V_{odqs})^T (K_s^{-1} i_{odqs}) = (V_{odqs})^T [(K_s^{-1})^T (K_s^{-1})] i_{odqs}$$

$$P(t) = V_{os} i_{os} + V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \quad (2-24)$$

۳-۲ - مدل دو محوری ژنراتور القایی

اکثر ژنراتورهای القایی روتور قفس سنجابی دارند. ولی ماشینهای قفس سنجابی با

ماشین روتور سیم پیچی معادل قابل نمایش هستند. بنابراین مدل ریاضی ژنراتور القایی با

روتور سیم پیچی بدست

آورده می شود. این مدل را

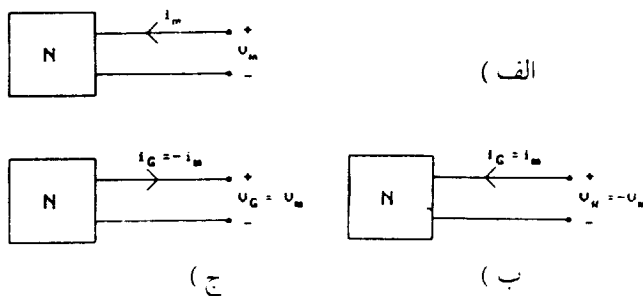
می توان از مدل موتوری با

اصلاح سیستم از صورت

مصرف کننده به تولید کننده

نتیجه گرفت. طبق شکل

(۲-۴) بایستی پلارایته جریان



شکل ۲-۴ - الف) سیستم موتوری. ب و ج) سیستم ژنراتوری.

یا ولتاژ را در معادلات موتوری عوض کرد. بنابراین اگر تغییر پلارایته ولتاژ را اعمال نماییم

معادلات ژنراتوری زیر بدست می آید:

$$V_{abc} = -Ri_{abc} - \frac{d}{dt} \lambda_{abc} \quad (۲-۲۵)$$

$$\left(\frac{P}{P}\right) J \frac{d}{dt} \omega_r = T_m - T_e \quad (۲-۲۶)$$

سایر معادلات بدست آمده در بخش ۲-۳ بدون تغییر در حالت ژنراتوری نیز به

قوت خود برقرار می باشند.

۲-۴ - معادلات حالت

با توضیحاتی که در بخشهای ۲-۲ و ۲-۳ داده شد، می توان معادلات حالت را از

روابط (۲-۱۵) و (۲-۱۷) و (۲-۲۰) و (۲-۲۳) بر حسب متغیر حالت فلوی پیوندی یا

جریان بدست آورد. سپس به بررسی رفتار ژنراتور القایی پرداخت.

۲-۵ - مدل ژنراتور القایی در حالت ماندگار

در حالت ماندگار تمامی متغیرهای ولتاژ و جریان و شار به حالت پایدار می رسند و

با صرف نظر کردن از تمامی هارمونیک های فضایی و زمانی mmf شکل موجهای ولتاژ و

جریان القایی سینوسی خواهند بود. ضمناً از تلفات هسته نیز صرف نظر می شود. پس برای

ماشین متقارن جریانه‌ها و ولتاژها سه فاز متعادل با فرکانس ω_e می‌باشند.

$$f_{abcs} = f_s [\cos\theta_e \cos\theta_e^- \cos\theta_e^+]^T, \quad \theta_e = \int_0^t \omega_e(\xi) d\xi + \theta_e(0) \quad (2-27)$$

$$\theta_e^- = \theta_e - \frac{2\pi}{3}, \quad \theta_e^+ = \theta_e + \frac{2\pi}{3}$$

با اعمال تبدیل K_s داریم:

$$f_{odqs} = K_s f_{abcs} = k f_s [\cos(\theta_e - \theta) \quad -\sin(\theta_e - \theta)]^T$$

$$k = \left(\frac{3}{2}\right)^{1/2}$$

حال روابط فیزیکی بین کمیت‌های تبدیل یافته و اصلی را پیدا می‌کنیم:

$$f_{ds} = k f_s \cos(\theta_e - \theta) = \text{Re}[k f_s \exp(j((\omega_e - \omega)t + \theta_e(0) - \theta(0)))]$$

$$f_{ds} = \text{Re}[F_{ds} \exp(j(\omega_e - \omega)t)] \quad (2-29)$$

$$f_{qs} = -k f_s \sin(\theta_e - \theta) = \text{Re}[j k f_s \exp(j((\omega_e - \omega)t + \theta_e(0) - \theta(0)))]$$

$$f_{qs} = \text{Re}[F_{qs} \exp(j(\omega_e - \omega)t)] \quad (2-30)$$

$$f_{as} = f_s \cos\theta_e = \text{Re}[f_s \exp(j(\omega_e t + \theta_e(0)))] = \text{Re}[F_{as} \exp(j\omega_e t)] \quad (2-31)$$

F_{ds} و F_{qs} و F_{as} به ترتیب فیزورهای محورهای d , q و a نظیر کمیت f هستند. اگر

دستگاه مرجع دلخواه طوری گرفته شود که $\theta_e(0) = 0$ گردد از عمومیت مسئله کاسته

نمی‌شود. با اعمال این شرط در سه رابطه فوق خواهیم داشت:

$$F_{ds} = k F_{as} \quad ; \quad F_{qs} = j F_{ds} = j k F_{as} \quad (2-32)$$

از روابط (2-29) و (2-30) مشهود است که کمیت‌های تبدیل یافته در حالت

ماندگار با فرکانس $\omega_e - \omega$ نوسان می‌کنند. اگر معادلات محور d را از (2-15) برای مد

ژنراتوری نوشته شود:

$$V_{ds} = -r_s i_{ds} - \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs}, \quad V_{dr} = -r_r i_{dr} - \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (2-34)$$

با جایگزینی کمیت‌های فیزیکی از روابط (2-29) و (2-30) در معادلات فوق داریم:

$$V_{ds} = -r_s I_{ds} - j(\omega_c - \omega)\lambda_{ds} - \omega\lambda_{qs} \quad , \quad V_{dr} = r_r I_{dr} - j(\omega_c - \omega)\lambda_{dr} - (\omega - \omega_r)\lambda_{qr}$$

و یا :

$$V_{ds} = -r_s I_{ds} - j\omega_c \lambda_{ds} \quad , \quad V_{dr} = -r_r I_{dr} - j(\omega_c - \omega_r)\lambda_{dr} \quad (2-35)$$

توجه شود که تمامی کمیت‌های روابط فوق فیزور هستند. حال اگر به جای λ_{ds} و λ_{dr} بر حسب فیزور جریانها در رابطه (2-35) جایگذاری شود :

$$V_{ds} = -r_s I_{ds} - j\omega_c [(L_{ls} + L_m)I_{ds} + L_m I_{dr}]$$

$$V_{dr} = -r_r I_{dr} - j(\omega_c - \omega_r) [L_m I_{ds} + (L_{lr} + L_m)I_{dr}]$$

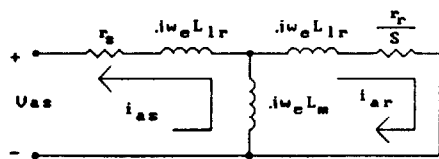
از رابطه (2-32) کمیت‌های محور d را بر حسب فاز as و ar جایگذاری می‌گردد :

$$V_{as} = (r_s + j\omega_c L_{ls})I_{as} - (j\omega_c L_m)(I_{as} + I_{ar}) \quad (2-36)$$

$$V_{ar} = -[r_r + j(\omega_c - \omega_r)L_{lr}]I_{ar} - [j(\omega_c - \omega_r)L_m](I_{as} + I_{ar}) \quad (2-37)$$

باتقسیم طرفین رابطه (2-37) بر $s \triangleq \frac{\omega_c - \omega_r}{\omega_c}$ خواهیم داشت :

$$\frac{V_{ar}}{s} = -\left(\frac{r_r}{s} + j\omega_c L_{lr}\right)I_{ar} - j\omega_c L_m(I_{as} + I_{ar}) \quad (2-38)$$



از معادلات (2-36) و

(2-38) می‌توان مدار

معادل حالت ماندگار را

رسم کرد :

شکل 2-5- مدار معادل ژنراتور القایی در حالت ماندگار.

لازم به یادآوری است که $V_{ar} = 0$ می‌باشد. برای در نظر گرفتن تلفات هسته کافی است

مقاومت اهمی معادل این تلفات را بطور موازی با راکتانس مغناطیس کننده قرار داد.

2-6 - تئوری فضای برداری

تئوری فضای برداری خیلی نزدیک به تئوری ماتریسی جامع ماشین‌های الکتریکی

است و همچنانکه نشان داده می‌شود به راحتی می‌توان از معادلات فضای برداری به

معادلاتی که قبلاً بدست آمده، رسید [8 و 9].

اساس این تئوری استفاده از مؤلفه‌های متقارن در مورد کمیت‌های لحظه‌ای می‌باشد. یعنی کمیت‌هایی مثل جریان، ولتاژ و شار به مؤلفه‌های متقارن مثبت و منفی تبدیل می‌شوند. برای مطابقت با تبدیلهای (۲-۱) و (۲-۲) ماتریس تبدیل در دستگاه مرجع ساکن را در چنین فضایی بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} f^0 \\ f^+ \\ f^- \end{bmatrix} = \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

در رابطه فوق، f_a و f_b و f_c کمیت‌های لحظه‌ای و f^0 و f^+ و f^- به ترتیب بردارهای مؤلفه صفر، مثبت و منفی هستند. با تبدیل فوق کمیت‌های متغیر با زمان به بردارهای فضایی تبدیل می‌شوند. مثلاً بردارهای مؤلفه مثبت جریان، ولتاژ و شار عبارتند از:

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} (V_a(t) + aV_b(t) + a^2V_c(t)) \\ \bar{i} &= \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} (i_a(t) + ai_b(t) + a^2i_c(t)) \\ \bar{\lambda} &= \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} (\lambda_a(t) + a\lambda_b(t) + a^2\lambda_c(t)) \end{aligned} \quad (2-40)$$

در صورت عدم وجود مؤلفه صفر، بردارهای مؤلفه مثبت و منفی باید مزدوج مختلط باشند. زیرا اگر به ماتریس معکوس زیر توجه شود:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{6}\right)^{1/2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f^0 \\ f^+ \\ f^- \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

از آنجاییکه $a^* = a^2$ و $f^0 = 0$ می‌باشد، پس به راحتی می‌توان از (۲-۴۱) نتیجه گرفت که f_a و f_b و f_c حقیقی هستند هرگاه f^+ و f^- مزدوج مختلط باشند.

حال اگر معادلات دیفرانسیل (۲-۹) ماشین القایی را در نظر بگیریم. با جایگذاری

کمیت‌های زمانی در روابط (۲-۴۰) معادلات فضای برداری در دستگاه مرجع ساکن بدست خواهد آمد:

$$\bar{V}_s = r_s \bar{i}_s + p \bar{\lambda}_s \quad (۲-۴۲)$$

$$\bar{V}_r = r_r \bar{i}_r + p \bar{\lambda}_r \quad (۲-۴۳)$$

در روابط فوق:

$$\bar{\lambda}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r, \quad \bar{i}_r = \bar{i}_r \exp(j\omega_r t) \quad (۲-۴۴)$$

$$\bar{\lambda}_r = L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s, \quad \bar{i}_s = \bar{i}_s \exp(-j\omega_r t) \quad (۲-۴۵)$$

\bar{i}_s و \bar{i}_r به ترتیب بردارهای منتقل شده به دستگاه‌های مرجع استاتور و روتور می‌باشند. از آنجاییکه رابطه بین بردارهای دستگاه مرجع دلخواه و بردارهای دستگاه‌های مرجع استاتور و روتور بشرح زیر است:

$$\bar{V}_s' = \bar{V}_s \exp(-j\omega t), \quad \bar{i}_s' = \bar{i}_s \exp(-j\omega t), \quad \bar{\lambda}_s' = \bar{\lambda}_s \exp(-j\omega t) \quad (۲-۴۶)$$

در اینصورت معادلات فضای برداری (۲-۴۲) و (۲-۴۳) در دستگاه مرجع دلخواه به شکل زیر درمی‌آیند:

$$\bar{V}_s' = r_s \bar{i}_s' + P \bar{\lambda}_s' + j\omega \bar{\lambda}_s' \quad (۲-۴۸)$$

$$\bar{V}_r' = r_r \bar{i}_r' + P \bar{\lambda}_r' + j(\omega - \omega_r) \bar{\lambda}_r' \quad (۲-۴۹)$$

که:

$$\bar{\lambda}_r' = L_r \bar{i}_r' + L_m \bar{i}_s', \quad \bar{\lambda}_s' = L_s \bar{i}_s' + L_m \bar{i}_r'$$

حال اگر در معادلات فوق هر بردار را بصورت دو مؤلفه حقیقی و مجازی نشان دهیم.

مثلاً برای استاتور داشته باشیم:

$$\bar{V}_s' = V_{qs} + jV_{ds}, \quad \bar{i}_s' = i_{qs} + j i_{ds}, \quad \bar{\lambda}_s' = \lambda_{qs} + j \lambda_{ds} \quad (۲-۵۰)$$

سپس این بردارها در (۲-۴۸) و (۲-۴۹) جایگذاری شده و قسمتهای حقیقی و مجازی بطور جداگانه نوشته شودمی توان به روابط زیر رسید:

$$\begin{aligned} V_{ds} &= r_s i_{ds} + p\lambda_{ds} + \omega\lambda_{qs} \\ V_{qs} &= r_s i_{qs} + P\lambda_{qs} - \omega\lambda_{ds} \quad (2-51) \\ V_{dr} &= r_r i_{dr} + P\lambda_{dr} + (\omega - \omega_r)\lambda_{qr} \\ V_{qr} &= r_r i_{qr} + P\lambda_{qr} - (\omega - \omega_r)\lambda_{dr} \end{aligned}$$

این روابط دقیقاً با روابط (۲-۱۵) یکسان هستند. بنابراین بعد از حل معادلات فوق در دستگاه مرجع ساکن ($\omega=0$) بردارهای مؤلفه مثبت بدست می آید. طبق مطالب گفته شده بردارهای مؤلفه منفی مزدوج بردارهای مؤلفه مثبت (۲-۵۰) هستند، پس از رابطه (۲-۴۱) مثلاً برای ولتاژ استاتور خواهیم داشت :

$$\begin{aligned} V_{as} &= \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} \cdot V_{qs} \\ V_{bs} &= -\frac{1}{(\frac{2}{3})^{1/2}} V_{qs} + \frac{1}{(\frac{2}{3})^{1/2}} V_{ds} \quad , \quad V_{cs} = -\frac{1}{(\frac{2}{3})^{1/2}} V_{qs} - \frac{1}{(\frac{2}{3})^{1/2}} V_{ds} \quad (2-51) \end{aligned}$$

بهمین ترتیب می توان روابطی را برای سایر کمیتها بدست آورد.

قابل ذکر است که بعلت ایجاد پیچیدگی، مؤلفه های متقارن لحظه ای را بهتر می باشد که فقط در حل مسائل خاص مورد استفاده قرارداد. ولی از مهمترین مزایای این روش این است که در صورت متقارن بودن ولتاژها و جریانهها (یاشارها) چون مؤلفه های مثبت و منفی لحظه ای مزدوج مختلط هستند، آنالیز فقط یکی از آنها کافی است. بدین ترتیب حل مسائل کوتاه تر می گردد.

فصل سوم

راه اندازی ژنراتور القایی

در ماشین‌های الکتریکی، مدار مغناطیسی بعنوان واسطه تبدیل انرژی الکتریکی عمل می‌کند و وظیفه مهم انرژی دار کردن آن توسط مدار تحریک ایفا می‌گردد. همانطوریکه در بخش قبل اشاره شد عموماً ژنراتور القایی تنها شامل یک سیم پیچی آرمیچر بنام سیم بندی استاتور و یک روتور قفس سنجابی است و درست بهمین دلیل دارای ساختاری بسیار ساده و محکم می‌باشد. بنابراین واقعیت فقدان سیم بندی تحریک در ماشین القایی این سؤال را پیش می‌آورد که عامل تحریک مدار مغناطیسی از کجا تأمین می‌شود؟ مسلماً راهی جز استفاده از یک سیستم کمکی خارجی وجود ندارد. پس جریانی که ماشین را مغناطیس می‌کند از سیستمی که ماشین به آن وصل است، تأمین می‌گردد. با توجه به مدار معادل الکتریکی ژنراتور القایی (شکل ۲-۵)، برقراری جریان مغناطیس کننده i_m در راکتانس X_m نیاز به اعمال توان راکتیو دارد. در نتیجه این سیستم خارجی باید توانایی تولید توان راکتیو پس فاز لازم برای ایجاد i_m یا فلوی فاصله هوایی را داشته باشد.

این توان راکتیو از دو طریق ممکن است تولید شود:

۱- ماشینهای سنکرون با تحریک اضافی.

۲- بانکهای خازنی موازی.

در اثر این نوع تحریک ایجاد شده، یک نیروی محرکه مغناطیسی^(۱) در

سیم‌بندی‌های ماشین القا می‌شود و بنا به دلایلی که بعداً روشن خواهد شد این پدیده به تحریک خودی^(۲) معروف است.

بنابراین بعد از دستیابی به مدل ریاضی ژنراتور بعنوان ابزار، اولین قدم در جهت درک رفتار ژنراتور القایی بررسی پدیده دینامیکی تحریک خودی و ولتاژ سازی است.

۱-۳ - پدیده تحریک خودی

تحریک خودی ماشینهای القایی یک پدیده فیزیکی شناخته شده‌ای می‌باشد که کاربرد عملی وسیعی پیدا کرده است. در مواردی مثل طراحی ژنراتورهای خودکنترل^(۳) و ترمز موتورهای محرک^(۴) تلاشهای زیادی صورت می‌گیرد تا شرایط گسترش و توسعه بیشتر این پدیده بوجود آید. ولی در بعضی موارد دیگر تمامی جوانب احتیاط برای جلوگیری از تحریک خودی بمنظور پایدار کردن یک شبکه بکار بسته می‌شود [۱۰]. چراکه وقوع آن منجر به افزایش جدی ولتاژ و به مخاطره افتادن عایق ماشین و یا سبب نوساناتی در گشتاور و سرعت ماشین در نتیجه کاهش مزایای آن و احتمالاً ازدیاد حرارت قابل ملاحظه می‌گردد [۱۱].

بهر حال در هر دو نوع از موارد فوق نیاز به تعبیر فیزیکی واضح از جوهره پدیده و همچنین درک روشنی از مکانیزم نوسان و دلایل گسترش آن می‌باشد. در اینجا ابتدا یک تعبیر خشنی از پدیده تحریک خودی و ولتاژ سازی را توضیح می‌دهیم، سپس با تشریح این پروسه بر اساس دو دید کلی بحث ادامه خواهد یافت.

۱-۱-۳ - تعبیر پروسه تحریک خودی بر اساس مدار معادل RLC

پاسخ گذرای یک مدار RLC جملاتی بفرم $K_1 \exp(p_1 t)$ دارد که در آن K_1 عدد ثابت و p_1 یکی از ریشه‌های چند جمله‌ای مشخصه یا چند جمله‌ای نظیر معادله دیفرانسیل مدار

۲- Self - excitation

۳- Autonomous

۴- Drive motors

می باشد. اغلب ریشه P_1 یک کمیت مختلط است که قسمت حقیقی آن بیانگر نرخ کاهش (میرایی) حالت گذرا و قسمت مجازی نشان دهنده فرکانس نوسان می باشد. در اکثر پاسخ های گذرا قسمت حقیقی P_1 منفی است، یعنی با گذشت زمان دامنه نوسانات گذرا کاهش می یابد. ولی اگر قسمت حقیقی P_1 مثبت باشد پاسخ گذرا با گذشت زمان افزایش یافته و در تئوری به بی نهایت میل خواهد کرد.

پاسخهای گذرایی که دامنه شان به روش فوق زیاد می شوند بسیار نادر هستند، چرا که با جاری شدن جریان در مقاومت مدار توان تلف خواهد شد و بایستی منبع انرژی وجود داشته باشد که توان لازم را تولید کند. مثالی از این گذرای نادر، مشخصه ژنراتور القایی خود تحریک است. با دقت در مدل ماشین القایی و در نظر گرفتن عامل تحریک یعنی خازن متوجه می شویم که مدار معادل استاتور ژنراتور و خازن مشابه یک مدار RLC سری است. بنابراین در جریان گذرا جمله ای بفرم $K_1 \exp(P_1 t)$ وجود دارد که با مثبت بودن قسمت حقیقی P_1 پروسه تحریک خودی در فاصله هوایی ژنراتور القایی شروع شده و ولتاژ سازی ادامه می یابد تا مدار مغناطیسی ماشین اشباع شود. پس در طی حالت گذرا مقدار X_m تغییر کرده، بطوریکه قسمت حقیقی ریشه P_1 صفر گردد. از این به بعد پاسخ گذرا کم و زیاد نمی شود، یعنی ولتاژ فاصله هوایی و جریان به حالت ماندگار خودشان می رسند و منجر به تحریک خودی دائمی و پیوسته ای می گردد. بنابراین شرایط شروع و حفظ نوسان این است که:

I - برای شروع $\text{Re}(P_1) > 0$ ، $K_1 \neq 0$ باشد. برای یک ژنراتور القایی، وجود فلوی پسماند مغناطیسی کافی در فاصله هوایی ماشین و یا بطور معادل بار پسماند خازن تحریک شرط $K_1 \neq 0$ را تأمین می کند و انتخاب مناسب خازن تحریک برای سرعت معین روتور $\text{Re}(P_1) > 0$ را برآورده می سازد.

II - برای حفظ نوسان یک منبع انرژی لازم می باشد که همان انرژی جنبشی روتور است. اگر روتور توسط محرکی از بیرون به حرکت در نیاید، انرژی جنبشی آن به سرعت

جذب شده و این می تواند برای ایجاد ترمز دینامیکی بکار رود. ولی اگر روتور دائماً چرخانده شود، انرژی جنبشی آن حفظ شده و تحریک خودی و انتقال انرژی بطور پیوسته صورت می گیرد.

بنابراین شروع پروسه تحریک خودی یک پدیده گذرا است و با بدست آوردن جریانها و ولتاژهای لحظه ای رفتار آن بهتر درک می شود [۱۲ و ۱۳].

۳-۱-۲ - تعبیر پروسه تحریک خودی بر اساس سیستم های خود نوسانی

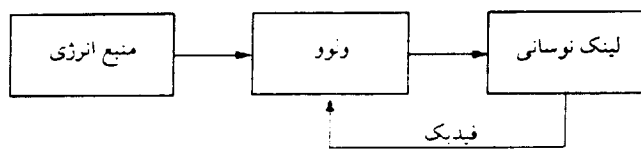
در این قسمت بدون در نظر گرفتن پسماند مغناطیسی، از دیدی کلی تری پدیده تحریک خودی بررسی می گردد. بررسی بر اساس پسماند کاملاً متفاوت بوده و به دلیل عدم اطمینان به پسماند در عمل کمتر به آن تکیه می شود. در قسمت بعد به تعبیر فیزیکی اثر پسماند بر روی پروسه تحریک خودی پرداخته خواهد شد.

سیستم مورد نظر شامل ژنراتور القایی، بانک خازنی و محرک^(۵) می باشد که بعلت وجود پدیده اشباع مغناطیسی کاملاً غیر خطی است. سیستم های غیر خطی می توانند بدون تحریک بیرونی نوساناتی با دامنه و فرکانس ثابت ایجاد کنند. این نوسانات سیکلهای حدی یا نوسانات تحریک خودی نامیده می شوند [۱۴]. در این قسمت نشان داده می شود که سیستم تحت بررسی یک سیستم خود نوسانی^(۶) است. برای این منظور باید ثابت گردد که شروع نوسان در آن با مشخصه سیستمهای خود نوسانی مطابقت دارد.

۳-۱-۲-۱ - توصیف سیستم خود نوسانی

همانطوریکه گفته شد تحریک خودی در وسایل و پدیده های متفاوتی وجود دارد. همه اینها را می توان از یک نقطه نظر مورد توجه قرار داد و طبق یک حالت کلی به بررسی آنها پرداخت. چرا که مکانیزم رفتارشان یکسان است و از جنبه ساختاری شامل قسمتهای

مشترکی می‌باشند که سیستمی با بلوک دیاگرام اساسی شکل (۱-۳) را تشکیل می‌دهند. این سیستم خود نوسانی نامیده می‌شود. در واقع به کمک ولو و فیدبک، سیستم می‌تواند



نوسانات غیر میرا بوجود آورد، بدون اینکه عوامل پریودیک از خارج اعمال گردد. توجه به این نکته مهم

شکل ۱-۳ - شمای ساختاری سیستم خود-نوسانی.

است که برای حفظ دامنه نوسان در یک سطح معین، سیستم باید غیرخطی باشد. اصولاً تحریک خودی بر اساس میزان نیروی لازم برای شروع نوسان خودی به دو

نوع تقسیم می‌شود:

۱- تحریک خودی سخت^(۷)

۲- تحریک خودی نرم^(۸)

اگر شروع نوسان خودی در سیستم نیاز به نیروی محرک بیرونی معین داشته باشد آن را تحریک خودی سخت می‌نامند ولی سایر سیستمهایی که نیاز به چنین محرکی ندارند، تحریک خودی نرم گویند.

از گروه سیستمهای خود نوسانی، سیستمهای انکتریکی را انتخاب می‌کنیم که برای تولید نوسان سینوسی ماندگار در نظر گرفته می‌شوند. در این صورت نقش بلوکهای شکل (۱-۳) آشکار می‌گردد. بلوک لینک نوسانی در چنین سیستمهای الکتریکی، یک مدار نوسانی خواهد بود که شامل عناصر راکتیو خازنی و القایی است. حال اگر این عناصر ضریب کیفیت Q کافی داشته باشند، در این صورت پس از اثر یک نیروی محرکه الکتریکی بیرونی مثل بار پسماند خازنی یا در اثر تغییرات داخلی^(۹)، مدار قادر به برپایی و ایجاد نوسانی در فرکانس تشدید با دامنه میرا خواهد بود. میرایی نوسان در این مدار بدلیل تلفات

۷- Hard self - excitation

۸- Soft self - excitation

۹- Internal fluctuation

اهمی در عناصر مختلف آن می باشد. واضح است که اگر در هر نوسان^(۱۰) اتلاف انرژی با افزایش میدان الکترومغناطیسی اندوکتانس یا میدان الکترواستاتیکی خازن جبران شود، تولید نوسان در آن قسمت مدار می تواند بطور پیوسته ادامه یابد. بنابراین آنچه که از این بدست می آید شرط مهم و شناخته شده ای برای تحریک خودی است، یعنی تعادل فاز و دامنه. منظور این است که برای ادامه تحریک خودی بایستی شرایطی ایجاد گردد که دامنه و فاز به حالت تعادلی رسیده و ثابت بمانند.

در عمل انرژی الکترومغناطیسی یک کوپل را به دو طریق می توان جبران نمود:

۱- با تغییر پریودیک اندوکتانس و جریان.

۲- با اعمال انرژی اضافی تولید شده توسط خود سیستم.

روش دوم در ماشینهای الکتریکی بکار می رود. بنابراین اگر L و r به ترتیب اندوکتانس و مقاومت مدار نوسانی و T پریود نوسان باشند، در این صورت طبق مطالب فوق شرط زیر باید برقرار گردد.

$$\frac{Li^2}{2} > \frac{1}{4} ri^2 T \quad (3-1)$$

سمت چپ رابطه فوق متوسط انرژی ذخیره شده در L و سمت راست آن متوسط انرژی تلف شده در r در یک پریود T می باشد.

۳-۱-۲-۲ - سیستم ماشین القایی - خازن بعنوان یک سیستم خود نوسانی

بعد از توضیح اصول اساسی در قسمت قبل و معرفی سیستم خود نوسانی، ابتدا مطابقت سیستم مورد بررسی با سیستم خود نوسانی را ثابت می شود، سپس مکانیزم توسعه نوسانات در آن بررسی می گردد.

برای قرار دادن این سیستم در زمره سیستمهای خود نوسانی اولاً بایستی حضور

۱۰- Oscillatory tick

تمامی بلوکهای شکل (۳-۱) را ثابت و تأیید کرد ثانیاً عملکرد تناوبی ولو و فیدبک مشخص گردد و ثالثاً برقراری تعادل فاز و دامنه نشان داده شود و در آخر تعیین نمود که سیستم متعلق به کدام گروه تحریک (سخت یا نرم) است.

یک ماشین القایی دو قطب سه فاز خیلی ساده را که شامل استاتور و روتور قفسی است در نظر بگیرد. فرض کنید که ماشین توسط موتور محرک دیگری در چرخش است و یک بانک خازنی به ترمینالهای سیم پیچی استاتور وصل می‌باشد. همچنین فرض می‌شود که سرعت چرخش روتور (ω_r) از فرکانس رزنانس ω مدار نوسانی تجاوز نماید. بنابراین بهنگام تولید نوسانات رزنانسی در مدار نوسانی، ماشین بعنوان یک ژنراتور با لغزش منفی کار کرده و توان P_g را در حالت ماندگار تولیدی می‌کند:

$$P_g = \frac{1-s}{s} P_r \quad (3-2)$$

P_r در رابطه فوق تلفات مسی در مدار روتور و s لغزش می‌باشد.

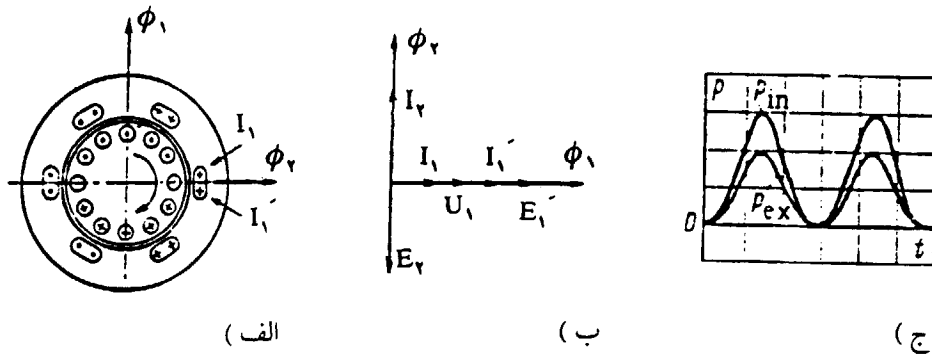
با دقت در سیستم ماشین - خازن می‌توان بلوکهای موجود در ساختار سیستم خود نوسانی را نتیجه گرفت:

- I - موتور محرک بعنوان منبع انرژی.
- II - حلقه شامل خازن و اندوکتانسها به عنوان سیستم نوسانی (لینک نوسانی).
- III - کوپلاژ الکترومغناطیسی بین مدارهای استاتور و روتور از طریق فلوی مغناطیسی ماشین بعنوان فیدبک.
- IV - مدار روتور بعنوان ولو.

بر پایه مطالب گفته شده و کمی تأمل بر روی مدار معادل ژنراتور القایی به راحتی

می‌توان به این موضوع پی برد که نقش ولو توسط مدار روتور ایفا می‌گردد و کوپلاژ مغناطیسی بین مدارهای استاتور و روتور اثر فیدبک را ظاهر می‌سازد. ولی برای تفهیم بیشتر توضیح داده می‌شود که چگونه با عملکرد مدار روتور، انرژی در اندازه‌های معین در طول مدت نوسان توسط مدار استاتور دریافت می‌گردد.

برای توضیح بهتر و درک فیزیکی پدیده، دو حالت حدی در نظر گرفته شود. فرض کنید لغزش یک مقدار منفی و کوچک ($s \approx 0$) را دارد و جریان I_1 در سیم پیچی استاتور برقرار است (شکل ۲-۳ الف). لغزش منفی کوچک بهنگام بی باری ماشین اتفاق می افتد. در اثر I_1 فلوی ϕ_1 بوجود می آید. ولی چون روتور سریعتر از میدان مغناطیسی استاتور می چرخد، یک نیروی محرکه الکتریکی E_2 ($-\frac{d\phi_1}{dt}$) در میل های روتور القا می گردد که زاویه 90° نسبت به فاز استاتور می سازد. ولتاژ القایی E_2 نیز جریان I_2 را بوجود می آورد که به علت اهمی بودن امپدانس مدار روتور ($|Z_2| \gg X_2$) و مقدار منفی مقاومت Z_2 بردار جریان 180° با E_2 اختلاف فاز خواهد داشت. I_2 نیز به نوبه خود فلوی مغناطیسی ϕ_2 را در



شکل ۲-۳- الف) میدان مغناطیسی استاتور و روتور در لغزش کوچک و منفی. ب) دیاگرام برداری کمیت های الکتریکی برای لغزش کوچک و منفی. ج) دیاگرام موجی توان ورودی و خروجی به ازای لغزش کوچک و منفی

روتور برقرار می سازد که این هم سیم بندی ثابت استاتور را قطع و نیروی محرکه الکتریکی E_1 و جریان I_1 را در آن القا می کند. همانطوریکه گفته شد امپدانس مدار روتور اهمی است، بنابراین هیچ شیفت زمانی بین نیروی محرکه مغناطیسی E_2 و جریان I_2 وجود ندارد. در نتیجه فلوهای ϕ_1 و ϕ_2 بطور همزمان عمل کرده، یعنی علی رغم اختلاف فاز 90° در فضا، در فاز زمانی بر هم منطبق هستند. جریانهای I_1 و I_2 نیز همزمان در سیم بندی استاتور عمل کرده و جریان می یابند. بنابراین در لحظه ذخیره انرژی الکترومغناطیسی ماکزیمم در سیم پیچی استاتور، فیدبک به گونه ای عمل می کند که مدار روتور را مجبور به تزریق انرژی اضافی به استاتور می سازد. چراکه طبق مطالب گفته شده برای حفظ نوسان باید انرژی

الکترومغناطیسی بطریقی افزایش یابد (هدایت ولو) و برعکس با صفر شدن جریان در فاز سیم پیچی استاتور یا با کاهش انرژی کشیده شده از استاتور، کوپلاژ الکترومغناطیسی یا فیدبک در جهت عکس عمل کرده و مدار روتور را وادار می‌سازد که اعمال انرژی به استاتور را کاهش دهد (عدم هدایت ولو).

با دقت در مکانیزم ولو متوجه می‌شویم که مدار روتور طوری رفتار می‌کند که اثر امپدانس منفی در لینک نوسانی بوجود می‌آید. در مدار معادل نیز بازویی که جایگزین روتور می‌شود همواره یک مقاومت منفی ($\frac{I_1}{s}$) دارد.

منطق فوق را می‌توان با دیاگرام برداری شکل (۳-۲) نیز توضیح داد. در رسم این دیاگرام I_1 بعنوان مبنا انتخاب شده و موقعیت سایر بردارها را با مطالبی که قبلاً گفته شد می‌توان بدست آورد. ارزش دیگر این دیاگرام استفاده از آن برای معین نمودن مقادیر لحظه‌ای توان اعمالی به مدار نوسانی ($P_{in} = e_1 i_1$) و توان تولیدی در آن مدار ($P_{ex} = u_1 i_1$) می‌باشد. با نمایش موجی این توانها یک توضیح تصویری از رسیدن به شرایط تعادل فاز و دامنه بدست می‌آید.

شرط $P_{in} > P_{ex}$ به ازای بعضی مقادیر لغزش برقرار می‌شود. بنابراین مفهوم حد پایین برای سرعت ممکن است مطرح گردد. با افزایش مقدار خازن حد پایین سرعت کاهش می‌یابد و شرایط برای تولید انرژی در قسمت روتور بدتر می‌گردد. بنابراین یک مقدار حدی برای خازن وجود دارد که در مقادیر بیشتر از آن تحریک خودی باعث کاهش سرعت قطع می‌شود. در رابطه با نقاط حدی در بررسی ماندگار بطور کامل بحث خواهد شد.

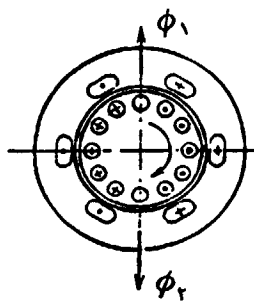
حال به توضیح خاصیت غیر خطی در محدود سازی دامنه نوسان بهنگام ولتاژ سازی ناشی از تحریک خودی پرداخته می‌شود. اگر جریان I_1 در مدار نوسانی برقرار گردد توان کل تولید شده توسط ماشین $E_1 I_1^*$ است در حالیکه توان کل بانک خازنی برابر با رابطه $U_C I_1^*$ خواهد بود. بدیهی است که رشد و توسعه دامنه نوسان به شرطی ممکن می‌گردد که:

$$|E_1 I_1^*| > |U_C I_1^*| \quad (3-3)$$

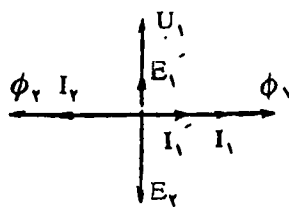
هر کدام از حاصل ضربهای طرفین رابطه فوق را می توان به شکل یک مستطیلی با پایه مساوی (I_1) بطور گرافیکی نمایش داد. رابطه مقدار E_1 و I_1 توسط منحنی مشخصه بی باری داده می شود که به علت اشباع غیر خطی است. ولی رابطه کمیت های مقدار U_c و I_1 همیشه خطی بوده و توسط مشخصه ولت - آمپر خازن تعیین می گردد. مسلماً برای برقراری رابطه (۳-۳) لازم است که مشخصه بی باری بالای مشخصه ولت - آمپر خازن قرار گیرد و بعلت غیرخطی بودن مشخصه بی باری این دو منحنی ضرورتاً همدیگر را در مقداری از جریان قطع می کنند. این نقطه تلاقی محدوده کاری وسیله را تعیین می کند که در آن مقادیر توانهای موردنظر قابل مقایسه هستند. در این نقطه ماشین نمی تواند بعنوان تقویب کننده توان عمل نماید و امکانات افزایش دامنه نوسان از بین می رود و بعلت شارژ و دشارژ انرژی بین خازن و سلف معادل در مدار نوسانی، نوسانات ادامه می یابد.

بطور مشابه برای حالتی که لغزش مقدار بزرگتری دارد می توان روش آنالیز یکسانی را با فرض سرعت ω_r ثابت و مقدار C متغیر بکار برد. در این حالت نیز با بررسی نتیجه می شود که با افزایش خازن C برقراری روابط فاز و دامنه مشکل می گردد. چراکه فلوی روتور نسبت به فاز اولیه استاتور جابجا شده و مقدار توان قابل انتقال به استاتور کاهش

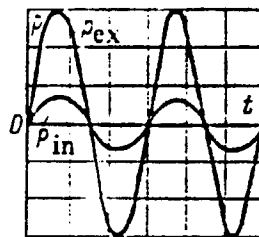
می یابد (شکل ۳-۳).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳-۳- الف) میدان مغناطیس استاتور و روتور در لغزش بزرگ و منفی. ب) دیاگرام برداری کمیت های الکتریکی برای لغزش بزرگ و منفی. ج) دیاگرام موجی توان ورودی و خروجی به ازای لغزش بزرگ و منفی.

یعنی با افزایش C از یک حد معین ولو نمی تواند انرژی کافی برای مدار استاتور

تأمین نماید در نتیجه نوسان متوقف شده و تحریک خودی ماشین از بین می رود. وقتی C

ثابت و سرعت ω_r متغیر باشد، باز هم یک سرعت قطع مطرح می شود که بالاتر از آن امکان تزریق انرژی از طرف روتور وجود ندارد و تحریک خودی از بین می رود. طبیعی است با کاهش مقاومت اهمی در مدار نوسانی حدود پایین و بالای سرعت به ترتیب کوچک و بزرگ شده و محدوده کاری بیشتر می گردد. بحث در رابطه با این حدود در قسمت ماندگار انجام خواهد شد [۱۰].

۳-۱-۳ - تعبیر پروسه تحریک خودی بر اساس پسماند مغناطیسی

در این قسمت مکانیزم وقوع تحریک خودی بر اساس پسماند مورد بحث قرار گرفته و چگونگی شروع ولتاژ ترمینال از مقدار جزئی ناشی از پسماند مغناطیسی روتور یا به عبارت دیگر پدیده ولتاژ سازی بررسی خواهد شد. فیزیک این پروسه در مقالات بطور متفاوتی بحث شده است. در اینجا یکی از این دیدها تشریح می گردد [۱۱].

در پروسه تحریک خودی و ولتاژ سازی رفتار دو مرحله ای برای ماشین القایی در نظر گرفته می شود:

۱ - در ابتدا با توجه به صفر بودن جریان روتور و حرکت از حالت سکون، ماشین القایی طوری رفتار می کند که گویی یک ماشین سنکرون با روتور مغناطیس دائم ضعیف است. این مرحله را مد سنکرون می نامند.

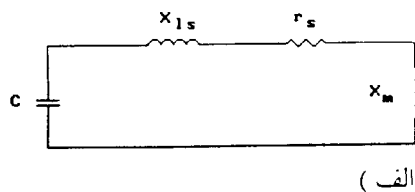
۲ - سپس با برقراری جریان در روتور و استاتور، بصورت ماشین آسنکرون عمل کرده و ولتاژ ترمینال به مقدار قابل ملاحظه و معینی افزایش می یابد. این مرحله را مد آسنکرون می نامند.

برای ادامه بحث تئوری، دو حالت ممکن ماشین القایی را توسط مدار معادل ساده طبق شکل (۳-۴) نشان می دهیم. با توجه به مدار معادل شکل (۲-۵) ذکر دو نکته ضروری بنظر می رسد.

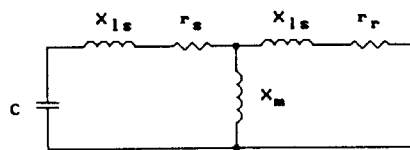
اول اینکه اثر لغزش مستقیماً در فرکانس مدار روتور وارد شده بنابراین در مدار

معادل دو فرکانس داریم. این موضوع در مدار معادل مد آسنکرون واضح است. دوم اینکه در مد آسنکرون جریان روتور صفر است، یاب عبارت دیگر لغزش خیلی کوچک یا نزدیک صفر بوده و به عبارت دیگر لحظه شروع راه اندازی مشابه حالت بی باری ماشین القایی است.

با توجه به توضیحات فوق بطور خلاصه می توان گفت: ماشین بصورت آلترناتور مغناطیس دائم (شکل ۳-۴ الف) شروع بکار می کند، سپس به ماشین آسنکرون (شکل



(الف)



(ب)

۳-۴ ب) سوئیچ می کند.

حالت گذرا به پارامترهای ماشین، سرعت روتور و اندازه خازن تحریک بستگی دارد. فرض می شود تمام پارامترهای مدار بجز اندوکتانس مغناطیس کننده ثابت هستند و بر اساس رفتار شبه

شکل ۳-۴ - الف) مد سنکرون ژنراتور القایی خود تحریک. ب) مد آسنکرون.

ایستا^(۱۱) ماشین بررسی ادامه می یابد.

تغییرات این اندوکتانس در شکل

۳-۵ نشان داده شده است. افت در

اندوکتانس L_m به ازای جریانهای

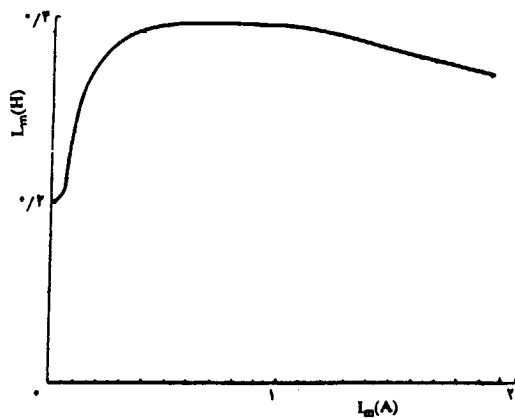
مغناطیس کننده بیشتر بخوبی معلوم بوده و

تعیین کننده ولتاژ حالت پایدار نهایی است.

کوچک بودن L_m در جریانهای پایین بسیار

مهم است، چراکه روی مشخصات تحریک

خودی اولیه بسیار تعیین کننده می باشد.



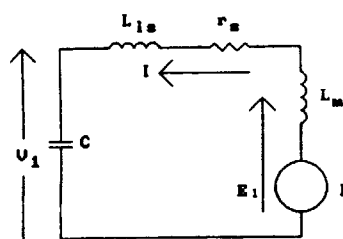
شکل ۳-۵ - تغییرات اندوکتانس مغناطیس کننده با جریان I_m .

۱۱- Quasistationary

۱-۳-۱-۳ - بررسی های تئوریک

برای موشکافی و بررسی این پدیده بهتر است که روابط بین ولتاژ ترمینال، جریان و سزعت روتور را برای مدارهای معادل شکل ۳-۴ بدست آورد. ابتدا از مد سنکرون شروع می کنیم:

I - مد سنکرون: مدار معادل شکل (۳-۴ الف) فرم یک مدار رزنانسی را دارد که تابع محرک ^(۱۲) در واقع پسماند مغناطیسی در روتور است و علاوه بر آن این مدار شامل جریانهای سنکرون در استاتور می باشد. مقدار پسماند مغناطیسی موجود در روتور بر حسب ولتاژ مدار باز (با قطع خازنهای ترمینال) در فرکانس نامی اندازه گرفته می شود. برای تعیین پاسخ، تابع محرک را به صورت منبع ولتاژ تعبیر نموده که دامنه و فرکانس آن وابسته به سرعت روتور می باشد (شکل ۳-۶). ضریب K شامل اثراتی



مثل نداشتن تعریف دقیق ^(۱۳) توزیع

فلوی پسماند در روتور، مقدار نسبتاً

بالای ضریب نفوذ مغناطیسی ^(۱۴) $E_1 = K w_r \sin w_r t$

آهن نرم و انحراف از عملکرد خطی شکل ۳-۶ مدار معادل مد سنکرون (پسماند مغناطیسی بصورت منبع ولتاژ تابع فرکانس تعبیر می شود). می باشد.

ذکر این نکته مهم می باشد که آلترناتورهای مغناطیسی دائم بصورت قطب برجسته بوده و از متد دو محوری برای آنالیز استفاده می شود. در اینجا آنالیز روتور قطب صاف بکار می رود، زیرا اگر چه تفاوت سطح اشباع در جهت عمود و موازی با محور پسماند مغناطیسی، برجستگی مغناطیسی بوجود آورد، ولی این اثر فقط در سرعتهای پایین روتور که منجر به گذرای سنکرون می گردد، مهم است.

از شکل (۳-۶) جریان مغناطیس کننده I_m را می توان بدست آورد:

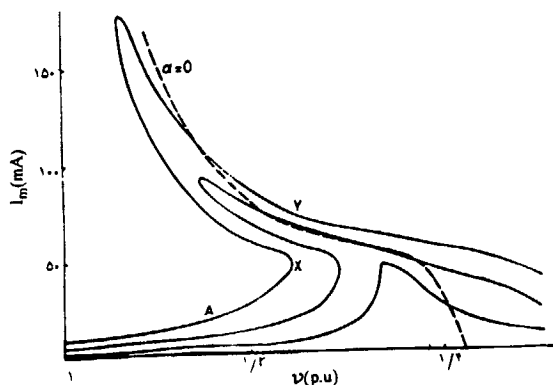
۱۲- Forcing function

۱۳- Ill - defind

۱۴- High values of reciol permeability

$$I_m = \frac{K\omega_r}{r_s + j[\omega_r(L_s + L_m) - \frac{1}{\omega_r C}]} \quad (3-4)$$

که ω_r فرکانس سنکرون متناسب با سرعت روتور، $K = \frac{V_{oc}}{\omega_0}$ (ثابت متناسب با دانسیته فلوی پسماند مغناطیسی در روتور) و ولتاژ مدار باز در فرکانس نامی ω_0 می‌باشند. با توجه به رابطه (۳-۴) در این مدار پاسخ نرمال مدار رزنانس به تابع محرک ورودی توسط اندوکتانس مغناطیسی غیر خطی (L_m) و تغییر در دامنه تابع محرک با سرعت روتور (ω_r) تحت تأثیر قرار می‌گیرد. یعنی بر اساس رابطه (۳-۴) با استفاده از مقدار L_m از شکل (۳-۵) و پارامترهای ماشین مجموعه‌ای از نقاط کار سنکرون بدست می‌آید. از رسم این نقاط منحنی‌های شکل (۳-۷) برای مقادیر متفاوت پسماند مغناطیسی



شکل ۳-۷ - نقاط کار ممکن برای ژنراتور القایی در مد سنکرون.

(ولتاژ مدار باز از ۰/۵ تا ۰/۱ ولت) در فرکانس ۵۰ هرتز حاصل می‌شود. بدلیل تغییر غیر خطی L_m که قابل کنترل نمی‌باشد با تغییر ω_r بطور مناسب طبق رابطه (۳-۴) رزنانس پیش می‌آید ولی رفتار کاملاً غیر خطی بوده بطوریکه منحنی‌ها بتدرج افزایش یافته تا اینکه زیاد شدن جریانی

منجر به افزایش سریع L_m می‌گردد و درست بهمین دلیل با کاهش سریع فرکانس رزنانس سنکرون منحنی‌ها به سمت عقب خم می‌شوند.

اگر سرعت ماشین بطور یکنواخت از صفر افزایش یابد، پاسخ منحنی شکل (۳-۷) ناحیه A را دنبال می‌کند تا اینکه به زانوی X منحنی می‌رسد. در چنین مکانی، افزایش بیشتر سرعت روتور سبب پرش عبوری نقطه کار از رزنانس سنکرون به نقطه Y می‌گردد.

باید توجه کرد که منحنی‌های فوق به همراه منحنی‌های مد آسنکرون، می‌تواند نسبت به سرعت ماشین با تغییر مقدار خازن متصله جابجا شوند. محدوده ۱ تا ۱/۴ برابر سرعت پایه مناسب برای موتور محرک^(۴) ماشین القایی می‌باشد. این محدوده سرعت با افزایش خازن براحتی کاهش می‌یابد.

II - مد آسنکرون: با استفاده از مدار شکل (۳-۴) ب) جریان اعمالی به خازن توسط ماشین بصورت زیر است:

$$i_s = \operatorname{Re} (I_s \exp(mt)) \quad (3-5)$$

که I_s جریان استاتور (کمیت مختلط) و $m = \alpha + j\omega$ فرکانس مختلط است. بطور مشابه برای مدار روتور داریم:

$$i_r = \operatorname{Re} (I_r \exp(m-j\omega)t) \quad (3-6)$$

که I_r جریان روتور (کمیت مختلط) و ω سرعت الکتریکی روتور است. توجه شود که به دلیل یکسان بودن میرایی فقط قسمت موهومی فرکانس مختلط به اندازه $j\omega$ تغییر می‌کند. با استفاده از قوانین کیرشهوف برای کمیت‌های ضروری می‌توان نوشت:

$$I_s (r_s + m(L_s + L_m) + \frac{1}{mc}) + I_r (m - j\omega) L_m = 0 \quad (3-7)$$

$$I_r (r_r + (m - j\omega)(L_r + L_m)) + I_s mL_m = 0 \quad (3-8)$$

با حل معادلات (۳-۷) و (۳-۸) می‌توان I_r را بدست آورد.

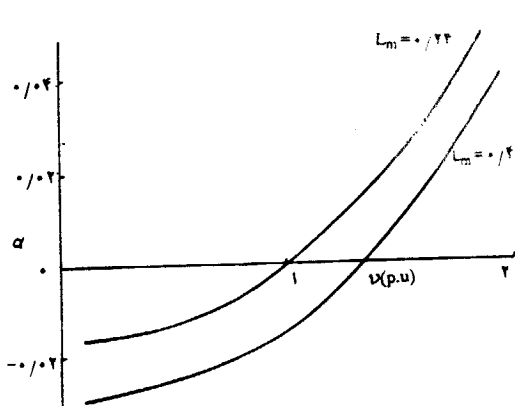
$$[\{m^2 C(L_s + L_m) + mc r_s + 1\} \{-r_s - (m - j\omega)(L_r + L_m)\} m^2 (m - j\omega) C L_m] I_r = 0 \quad (3-9)$$

با فرض $I_r \neq 0$ و ساده سازی معادله و نرمالیزه کردن، خواهیم داشت:

$$\left(\frac{m}{\omega_0}\right)^2 [(X_r + X_m)(X_s + X_m) - X_m^2] + \left(\frac{m}{\omega_0}\right)^2 [(X_s + X_m)r_r + (X_r + X_m)r_s - j\omega_0 \{(X_r + X_m)(X_s + X_m) - X_m^2\}] + \left(\frac{m}{\omega_0}\right) [r_s r_r + X_c(X_r + X_m) - j\omega_0 (X_r + X_m)r_s] + X_c [r_r - j\omega_0 (X_r + X_m)] = 0 \quad (3-10)$$

ریشه‌های معادله درجه سه شرایطی را تعریف می‌کنند که تحت آن کارکرد ماشین

آسنکرون ممکن می‌گردد. با حل این معادله همیشه دو ریشه با قسمت حقیقی منفی بدست می‌آید که در اینجا مورد توجه نیستند. ولی ریشه سوم قسمت حقیقی (α) دارد که می‌تواند



منفی، مثبت یا صفر باشد و در واقع این ریشه تعیین می‌کند که جریان روتور، جریان ولتاژ استاتور کم یا زیاد می‌شود یا ثابت می‌ماند.

شکل (۸-۳) منحنی تغییرات قسمت حقیقی

α بر حسب سرعت ماشین را به ازای L_m های مختلف نشان می‌دهد. سرعت رزنانس در

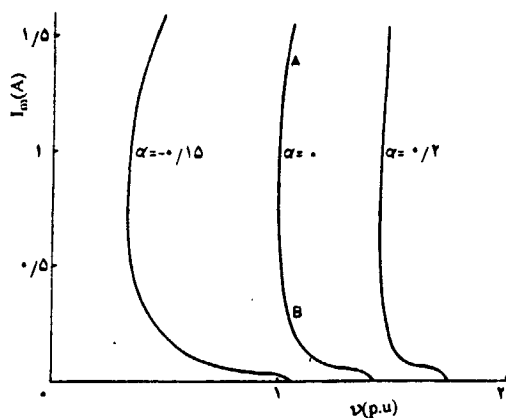
شکل ۸-۳- منحنی تغییرات α بر حسب سرعت به ازای دو مقدار اندوکتانس مغناطیسی L_m .

$\alpha = 0$ اتفاق می‌افتد. برای شروع تحریک

خودی و افزایش جریان آسنکرون، سرعت رزنانس بایستی افزایش یابد. یعنی سرعت باید چنان باشد که $\alpha > 0$ گردد. بدیهی است که سرعت رزنانس با افزایش مقدار خازن ترمینال کاهش می‌یابد.

حال بر اساس مقدار L_m از منحنی (۳-۵) می‌توان منحنی‌های پارامتری جریان و

سرعت ماشین را بر حسب α بدست آورد (شکل ۳-۹).



بنا به توضیحاتی که دادیم کار دائمی

ماشین آسنکرون در یک نقطه رزنانسی

یعنی $\alpha = 0$ باید باشد. به عبارت دیگر با

صفر شدن α به حالت کار دائمی می‌رسد.

همانطوریکه از شکل (۳-۹) مشهود است

در یک سرعت خاص دو نقطه کار (A, B)

شکل ۳-۹- نقاط کار ممکن برای ژنراتور القایی. وجود دارد. در این معیار صدق می‌کنند، وجود دارد.

در مد آسنکرون به ازای پارامتر α .

نقطه A بیانگر حالتی است که ماشین بطور

کامل تحریک شده است. ولی نقطه (B) نقطه کار ناپایدار است، بطوریکه تغییر در سرعت

باعث خروج از رزونانس می‌گردد. افزایش

سرعت باعث تحریک خودی شده به نحوی

که رزونانس دوباره در نقطه A بدست می‌آید.

در حالیکه کاهش آن منجر به برگشت ماشین

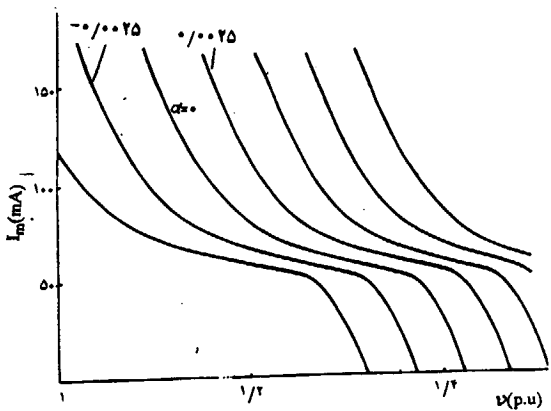
به مدسنکرون خواهد شد. با توجه به

توضیحات داده شده نقطه A دارای اهمیت

زیادی است، بهمین جهت در شکل (۱۰-۳)

منحنی بزرگ شده شکل (۹-۳) را آورده ایم.

۳-۱-۲ - اندرکنش بین مدها



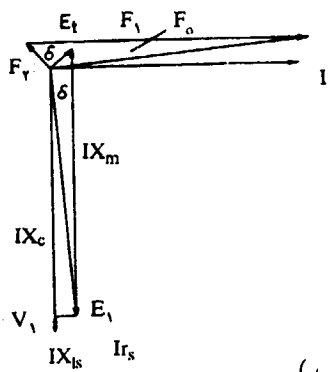
شکل ۱۰-۳ - تصویر بزرگ شده شکل (۹-۲).

اندرکنش بین مدهای سنکرون و آسنکرون از ترکیب کردن منحنی $\alpha = 0$ عملکرد

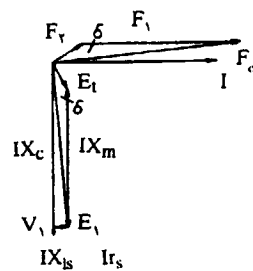
آسنکرون با منحنی‌های پاسخ سنکرون طبق شکل (۷-۳) بدست می‌آید. به ازای مقدار

معین پسماند مغناطیسی، ماشینی که از حالت سکون شروع بکار کرده است، جریان خازنی

خواهد داشت که منحنی سنکرون مناسبی (A) را تا نقطه زانو (X) دنبال می‌کند. اگر سرعت



(ب)



(الف)

شکل ۱۱-۳ - الف) دیاگرام برداری متناظر با نقطه X در شکل (۷-۲) برای مدار شکل ۴-۲ الف.

ب) دیاگرام برداری متناظر با نقطه Y.

بیشتر افزایش یابد، جریان بایستی بطور ناپیوسته به نقطه Y جهش پیدا کند. این نقطه Y در

ناحیه‌ای است که عملکرد آسنکرون ممکن می‌باشد. تحت چنین شرایطی، یک مؤلفه آسنکرون به سرعت رشد خواهد کرد و ولتاژ ترمینال به مقدار مناسبی افزایش خواهد یافت. قطبهای ثابت ناشی از پسماند روی روتور از بین می‌روند و مؤلفه سنکرون جریان به صفر کاهش می‌یابد. اگر نقطه کار سنکرون نزدیک به نقطه X باشد، تنها یک اختلال کوچک کافی است که باعث شروع تحریک خودی گردد.

اثر این حالت گذرا در ماشین سنکرون (مد سنکرون) از دیاگرامهای برداری شکل (۳-۱۱) برای مدار شکل (۳-۴) دیده می‌شود. زیر رزنانس زاویه بار δ طوری است که نیروی محرکه مغناطیسی F_1 تولید شده توسط جریان عبوری، نیروی محرکه مغناطیسی F_2 را تقویت می‌کند تا نیروی محرکه مغناطیسی منتج تولید گردد. در بالای رزنانس، جریان باعث کاهش پسماند مغناطیسی می‌شود. تغییر فاز جریان بین دو نقطه کار در حدود 15° است. برای اینکه از مرز فرکانس رزنانس عبور کرده و تحریک خودی واقع شود، باید ماشین سنکرون این تغییر بزرگ فاز یا بطور مؤثر یک نوسان بزرگ زاویه بار را تحمل کند.

۳-۲ - نکات عملی در راه اندازی ژنراتور القایی

بهنگام راه اندازی ژنراتور القایی ایزوله، عمده‌ترین مشکل تضمین تحریک خودی است. چراکه ماشین در موقع شتاب گرفتن روتور از حالت سکون، پسماند مغناطیسی نامعلومی دارد.

در قسمت ۳-۲-۳، پسماند مغناطیسی با یک منبع ولتاژی مدل شد که تابع سرعت روتور است. بنابراین می‌توان حدس زد که شتاب روتور نیز در پدیده تحریک خودی دخالت دارد. از آنجاییکه نرخ تغییر پسماند روتور توسط هدایت بالای روتور محدود می‌گردد، پس بهنگام تغییر موقعیت روتور، باید پسماند مغناطیسی یک مدت زمان کافی دوام داشته باشد تا تحریک خودی تضمین شود. بنابراین می‌توان گفت اگر سرعت روتور به آهستگی تغییر کند احتمال عدم تحریک زیادتر خواهد شد.

از طرف دیگر قبلاً گفته شد که درمد آسنکرون با برقراری جریان بیشتر، پسماند در اثر تغییر زیاد زاویه بار (δ) کاهش می‌یابد. بنابراین نوسان آهسته زاویه بار متناظر با شتاب پایین روتور خواهد بود. از این رو با آزمایش عملی می‌توان به بررسی اثر شتاب روتور پرداخت. این آزمایش شامل به حرکت درآوردن روتور از حالت سکون با شتاب ثابت و مختلف a می‌باشد. نتایج چنین آزمایشی برای یک ماشین سه فاز، چهار قطب، $2/25$ کیلووات برای شتابهای بین $1 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ تا $0/12 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است [۱۱].

همانطوریکه از این شکل معلوم است، پسماند مغناطیس القایی با دو مکانیزم زیر می‌تواند تغییر یابد:

I - در شتابهای ثابت a بالا، جریانهای آسنکرون ظاهر خواهند شد اما ممکن است با جریانهای سنکرون تداخل داشته باشند.

II - در شتابهای ثابت a کم، اثر عکس‌العمل آرمیچر ایجاد شده توسط زاویه بار خاصیت مغناطیسی را کاهش می‌دهد و تا سرعتهای بالا ماشین را زیر ناحیه مد آسنکرون نگه می‌دارد.

شکلهای (۳-۱۲ الف تا ت) جزو مکانیزم نوع اول می‌باشند. در شکل الف تحریک خودی در اثر عبور از مد سنکرون به مد آسنکرون بوجود می‌آید. در شکل ب تقریباً در ابتدا تحریک خودی بوجود آمده، سپس با کاهش پسماند مغناطیسی این تحریک در ماشین سنکرون از بین می‌رود ولی دوباره در سرعتهای بالا ایجاد می‌شود. در این حالت میرایی مؤلفه جریان سنکرون سریعتر از نرخ افزایش جریان آسنکرون می‌باشد. در شکل پ، بین جریانهای سنکرون و آسنکرون تداخل قابل ملاحظه‌ای وجود دارد و تا برقراری تحریک خودی نوساناتی در جریانها بوجود می‌آید. بالاخره در شکل ت، پسماند مغناطیسی بطور مداوم کم می‌شود تا اینکه تحریک خودی ایجاد گردد.

به ازای شتاب پایین (شکل ت)، مکانیزم دوم مطرح می‌شود که در

سرعت‌های بالا تحریک خودی بوجود

می‌آید. حتی در حالتی که پسماند

مغناطیسی بطور کامل از بین برود باز هم

در سرعت‌های بسیار بالا تحریک خودی

برقرار می‌شود. البته تغییر زاویه بار به

تنهایی نمی‌تواند تمام پسماند

مغناطیسی را از بین ببرد. حداکثر باعث

می‌شود که تحریک خودی در سرعت

بالا بوجود آید. ولی در حالت عادی

وقتی که ماشین کار نمی‌کند، اعمال یک

شتاب ثابت معین می‌تواند منجر به از

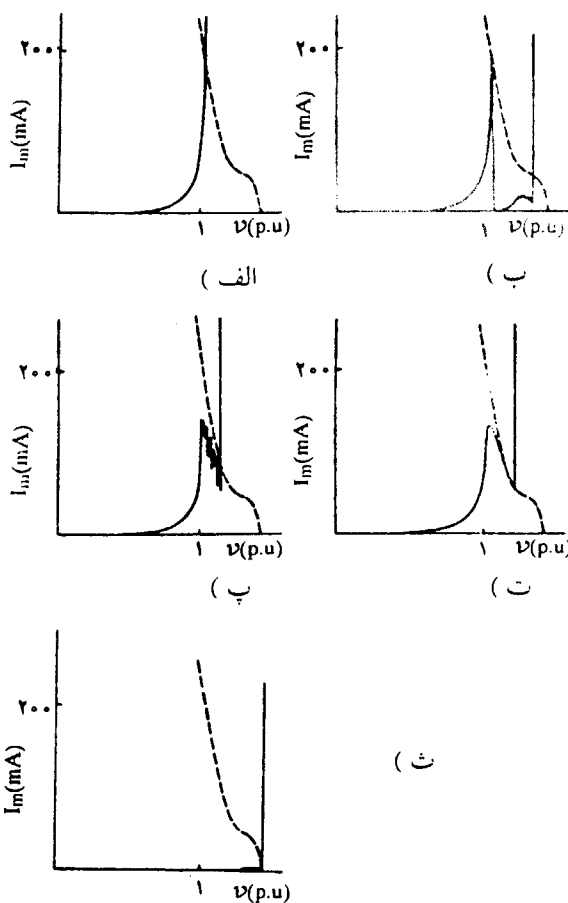
بین رفتن کامل پسماند مغناطیسی گردد.

با توجه به توضیحات فوق لازم

است برای راه اندازی مطمئن به

توصیه‌های زیر توجه نمود. از آنجاییکه

وجود خازن می‌تواند باعث کاهش



شکل ۳-۱۲- اثر شتاب روتور روی پدیده تحریک

خودی. شتاب ثابت a در شکل‌های فوق

به ترتیب کاهش می‌یابد و در آخرین شکل

کمترین مقدار را دارد.

پسماند مغناطیسی شود و هر بار متصل به ماشین نیز قطعاً پسماند مغناطیسی را از بین

می‌برد. پس برای بهبود راه اندازی توصیه می‌گردد که بعد از رسیدن روتور به سرعت نهایی

خازن‌ها وصل گردند و بار نیز تا قبل از تحریک کامل ماشین وصل نشود. علاوه بر این با

کاربرد یکی از چهار روش زیر می‌توان ضریب اطمینان راه اندازی را افزایش داد:

الف - قبل از حرکت درآوردن ماشین، جریان مستقیمی (DC) از استاتور عبور داده

شود. در این حالت پسماند مغناطیسی کافی تضمین خواهد شد.

ب - خازن‌های باردار به ترمینال‌های وصل شود. اگر خازن‌ها دارای ولتاژ اولیه‌ای در حد

ولتاژ نامی ماشین باشند، جریان دشارژ معمولاً برای ایجاد تحریک خودی حتی در روتور بدون پسماند کافی خواهد بود.

پ - سرعت ماشین را به بالاتر از مقدار نامی افزایش داد. این امر باعث می شود که سرعت ماشین از سرعت رزنانسی متناظر در پسماند کم تجاوز نماید و بنابراین تحریک خودی شروع گردد.

ت - مقدار خازنهای ترمینال اضافه شود تا سرعت رزنانس به زیر سرعت نامی کاهش یابد.

در دو روش آخر بایستی مواظب بود که ولتاژها خیلی زیاد نشود. بهمین جهت در ماشینهایی که نسبت اندوکتانس مغناطیس کننده خطی به اندوکتانس مغناطیسی در جریانهای کوچک عددی بزرگ باشد (در حدود ۵:۱) این دو روش را عملاً نمی توان بکار برد. بنابراین دو روش آخر را فقط در مورد ماشینهای کوچک که نسبت فوق در حد ۲:۱ است می توان استفاده کرد.

فصل چهارم

شبیه سازی کامپیوتری پدیده ولتاژ سازی در ژنراتور القایی

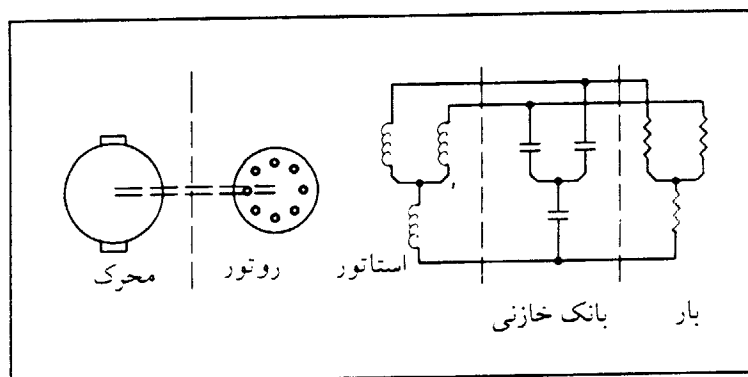
در قسمتی که پیش رو است ، با شبیه سازی کامپیوتری به بررسی بیشتر پدیده ولتاژ سازی پرداخته می شود تا یک حس عینی از نحوه تشکیل ولتاژ در ژنراتور القایی بدست آید. مقایسه نتایج عملی با نتایج کامپیوتری صحت روشهای بکار رفته را نشان خواهد داد. بنابراین بعد از تعیین نوع سیستم تحت بررسی، بدلیل اینکه اشباع مغناطیسی نقش عمده ای در عملکرد مد ژنراتوری دارد و به هیچ وجه نمی توان از آن صرف نظر کرد اقدام به اصلاح مدل بدست آمده در فصل دو خواهد شد.

۴-۱ - ترکیب سیستم مورد بررسی^(۱) و نوع آن

در فصل قبل توضیح داده شد که یک ماشین القایی با اتصال بانک خازنی به ترمینالهای استاتورش از یک طرف و یک منبع توان مکانیکی از طرف دیگر و روتور اتصال کوتاه شده، می تواند بصورت ژنراتور کار کند. شار سازی در فاصله هوایی یا تحریک خودی اساساً بستگی به جریان استاتور دارد. بانک خازنی کمک می کند تا با ساخته شدن ولتاژ استاتور، جریان بیشتری در آن جاری گردد. در نتیجه مؤلفه مغناطیس کننده این جریان نیز شار را در فاصله هوایی افزایش خواهد داد. شکل (۴-۱) بطور شماتیک این سیستم را نشان می دهد که استاتور ماشین القایی با روتور قفس سنجابی بطور موازی با بانک خازنی و بار قرار گرفته است. همچنین قبلاً گفته شد که باید مقداری انرژی اولیه در سیستم وجود داشته باشد. این را می توان بصورت پسماند مغناطیسی یا جریان پالسی عبوری از استاتور بهنگام

۱- System Configuration

راه اندازی در نظر گرفت [۳].



شکل ۴-۱- نمایش شماتیکی ترکیب سیستم.

پس سیستم مورد بررسی شامل قسمتهای زیر است :

- ۱- محرك. ۲- ژنراتور القایی. ۳- بانك خازنی. ۴- بار.

از آنجاییکه پدیده اشباع، یک پدیده غیر خطی است، بنابراین کل سیستم فوق غیر خطی می باشد. این موضوع در معادلات حالت بدست آمده کاملاً مشهود است. پس برای بررسی بایستی اصول و قوانین حاکم بر سیستمهای غیر خطی بکار گرفته شود.

همانطوریکه سیستمهای خطی را بر اساس وابستگی به زمان ماتریس سیستم A به دو نوع متغیر با زمان و غیر متغیر با زمان تقسیم بندی می کنند، سیستمهای غیر خطی نیز بطور مشابه به دو گروه خود کنترل^(۲) و غیر خود کنترل^(۳) تقسیم می شوند.

سیستم غیر خطی خود کنترل نامیده می شود هرگاه f (تابع حالت) وابسته به زمان نباشد، یعنی بتوان معادله حالت سیستم را بصورت زیر نوشت :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (۴-۱)$$

در غیر اینصورت، سیستم را غیر خود کنترل گویند [۱۴].

بعداً ثابت خواهد شد که معادله حالت سیستم شکل (۴-۱) فرم فوق را دارد. پس

نتیجه این می باشد که سیستم تحت بررسی غیر خطی و خود کنترل است.

۲-۴ - توصیف اشباع

در سالهای اخیر تلاشهای چشمگیری برای دستیابی به مدل‌های بهتری از ماشینهای الکتریکی جهت استفاده در مطالعات شبیه سازی کامپیوتری صورت گرفته است و هم اکنون نیز این تلاشها ادامه دارد [۱۵].

برای در نظر گرفتن مشخصات اشباع در ماشینهای الکتریکی بسته به مسئله مورد بررسی باید روش مناسبی اتخاذ شود. مثلاً کاربرد روشهای اجزا محدود، برای طراحی ماشینهای الکتریکی مناسب است و علی‌رغم دقت بالا، برای بررسی و مطالعه عملکرد دینامیکی ماشینها روشهای خوبی نبوده و باید راه‌های ساده‌تری دنبال گردد.

معمولاً برای دخالت دادن اشباع، ابتدا آنالیز خطی ماشین بر اساس تئوری مدارهای تزویج شده و فرض سینوسی بودن دانسته فلو و توزیع mmf صورت می‌گیرد. سپس با وابسته کردن چند پارامتر مدل به قوانین اشباع، مدل اشباع شده ماشین الکتریکی بدست می‌آید. بدیهی است در صورتیکه اثرات اشباع هم در مورد مسیر فلوی اصلی^(۴) و هم در مورد راکتانس‌های پراکندگی در نظر گرفته شود، مدل‌های پیچیده‌ای بدست خواهد آمد.

بعنوان توصیه‌های کلی در مورد توصیف اشباع و اثرات مربوطه باید به نکات زیر توجه و دقت کافی نمود:

I - اشباع راکتانس مغناطیس کننده مربوط به فلوی اصلی می‌باشد، در حالیکه اشباع راکتانس‌های پراکندگی بستگی به جریانهای پیچیده^(۵) دارد.

II - در ماشینهای قطب صاف اثر اشباع فقط بستگی به دامنه فلوی اصلی دارد در حالیکه در ماشینهای قطب برجسته زاویه فلوی اصلی نیز شامل می‌گردد که این هم با در نظر

۴- Main flux path

۵-Involved current

گرفتن مشخصات اشباع متفاوت بهنگام حرکت بردار فلو در فضای متعامد dq مطرح می شود.

III - در حالت ماندگار، فقط مسیر فلوی اصلی تحت تأثیر اشباع قرار می گیرد، در حالیکه راکتانس های پراکندگی در مقادیر غیر اشباع خودشان باقی می ماندند. طبق مدل ماندگار ماشین شیب وتر متناظر با نقطه کار روی منحنی مغناطیسی بعنوان راکتانس مغناطیس کننده اشباع شده تعریف می شود.

IV - اثر اشباع در حالت ماندگار در تنظیم صحیح متغیرهای حالت قبل از شروع یک آنالیز گذرا از اهمیت زیادی برخوردار است. برای مثال، زاویه بار اولیه ژنراتورهای سنکرون در مشخصه پایداری ماشینها بسیار مؤثر است.

V - در بررسی و تحقیق حالت های دینامیکی باید یک مدل اشباع متغیر در نظر گرفته شود. وقتی فلوها بعنوان متغیر حالت در معادلات ماشین الکتریکی انتخاب شوند، دیگر مشتق جملات اینداکتیو (مغناطیس کننده و پراکندگی) لازم نیست. در نتیجه ساختار معادلات مثل حالت غیر اشباع بوده بشرطیکه پارامترهای قابل اشباع مربوطه بصورت متغیر در نظر گرفته شود و سپس مرحله به مرحله تا زمان کامل شدن پروسه حل عددی تنظیم گردد.

VI - وقتی جریانها بعنوان متغیرهای حالت انتخاب شوند، ساختار مدل دینامیکی اشباع شده نسبت به حالت غیر اشباع تغییر می کند. در حقیقت جملات جدیدی در ماتریس اندوکتانس ماشین ظاهر می شوند که بیانگر اشباع متقابل^(۶) بین سیم بندیها در فضای متعامد می باشد. وقتی فلوها بعنوان متغیرهای حالت هستند اشباع متقابل هنوز هم حضور دارد. اگر چه در این مورد بطور صریح کوپلاژها در محاسبات ظاهر نمی شوند.

۶- Cross - saturation

VII - اثر شدید انتخاب کنندگی^(۷) اشباع فلوی اصلی یا پراکندگی روی عملکرد گذرای ماشین بسیار وابسته به مسئله مورد خاص می باشد. بعنوان مثال چنین تصور می شود که رفتار ماشینهای الکتریکی به دنبال وقوع اختشاشات ناگهانی مثل اتصال کوتاه ژنراتور سنکرون در نزدیکی ترمینالها یا راه اندازی موتورها در ولتاژ کامل بطور عمده تحت تأثیر اشباع پراکندگی قرار می گیرد و درست بر عکس، مشخصات پایداری حول نقطه کار ماندگار ممکن است بیشتر تحت تأثیر اشباع فلوی اصلی قرار گیرد که میرایی نوسانات را افزایش می دهد.

حال به توضیح تئوری معادلات حالت ماشین القایی برای دو نوع متغیر حالت یعنی جریان و فلوی پیوندی می پردازیم.

۳-۴ - بدست آوردن معادله حالت بر اساس متغیر جریان

در اینجا نشان داده خواهد شد که وقتی جریانها بعنوان متغیرهای حالت انتخاب شوند، چطور می توان اثرات اشباع مسیر فلوی اصلی را در معادلات ماشینهای الکتریکی ac دخالت داد.

در معادلات متداول شرایط مغناطیسی خطی فرض می شود و فرمهای متفاوت این نوع معادلات در دستگاههای مرجع مختلف معلوم و شناخته شده است. وقتی اشباع مسیر فلوی اصلی در نظر گرفته شود، باید بعضی از پارامترها اصلاح شوند. در نتیجه جملات اضافی در معادلات وارد شده، بطوریکه دیگر اندوکتانس های خودی استاتور و روتور در محورهای متعامد مساوی نخواهند بود. در واقع، این ناشی از پدیده اشباع داخلی^(۸) است که بعضی وقتها اشباع متقابل نیز نامیده می شود.

در قسمتهایی که پیش رو است نتیجه خواهیم گرفت که اعمال اثرات اشباع فقط از

v- The selective impact of

λ- Inter saturation

طریق تغییر پیوسته اندوکتانس مغناطیس کننده در معادلات دو محور dq کافی نیست و با انجام این عمل خطاهای زیادی بوجود می آید.

از نظر فیزیکی اشباع داخلی را می توان چنین تعبیر کرد که : اشباع در یک محور به اشباع در محور دیگر اثر می گذارد و بر عکس. بنابراین بطور مؤثر جملات کوپلاژ بین دو محور مطرح می گردد.

پس با توصیف اخیر دخالت دادن اثرات اشباع داخلی در معادلات لازم و ضروری است و نمی توان از آن طرف نظر کرد و در نظر گرفتن mmf های جداگانه در محورهای d و q نتایج درستی را نخواهد داد.

۴-۳-۱ - تئوری

در آنالیز عملکرد گذرای ماشینهای الکتریکی، یکی از دو متدی که بسیار مشابه و نزدیک به هم هستند ممکن است بکار رود. یکی از آنها روش معروف ماتریسی تئوری جامع ماشینهای الکتریکی است و دیگری تئوری بردارهای فضایی می باشد [۹].
به جهت اینکه در فصل دو مدل ماشین بر اساس متد اول بدست آمد در اینجا نیز همان مدل مورد استفاده قرار می گیرد.

با در نظر گرفتن تمام فرضهای اساسی در تئوری جامع ماشینهای الکتریکی، معادلات دیفرانسیل ولتاژ ماشین سه فاز القایی را با در نظر گرفتن اشباع مسیر فلوی اصلی بدست می آید. از رابطه (۱۵-۲) می توان معادلات استاتور و روتور را در دستگاه مرجع دلخواه با سرعت ω به شکل زیر نوشت (از محور \circ صرف نظر می شود):

$$V_{dqs} = r_s i_{dqs} + \frac{d}{dt} \lambda_{dqs} + \omega K \lambda_{dqs} \quad (۴-۱)$$

$$V_{dqr} = r_r i_{dqr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dqr} + (\omega - \omega_r) K \lambda_{dqr} \quad (۴-۲)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

که رابطه فوق V_{dqs} ، i_{dqs} ، λ_{dqs} ، V_{dqr} ، i_{dqr} ، λ_{dqr} بردارهای ولتاژ، جریان و شار

استاتور و روتور هستند و ω_r سرعت چرخش روتور می باشد. روابط فوق را می توان به شکل زیر ساده کرد :

$$V_{dqs} = r_s i_{dqs} + L_{ls} \frac{d}{dt} i_{dqs} + \frac{d}{dt} (\lambda_{mdq}) + \omega K (L_{ls} i_{dqs} + \lambda_{mdq}) \quad (4-3)$$

$$V_{dqr} = r_r i_{dqr} + L_{lr} \frac{d}{dt} i_{dqr} + \frac{d}{dt} (\lambda_{mdq}) + (\omega - \omega_r) K (L_{lr} i_{dqr} + \lambda_{mdq}) \quad (4-4)$$

که $L_{lr} = L_r - L_m$ و $L_{ls} = L_s - L_m$ به ترتیب اندوکتانس های پراکنده استاتور و

روتور بوده و فلوی پیوندی مغناطیس کننده برابر است با:

$$\lambda_m = L_m i_m \quad (4-5)$$

توجه شود که سه رابطه (4-3) و (4-4) و (4-5) معادلات اولیه برای بررسی

حالت گذرا هستند و تأکید بر این موضوع بسیار مهم می باشد که در آنها هیچ محدودیتی

برای اشباع مسیر فلوی اصلی وجود ندارد. با این دید، λ_m تابعی از جریان مغناطیس کننده

است که توسط منحنی مغناطیس کننده تعیین می گردد.

4-3-1-1 - مؤلفه های d و q معادلات دیفرانسیل ولتاژ

معادلات (4-3) و (4-4) را می توان با مجزا کردن در محورهای d و q به چهار

معادله جدید تبدیل نمود. در این صورت برای استاتور داریم :

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + L_{ls} \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{d\lambda_{md}}{dt} + \omega (L_{ls} i_{qs} + \lambda_{mq}) \quad (4-6)$$

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + L_{ls} \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{d\lambda_{mq}}{dt} - \omega (L_{ls} i_{ds} + \lambda_{md}) \quad (4-7)$$

در روابط فوق بایستی λ_{md} و λ_{mq} و مشتقات آنها را معین کنیم :

$$\lambda_m^2 = \lambda_{md}^2 + \lambda_{mq}^2 \quad (4-8)$$

که در آن :

$$\bar{\lambda}_{md} = L_{md}\bar{i}_{md} \quad , \quad \bar{\lambda}_{mq} = L_{mq}\bar{i}_{mq} \quad (4-9)$$

بنابراین معادلات (4-6) و (4-7) به همراه روابط (4-9) کاملاً کلی هستند. ولی برای سادگی در اینجا فقط ماشینهایی را در نظر می‌گیریم که استاتور و روتورشان سیلندری شکل بوده یا به عبارت دیگر فاصله هوایی یکنواخت باشد در اینصورت :

$$L_{mq} = L_{md} = L_m \quad (4-10)$$

اگر شار مغناطیس‌کننده را بصورت بردار در نظر بگیریم :

$$\bar{\lambda}_m = L_m (\bar{i}_s + \bar{i}_r) = L_m \bar{i}_m = L_m i_m \exp(j\phi_m) \quad (4-11)$$

که در رابطه فوق :

$$\bar{i}_s = i_{qs} + j\bar{i}_{ds} \quad , \quad \bar{i}_r = i_{qr} + j\bar{i}_{dr} \quad (4-12)$$

در اینصورت از روابط (4-8) تا (4-12) نتیجه می‌شود :

$$i_m^2 = i_{md}^2 + i_{mq}^2 \quad (4-13)$$

$$i_{md} = i_{ds} + i_{dr} \quad , \quad i_{mq} = i_{qr} + i_{qs}$$

در تشکیل مشتقات فلوهای پیوندی مغناطیس‌کننده بایستی بخاطر داشته باشیم که طبق رابطه (4-9) این فلوها تابعی از مؤلفه‌های جریان مغناطیس‌کننده هستند که اینها نیز خودشان تابعی از زمان می‌باشند (طبق (4-13))
بنابراین ابتدا ولتاژ ناشی از تغییرت شار پیوندی را بدست می‌آوریم :

$$U_{md} = \frac{d\lambda_{md}}{dt} = \frac{d(L_m i_{md})}{dt} = i_{md} \frac{dL_m}{dt} + L_m \frac{di_{md}}{dt} \quad (4-14)$$

$$U_{mq} = \frac{d\lambda_{mq}}{dt} = \frac{d(L_m i_{mq})}{dt} = i_{mq} \frac{dL_m}{dt} + L_m \frac{di_{mq}}{dt} \quad (4-15)$$

براحتی می توان نشان داد :

$$\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt} = \frac{dL_m}{di_m} \cdot \frac{1}{i_m} (i_{md} \frac{di_{md}}{dt} + i_{mq} \frac{di_{mq}}{dt}) \quad (4-16)$$

با جایگذاری رابطه (4-16) در روابط (4-14) و (4-15) داریم :

$$U_{md} = L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} + L_{mD} \frac{di_{md}}{dt} \quad (4-17)$$

$$U_{mq} = L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} + L_{mQ} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (4-18)$$

که :

$$L_{dq} = \frac{i_{md} di_{mq}}{i_m} \frac{dL_m}{di_m}, \quad L_{mD} = L_m + \frac{i_{md}}{i_{mq}} L_{dq}, \quad L_{mQ} = L_m + \frac{i_{mq}}{i_{md}} L_{dq}$$

بالاخره با جایگذاری (4-17) و (4-18) در (4-6) و (4-7) و با استفاده از معادلات (4-9) و (4-13) خواهیم داشت :

$$\mathbf{V}_{dqs} = \mathbf{Z}_{dqs} \mathbf{i}_{dq} \quad (4-19)$$

که در رابطه ماتریسی فوق :

$$\mathbf{V}_{dqs} = [V_{ds} \quad V_{qs}]^T, \quad \mathbf{i}_{dq} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T$$

$$\mathbf{Z}_{dqs} = \begin{bmatrix} r_s + L_{sD}P & L_{dq}P + \omega L_s & L_{mD}P & L_{dq}P + \omega L_m \\ L_{dq}P - \omega L_s & r_s + L_{sQ}P & L_{dq}P - \omega L_m & L_{mQ}P \end{bmatrix} \quad \text{و}$$

در ماتریس فوق :

$$L_{sD} = L_{ls} + L_{mD}$$

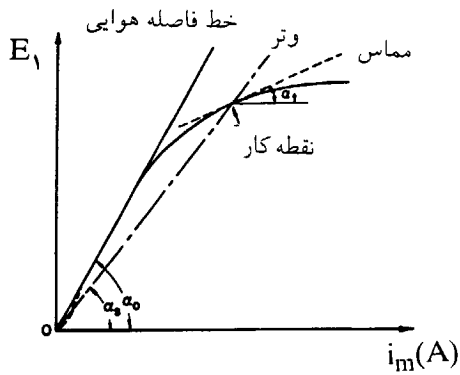
$$L_{sQ} = L_{ls} + L_{mQ}$$

از منحنی مغناطیس کننده سه اندوکتانس بدست می آید (شکل 4-2) [16] :

$$L = \frac{d\lambda_m}{di_m} = \tan(\alpha_t) \quad \text{۱- اندوکتانس دینامیکی :}$$

۲- اندوکتانس استاتیکی: $L_m = \frac{\lambda_m}{i_m} = \tan(\alpha_s)$

۳- اندوکتانس مغناطیسی غیر اشباع: $L_M = \tan(\alpha_o)$



اندوکتانس دینامیکی در واقع مشتق

اول منحنی مغناطیس کننده است ولی از

آنجاییکه در برنامه‌های کامپیوتری استفاده

از $\frac{dL_m}{di_m}$ راحتتر از $L = \frac{d\lambda_m}{di_m}$ است بنابراین

در روابط فوق از مشتق اندوکتانس اشباع

شده L_m (یعنی $\frac{dL_m}{di_m}$) استفاده شده است. شکل ۴-۲- مشخصه اشباع ماشین القایی.

البته براحتی می‌توان نشان داد که هر کدام از روشهای نوشتن معادلات از دیگری بدست

می‌آید. چراکه:

$$L = \frac{d\lambda_m}{di_m} = \frac{d(L_m i_m)}{di_m} = L_m + i_m \frac{dL_m}{di_m} \Rightarrow i_m \frac{dL_m}{di_m} = L - L_m \quad (۴-۲۰)$$

و بنابراین:

$$L_{dq} = \frac{i_m di_m}{i_m} \cdot \frac{dL_m}{di_m} = \frac{i_m di_m}{i_m^2} \cdot (L - L_m) \quad (۴-۲۱)$$

روابط (۴-۲۰) و (۴-۲۱) بیانگر این حقیقت است که معادلات بدست آمده

براحتی با آنهایی که بر اساس اندوکتانس دینامیکی نوشته شده‌اند، پیوند نزدیکی داشته و به

آسانی به هم قابل تبدیل هستند و در واقع در معادلات فوق اثر L بطور غیر مستقیم دخالت

داده شده است.

نکته دیگری که باید به آن توجه شود این است که مستقل از نحوه نگارش معادلات

(بر حسب L یا L_m) بطور صریح هم L و هم L_m دلالت بر تغییر پیوسته i_m دارند.

اگر به ماتریس Z_{dqs} توجه شود، حتی در دستگاه مرجع ساکن ($\omega=0$)، متوجه

کوپلاژ متقابل^(۹) بین دو محور ds و qs استاتور می‌شود. چراکه در اثر اشباع مسیر فلوی اصلی جمله L_{dq} در درآیه‌های اول و دوم ظاهر شده‌است. بعلت وجود همین جمله (L_{dq}) کوپلاژ متقابل بین محورهای استاتور و روتور که متعامند ((dr, qs) و (ds, qr)) نیز مطرح می‌گردد. در حقیقت L_{dq} فاکتوری است که پدیده اشباع داخلی را نشان می‌دهد. می‌توان دید که در شرایط خطی، (وقتی $L = L_m$)، L_{dq} صفر می‌گردد. بهمین دلیل این جمله در معادلات دو محوری متداول حضور ندارند.

کمیت‌های L_{mQ} و L_{mD} جوابگوی اعمال اصلاحات در معادلات بدست آمده می‌باشند. آنها بیانگر اندوکتانس‌های متقابل ماشین در محورهای d و q هستند. در شرایط خطی، این جملات برابر با مقدار غیراشباع L_m خواهند شد. چراکه از رابطه (۲۰-۴) اندوکتانس دینامیکی مساوی اندوکتانس استاتیکی ($L = L_m$) شده و $L_{dq} = 0$ می‌گردد. کمیت‌های L_{sQ} و L_{sD} نیز اندوکتانس‌های خودی محورهای d و q استاتور هستند که بخاطر اشباع در حالت کلی $L_{sQ} \neq L_{sD}$ است و طبق توضیحاتی که دادیم در شرایط خطی بعلت صفر شدن اشباع متقابل این دو کمیت مساوی می‌شود.

حال اگر کمی در عناصر ماتریس Z_{dqqs} توجه شود می‌بینیم که تصویر فیزیکی موجود مشابه تصویر فیزیکی است که در ماشینهای قطب برجسته وجود دارد. چراکه در ماشینهای قطب برجسته هم کوپلاژ متقابل بین محورهای d و q برقرار است و اندوکتانس‌های خودی در قسمت غیربرجسته ماشین بعلت تغییر رلوکتانس مغناطیسی با چرخش روتور مساوی نبوده و تابع زاویه روتور می‌باشد. در مدل حاضر نیز کوپلاژ متقابل و اندوکتانس‌های خودی بطور مشابه با تغییر زاویه ϕ_m (زاویه جریان i_m) در اثر اشباع تغییر می‌کنند. این موضوع بعداً در قسمتی جداگانه توضیح داده خواهد شد.

با انجام عملیات مشابه معادلات مربوط به روتور را نیز می‌توان از رابطه (۷-۴) بدست

آورد:

$$\mathbf{V}_{dqr} = \mathbf{Z}_{dqr} \mathbf{i}_{dq} \quad (4-22)$$

$$\mathbf{V}_{dqr} = [V_{dr} \quad V_{qr}]^T, \quad \mathbf{i}_{dq} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T \quad \text{که در آن:}$$

و ماتریس \mathbf{Z}_{dqr} برابر است با:

$$\mathbf{Z}_{dqr} = \begin{bmatrix} L_{mD}P & L_{dq}P + (\omega - \omega_r)L_m & r_r + L_{rd}P & L_{dq}P + (\omega - \omega_r)L_r \\ L_{dq}P - (\omega - \omega_r)L_m & L_{mQ}P & L_{dq}P - (\omega - \omega_r)L_r & r_r + L_{dq}P \end{bmatrix}$$

در ماتریس فوق داریم:

$$L_{rd} = L_{lr} + L_{mD}$$

$$L_{rq} = L_{lr} + L_{mQ}$$

ایندو اندوکتانس های خودی محورهای d و q روتور هستند و بعلت اشباع در حالت

کلی $L_{rd} \neq L_{rq}$ است.

در اینجا نیز جمله متناظر با اثر اشباع همان L_{dq} است که در حالت کلی صفر نیست

و عناصر جدیدی را در معادلات روتور وارد می کند و دقیقاً مشابه صحبت هایی که در رابطه با

استاتور گفته شد برقرار است.

۴-۳-۱-۲ - فرم کلی معادلات جدید

باترکیب معادلات (۴-۱۹) و (۴-۲۲) یک رابطه ماتریسی بصورت زیر نتیجه میشود:

$$\mathbf{Z}_{dq} = \begin{bmatrix} r_s + L_{sD}P & L_{dq}P + \omega L_s & L_{mD}P & L_{dq}P + \omega L_m \\ L_{dq}P - \omega L_s & r_s + L_{sQ}P & L_{dq}P - \omega L_m & L_{mQ}P \\ L_{mD}P & L_{dq}P + (\omega - \omega_r)L_m & r_r + L_{rd}P & L_{dq}P + (\omega - \omega_r)L_r \\ L_{dq}P - (\omega - \omega_r)L_m & L_{mQ}P & L_{dq}P - (\omega - \omega_r)L_r & r_r + L_{rq}P \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{dq} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

رابطه ماتریس فوق فرم جدید معادلات تئوری جامع ماشینهای الکتریکی است که اثرات اشباع مسیر فلوی اصلی را نیز شامل می‌باشد. می‌توان با اندکی دقت شباهتهای بین این فرم معادلات با معادلات ماشین قطب برجسته بدست آورد. پارامترهای اندوکتانس بسیار شبیه پارامترهای نظیر در ماشین قطب برجسته غیر اشباع می‌باشد. ولی با این تفاوت که در ماشین قطب برجسته اندوکتانس‌های خودی سیم‌پیچهای قسمت برجسته ماشین ثابت هستند ولی در قسمت غیر برجسته این کمیتها با زاویه روتور تغییر می‌کنند. در مدل جدید طبق رابطه (۲۳-۴) اندوکتانس خودی هم در استاتور و هم در روتور بعلت اثرات اشباع تغییر می‌کند و بطور متناظر بجای زاویه روتور، ϕ_m زاویه جریان i_m نسبت به محور دستگاه مرجع دخالت دارد.

حال اگر سرعت دستگاه مرجع ساکن گرفته شود، روابط ساده‌تری بدست می‌آید. در بررسی ژنراتور القایی، از آنجاییکه فرکانس تابع پارامترهای مختلفی مثل مقدار خازن تحریک، سرعت روتور و بار است و تعیین آن راحت نمی‌باشد. بنابراین نوسانات کمیت‌های استاتور در دستگاه ساکن دقیقاً برابر با فرکانس تولید شده خواهد بود. پس انتخاب چنین دستگاهی مناسب بوده و با $\omega = 0$ رابطه (۲۳-۴) بصورت زیر درمی‌آید:

$$\mathbf{Z}_{dq} = \begin{bmatrix} r_s + L_{sD}P & L_{dq}P & L_{mD}P & L_{dq}P \\ L_{dq}P & r_s + L_{sQ}P & L_{dq}P & L_{mQ}P \\ L_{mD}P & L_{dq}P - \omega_r L_m & r_r + L_{rd}P & L_{dq}P - \omega_r L_r \\ L_{dq}P + \omega_r L_m & L_{mQ}P & L_{dq}P + \omega_r L_r & r_r + L_{rq}P \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{dq} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

رابطه ماتریس فوق را می‌توان بفرم زیر نوشت :

$$\mathbf{U} = \mathbf{Ri} + \mathbf{L}\dot{\mathbf{P}}\mathbf{i} + \omega_r \mathbf{Gi} \quad (۲۴-۴)$$

با شرایط مغناطیس خطی معادلات (۴-۲۴) بفرم معروف معادلات دو محوری کاهش می‌یابد. از مقایسه این معادلات با معادلات (۲-۱۷) واضح است که چرا در نظر گرفتن اشباع فقط با تغییر مقدار L_m غیر صحیح است. ماتریس‌های G و L و R در (۴-۴۳) و (۴-۴۴) تعریف شده است.

۴-۳-۱-۳ - فرم کلی معادلات در یک دستگاه مرجع ویژه

مدل بدست آمده در قسمتهای قبلی، کمیت‌های ماشین را بر حسب مؤلفه‌های dq توضیح می‌دهد که ممکن است با فیزورهای فضایی معادلشان جایگزین گردد. همانطوریکه قبلاً اشاره کردیم دو روش جهت آنالیز گذرا وجود دارد که متد بردارهای فضایی مشابه روش ماتریسی می‌باشد ولی نحوه برخورد و پروسه دستیابی به مدل در آنها متفاوت است. جریان مغناطیس کننده یک mmf با توزیع سینوسی ایجاد می‌کند که دانسیته فلوی نظیر آن شامل یک مؤلفه اصلی و هارمونیک‌های اشباع می‌باشد. توزیع سیم بندیها طوری است که فقط فلوی مؤلفه اصلی ولتاژی را القاء می‌کند. اگر جریان مغناطیس کننده و مؤلفه اصلی فلوی پیوندی بصورت فیزورهای فضایی نشان داده شوند. در اینصورت دامنه این فیزورها توسط منحنی اشباع با هم رابطه داشته ولی هیچگونه جابجایی در فاز آنها وجود نخواهد داشت. یعنی هر دو بردار در فضا بر هم منطبق هستند.

معادلات (۴-۲۳) بیشتر فرم عملی و کاربردی دارد ولی برای بدست آوردن دید فیزیکی بهتر و تفهیم مطالب می‌توان تعاریف اندوکتانس‌های L_{dq} ، L_{mD} و L_{mQ} را چنان نوشت که وابستگی هم به دامنه و هم به فاز فیزورهای فضایی کاملاً مشخص و مشهود باشد. برای این منظور سه کمیت فوق را می‌توان به شکل زیر نوشت :

$$L_{dq} = \Delta L_m \cdot \sin\phi_m \cdot \cos\phi_m \quad (۴-۲۵)$$

$$L_{mD} = L_m + \Delta L_m \cdot \cos^2\phi_m = L_m \cdot \cos^2\phi_m + L_m \cdot \sin^2\phi_m \quad (۴-۲۶)$$

$$L_{mQ} = L_m + \Delta L_m \cdot \sin^2\phi_m = L_m \cdot \sin^2\phi_m + L_m \cdot \cos^2\phi_m \quad (۴-۲۷)$$

که :

$$\phi_m = \tan^{-1}\left(\frac{i_{md}}{i_{mq}}\right) \quad , \quad \Delta L_m = i_m \cdot \frac{dL_m}{di_m} = L - L_m$$

همانطوریکه قبلاً نیز اشاره شد در دستگاه مرجع استاتور شباهت ظاهری بین اندوکتانسهای فوق با اندوکتانسهای اصلی ماشین سنکرون قطب برجسته وجود دارد که موقعیت زاویه‌ای محور قطب ماشین مشابه موقعیت ϕ_m فیزور فضایی جریان مغناطیس کننده می‌باشد. چون ΔL_m در اثر اشباع تغییر می‌کند بنابراین بین اندوکتانسهای سنکرون محورهای d و q تفاوت بوجود می‌آید.

از روابط (۴-۲۵) تا (۴-۲۷) می‌توان به نتایج جالبی رسید. کوپلاژ متقابل ناشی از اشباع داخلی صفر خواهد شد اگر زاویه $\phi_m = k \frac{\pi}{4}$ که $k = 0, 1, 2, \dots$ باشد. تعبیر فیزیکی چنین است که:

اگر $\phi_m = 0$ باشد در اینصورت $i_m = i_{mq}$ و $i_{md} = 0$ است. یعنی جریان مغناطیس کننده فقط در امتداد محور q جریان دارد و مقدار آن در محور d صفر است.

اگر $\phi_m = \frac{\pi}{4}$ باشد در این صورت $i_m = \sqrt{2} i_{md}$ و $i_{mq} = i_{md}$ یعنی جریان مغناطیس کننده بطور مساوی در محورهای d و q جاری است.

اگر $\phi_m = \frac{\pi}{2}$ باشد، در اینصورت $i_m = i_{md}$ و $i_{mq} = 0$ است. این مورد مشابه حالت $\phi_m = 0$ می‌باشد.

تعبیر موارد یک و سه این می‌باشد که در شرایط خاصی، کوپلاژ بین دو محور از بین می‌رود. بنابراین می‌توان از این مزیت استفاده کرد و با نوشتن معادلات در دستگاه مرجعی که $\phi_m = 0$ است تعداد مجهولها و در نتیجه تعداد معادلات دیفرانسیل را کاهش داد.

پس اگر سرعت دستگاه مرجع ویژه‌ای که به فیزور فلوی مغناطیس کننده ثابت شده است با ω_m نشان داده شود. در اینصورت در روابط (۴-۲۳) بایستی $\omega = \omega_m$ جایگذاری گردد. با توجه به توضیحاتی که دادیم بدیهی است که:

$$i_m = i_{mq} = i_{qs} + i_{qr} \quad (۴-۲۸)$$

$$i_{md} = i_{ds} + i_{dr} = 0 \quad (۴-۲۹)$$

از معادلات (۴-۶) و (۴-۷) خواهیم داشت :

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + L_{ls} \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_m (L_{ls} i_{qs} + L_m i_{mq}) \quad (۴-۳۰)$$

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + L_{ls} \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{d(L_m i_{mq})}{dt} - \omega_m L_{ls} i_{ds} \quad (۴-۳۱)$$

چون $\Delta L_m = 0$ است پس $L = L_m$ بنابراین در عبارت فوق جمله سوم بصورت زیر ساده

می شود :

$$\frac{d(L_m i_{mq})}{dt} = L \frac{di_{mq}}{dt}$$

همانطوریکه مشهود است هیچ کوپلاژ متقابلی وجود ندارد. معادلات روتور نیز به

روش مشابه قابل دستیابی است :

$$V_{dr} = r_r i_{dr} + L_{lr} \frac{di_{dr}}{dt} + \omega_m (L_{lr} i_{qr} + L_m i_{mq}) \quad (۴-۳۲)$$

$$V_{qr} = r_r i_{qr} + L_{lr} \frac{di_{qr}}{dt} + L \frac{di_{mq}}{dt} - \omega_m L_{lr} i_{dr} \quad (۴-۳۳)$$

$$V_{dr} = -r_r i_{dr} - L_{lr} \frac{di_{dr}}{dt} + (\omega_m - \omega_r) [L_{lr} (i_{mq} - i_{qs}) + L_m i_{mq}] \quad (۴-۳۴)$$

$$V_{qr} = r_r (i_{mq} - i_{qs}) + L \frac{di_{mq}}{dt} + L_{lr} \frac{d(i_{mq} - i_{qs})}{dt} + (\omega_m - \omega_r) L_{lr} i_{dr} \quad (۴-۳۵)$$

همانطوریکه مشاهده می شود سه کمیت i_{ds} ، i_{qs} و i_{mq} مجهول هستند ، پس فقط سه

معادله از معادلات دیفرانسیل کافی است. معادله چهارم برای بدست آوردن عبارتی برای

سرعت ω_m بر حسب سایر مجهولات می تواند بکار رود. ولی بعد از محاسبه i_{ds} ، i_{qs} و i_{mq}

در این دستگاه مرجع ویژه باید با تبدیل عکس به دستگاه موردنظر انتقال داده شود که در

این مرحله نیز باید ω_m نظیر را از معادله مربوط بدست آورد.

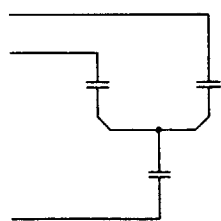
۴-۳-۲ - مدل دو محوری بانک خازنی و بار

بعد از دستیابی به مدل ژنراتور القایی یعنی قسمت

دوم سیستم شکل (۴-۱)، باید مدل بانک خازنی و بار را

در دستگاه مرجع دلخواه بدست آوریم. اگر بانک خازنی

متصل به ژنراتور طبق شکل (۴-۳) باشد در اینصورت



شکل ۴-۳ - بانک خازنی.

رابطه بین جریانها و ولتاژ این بانک بشرح زیر است :

$$\mathbf{i}_{abc} = \frac{d}{dt} (\mathbf{C}\mathbf{V}_{abc}) \quad (4-36)$$

$$\mathbf{i}_{abc} = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T, \quad \mathbf{V}_{abc} = [v_a \quad v_b \quad v_c]^T \quad \text{که:}$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}\mathbf{I}_r$$

با اعمال تبدیل K_s و طبق رابطه (۲-۱) داریم :

$$\mathbf{i}_{odq} = \mathbf{K}_s \mathbf{C} \mathbf{K}_s^{-1} \frac{d}{dt} \mathbf{V}_{odq} + \mathbf{K}_s \frac{d}{dt} (\mathbf{C} \mathbf{K}_s^{-1}) \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot \mathbf{V}_{odq} \quad (4-37)$$

طبق روابطی که قبلاً در بخش یک توضیح دادیم، رابطه (۴-۳۷) بفرم زیر در می‌آید :

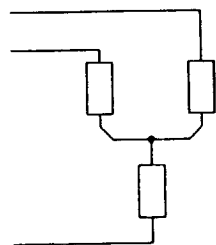
$$\mathbf{i}_{odq} = \mathbf{C}\mathbf{P}\mathbf{V}_{odq} + \mathbf{C} \begin{bmatrix} \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & 1 \\ \circ & -1 & \circ \end{bmatrix} \omega \mathbf{V}_{odq}$$

با حذف محور o ، معادلات محورهای d و q بصورت زیر خواهند بود که در واقع مدل

دومحوری بانک خازنی را توصیف می‌کنند :

$$i_d = \mathbf{C}\mathbf{P}V_d + \mathbf{C}\omega V_q \quad (4-38)$$

$$i_q = \mathbf{C}\mathbf{P}V_q - \mathbf{C}\omega V_d \quad (4-39)$$



شکل ۴-۴ - بار.

حال اگر طبق شکل (۴-۴) بار متعادلی را در نظر

بگیریم که Z شامل مقاومت اهمی R و اندوکتانس L می‌باشد. در این مورد نیز بطور مشابه عمل کرده و به نتایج

زیر می‌رسیم :

$$V_d = R i_d + L P i_d + L \omega i_q \quad (4-40)$$

$$V_q = R i_q + L P i_q - L \omega i_d \quad (4-41)$$

۴-۳-۳ - کاربرد معادلات بدست آمده

معادلات ژنراتور القایی یعنی معادلات (۴-۲۳) یا معادلات معادلشان در دستگاه

مرجع ویژه، به‌مراه معادله حرکت یعنی معادله توصیف‌کننده حرکت محرک و مدل

دومحوری بانک خازنی و بار، بطور کامل رفتار حالت گذرای ماشین ac با فاصله هوایی یکنواخت را توضیح می دهد وقتی که اشباع مسیره های فلوی اصلی در نظر گرفته شود. این معادلات دیفرانسیل غیرخطی نیز باید به روشهای عددی به کمک کامپیوتر حل گردند. برای این منظور، معادلات را باید به فرم متغیرهای حالت درآورد. برای خود ژنراتور داریم:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (4-42)$$

$$\mathbf{U} = [V_{ds} \quad V_{qs} \quad V_{dr} \quad V_{qr}]^T, \quad \mathbf{X} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr}]^T \quad \text{که}$$

$$\mathbf{A} = -(\mathbf{L}')^{-1}\mathbf{R}, \quad \mathbf{B} = (\mathbf{L}')^{-1}\mathbf{U}$$

\mathbf{A} ماتریس حالت و \mathbf{B} ماتریس کنترل است:

$$\mathbf{L}' = \begin{bmatrix} L_{sD} & L_{dq} & L_{mD} & L_{dq} \\ L_{dq} & L_{sQ} & L_{dq} & L_{mQ} \\ L_{mD} & L_{dq} & L_{rd} & L_{dq} \\ L_{dq} & L_{mQ} & L_{dq} & L_{rq} \end{bmatrix} \quad (4-43)$$

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & -L_r \\ L_m & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{R} + \omega_r \mathbf{G} \quad (4-44)$$

با مقایسه این معادلات با فرم معادلات دومحوری متداول نتیجه می شود که همه عناصر \mathbf{L}' غیر صفر هستند. \mathbf{R} نیز یکسان با حالت غیر اشباع است. حال اگر فقط معادلات بانک خازنی متصل به ژنراتور را در دستگاه مرجع ساکن در نظر بگیریم از روابط (3-38) و (4-39) خواهیم داشت:

$$i_{dc} = CPV_{dc}$$

$$i_{dc} = CPV_{qc}$$

بر حسب متغیرهای ژنراتور معادل روابط فوق به شکل زیر است:

$$PV_{ds} = -\frac{1}{C} i_{ds} \quad (4-45)$$

$$PV_{qs} = -\frac{1}{C} i_{qs}$$

بنابراین با بردار حالت $Y = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr} \ V_{ds} \ V_{qs}]$ معادله حالت به شکل خود کنترل درمی آید:

$$\dot{Y} = A' Y \quad (4-46)$$

که ماتریس A' براحتی از روابط (4-42) و (4-43) بدست می آید. بدلیل پیچیدگی ناشی از معکوس کردن ماتریس L از بیان آن بصورت پارامتری بر حسب اندوکتانس ها و ... صرف نظر می شود.

بعد از حل معادلات غیر خطی (4-46) با تبدیل معکوس می توان نتایج را بر حسب متغیرهای abc بدست آورد. در قسمتهای بعدی روش شبیه سازی کامپیوتری بطور کامل توضیح داده شده است. این قسمت را با ذکر چند نکته مهم، جمع بندی می کنیم:

I - با بیان معادلات ولتاژ در دستگاه مرجع ساکن، emf چرخشی در سیم بندیهای ثابت ظاهر نمی شود. احتمال دارد در مطالب گفته شده سردرگمی بین emf ترانسفورمری با emf چرخشی بوجود آید. ولی توجه به این نکته مهم است که در شرایط خطی emf های القایی در سیم بندیهای ثابت از نوع emf های ترانسفورمری خالص هستند ولی چون اشباع نمی تواند emf های چرخشی تولید کند پس در این صورت نمی تواند emf ترانسفورمری را نیز به نوع چرخشی تغییر دهد. این را با دقت در رابطه (4-24) می توان دریافت که هیچ جمله چرخشی اضافی در ماتریس G (4-44) وجود ندارد و جملات مربوط به اشباع متقابل فقط در ماتریس L (4-43) حضور دارند.

II - روش بردار فضایی نیز به خوبی می تواند اشباع را بیان نماید و با فرض توزیع سینوسی برای دانسیته فلو، بطور صحیحی اثرات مغناطیس متقابل را وارد سازد.

III - در سیم بندیهای ساکن واقع در فضای متعامد، ولتاژ القاء شده ناشی از هارمونیک های توزیع دانسیته فلو بایستی وجود داشته باشد. این هارمونیک ها از اثر ترکیبی هارمونیک های فضایی mmf و اشباع ایجاد می شوند. در این حالت می توان با استفاده از آنالیز فوریه روی منحنی دانسیته فلوئی منتج و در نظر گرفتن ضریب سیم بندی برای هر

مرتبه هارمونیکی بطور مناسب ولتاژ القایی ناشی از هارمونیک‌ها را حساب نمود. در حالت ساده‌ای که از سیم بندی با توزیع سینوسی و گام کامل استفاده شود، اثر هارمونیکی صفر خواهد شد.

IV - بالاخره، ولتاژ القاء شده در سیم بندیهای ساکن در فضای متعامد حضور دارند، فقط وقتی که اشباع در نظر گرفته شود. در نتیجه چنین فکر می‌کنیم که حضور همه این ولتاژها بیانگر اثرات اشباع متقابل است.

نکته مهم دیگری را که در رابطه با شبیه سازی کامپیوتری بایستی اشاره شود این است که پروسه تحریک خودی نمی‌تواند شروع شود مگر اینکه مقداری پسماند مغناطیسی در نظر گرفته شود. این شرط بایستی در شرایط اولیه دخالت داده شود. برای برنامه کامپیوتری ممکن است بادر نظر گرفتن مقدار کمی جریان مغناطیس کننده این شرط اعمال گردد. البته می‌توان آن را با فرض بار کوچکی روی خازن دخالت داد.

۴-۴ - بدست آوردن معادله حالت بر اساس متغیر فلوی پیوندی

می‌توان از فلوهای پیوندی نیز بعنوان متغیرهای حالت استفاده کرد. در این قسمت معادله حالت را با چنین متغیری بدست آورده و در انتها از مقایسه آن با معادله حالت بر اساس متغیر جریان، مزایا و معایب هر کدام مشخص خواهد شد.

معادلات (۱۵-۲) هر دو متغیر فلوی پیوندی و جریان را شامل است. اگر در این رابطه جریان حذف گردد، معادلات حالت بر حسب متغیر حالت فلوی پیوندی بدست خواهد آمد. برای این منظور از فرم اصلاح شده معادلات (۲۰-۲) استفاده میشود. این معادلات عبارتند از:

$$\lambda_{ds} = L_{sids} + L_{mimd} = L_{sids} + \lambda_{md}$$

$$\lambda_{qs} = L_{siqu} + L_{mimq} = L_{siqu} + \lambda_{mq}$$

$$\lambda_{dr} = L_{rldr} + \lambda_{md} \quad (۴-۴۷)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + \lambda_{mq}$$

بنابراین جریانها از روابط فوق بدست می آید، سپس در معادله (۱۵-۲) جایگذاری می گردد:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \lambda_{ds} &= V_{ds} - \frac{r_s}{L_{ls}} \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{r_s}{L_{ls}} \lambda_{md} \\ \frac{d}{dt} \lambda_{qs} &= V_{qs} - \frac{r_s}{L_{ls}} \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{r_s}{L_{ls}} \lambda_{mq} \\ \frac{d}{dt} \lambda_{dr} &= V_{dr} - \frac{r_r}{L_{lr}} \lambda_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} + \frac{r_r}{L_{ls}} \lambda_{md} \\ \frac{d}{dt} \lambda_{qr} &= V_{qr} - \frac{r_r}{L_{lr}} \lambda_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} + \frac{r_r}{L_{ls}} \lambda_{mq} \end{aligned} \quad (48-49)$$

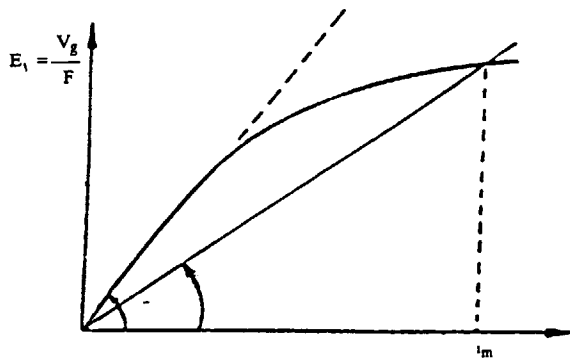
از آنجاییکه λ_{md} و λ_{mq} رابطه غیر خطی با جریانهای i_{md} و i_{mq} دارند، پس فرم معادلات حالت غیر خطی بوده و نمی توان معادله صریحی مثل (۴۲-۴) بدست آورد. بنابراین در قسمت بعدی به توضیح یکی از روشهای شبیه سازی براساس فلوی پیوندی پرداخته می شود.

۴-۴-۱ - تئوری

متد شبیه سازی اثر اشباع در امتداد محور d ماشین سنکرون توسط توماس (۱۰) قبلاً مطرح شده است [۱۷ و ۷]. در مورد ماشینهای قطب برجسته در نظر گرفتن اشباع در امتداد یک محور (d) کافی است ولی در مورد ماشینهای قطب صاف اشباع بایستی در هر دو محور در نظر گرفته شود. در اینجا روش توماس را توسعه داده تا اثر اشباع در هر دو محور ماشین قطب صاف شامل گردد. ابتدا باید از آزمایش حالت بی باری ماشین القایی منحنی اشباع بی باری در مقابل جریان مغناطیس کننده را بدست آورد.

تجهیزات لازم برای دستیابی به عملکرد بی باری ماشین القایی، یک موتور dc بعنوان محرک و یک منبع ولتاژ سینوسی در فرکانس نامی است. ضمن چرخاندن روتور توسط موتور dc در سرعت ثابت (سنکرون)، منبع ولتاژ به استاتور ماشین القایی وصل می گردد.

تحت چنین شرایطی s (لغزش) خیلی کوچک بوده و عملاً صفر می باشد. بنابراین شاخه متناظر با روتور را در مدار معادل می توان باز در نظر گرفت. بنابراین جریان مغناطیس کننده برابر با جریان بی باری استاتور است که به راحتی اندازه گرفته می شود.



الف) منحنی اشباع بی باری.

اگر منحنی اشباع بی باری شکل (۴-۵) را در نظر بگیریم. می توان به راحتی معادل آن را بر حسب فلوی پیوندی بدست آورد (شکل ۴-۵ ب). در این صورت می توان نوشت:

$$\lambda_s = L_{ls}i_s + \lambda_m \quad (4-49)$$

$$\lambda_r = L_{lr}i_r + \lambda_m$$

که:

$$\lambda_m = L_M(i_s + i_r) = L_M i_m \quad (4-50)$$

با پیدا کردن جریانها از (۴-۴۹) و جایگذاری در (۴-۵۰) داریم:

$$\lambda_m = L_a \left(\frac{\lambda_s}{L_{ls}} + \frac{\lambda_r}{L_{lr}} \right)$$

$$L_a = \left(\frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_{ls}} + \frac{1}{L_{lr}} \right)^{-1} \quad (4-51)$$

L_M شیب ناحیه خطی منحنی

مغناطیس کننده می باشد. حال اگر اشباع

در نظر گرفته شود، دیگر معادله (۴-۵۱)

برای توصیف آن کافی نخواهد بود

چراکه با شرایط اشباع خطی بدست آمده است. پس به کمک منحنی (۴-۵) اثر اشباع مسیر فلوی متقابل بصورت زیر دخالت داده می شود:

$$\lambda_m = L_m (i_s + i_r) - f(\lambda_m) = L_a \cdot \left(\frac{\lambda_s}{L_{ls}} + \frac{\lambda_r}{L_{lr}} \right) - f(\lambda_m) \cdot \frac{L_a}{L_M} \quad (4-52)$$

بنابراین در شبیه سازی کامپیوتری برای در نظر گرفتن اشباع، از رابطه (۴-۵۲)

استفاده می شود که $f(\lambda_m)$ تابع تولید کننده $\lambda_m^{(1)}$ است (شکل ۴-۵).

منحنی اشباع بی باری برای ماشین قطب صاف در حالتیکه بردار mmf در هر جهتی

(امتداد d یا q یا هر جایی بین این دو) باشد، بدست آمده است. پس برای در نظر گرفتن

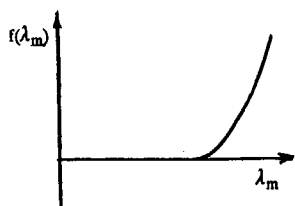
اشباع در هر دو محور می توان مشابه شکل (۴-۶) را

برای $f(\lambda_{md})$ بر حسب λ_{md} و $f(\lambda_{mq})$ بر حسب λ_{mq}

بدست آورد، بطوریکه در هر لحظه زمانی رابطه بین

این کمیتها طبق دیاگرام شکل (۴-۷) باشد. طبق این

دیاگرام داریم:



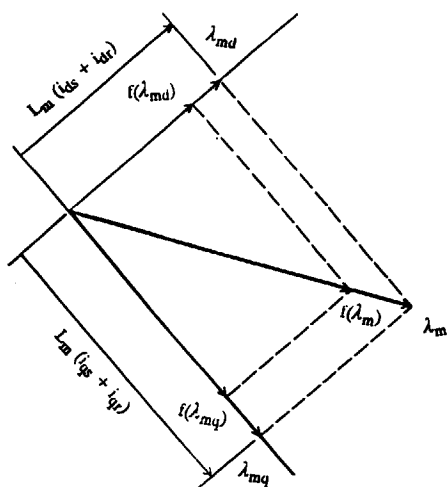
شکل ۴-۶- $f(\lambda_m)$ بر حسب λ_m ، که از

شکل (۴-۳) ب) بدست می آید.

$$\lambda_m^2 = \lambda_{mq}^2 + \lambda_{md}^2 \quad (۴-۵۳)$$

$$f(\lambda_{md}) = \frac{\lambda_{md}}{\lambda_m} f(\lambda_m) \quad (۴-۵۴)$$

$$f(\lambda_{mq}) = \frac{\lambda_{mq}}{\lambda_m} f(\lambda_m)$$



بنابراین روابط حاکم در محورهای d و q

بشرح زیر خواهد شد:

$$\lambda_{md} = LM (i_{ds} + i_{dr}) - f(\lambda_{md}) \quad (۴-۵۵)$$

$$\lambda_{mq} = LM (i_{qs} + i_{qr}) - f(\lambda_{mq})$$

شکل ۴-۷- اشباع در هر دو محور ماشین القایی.

با جایگذاری فلوی پیوندی بجای جریان در روابط فوق داریم:

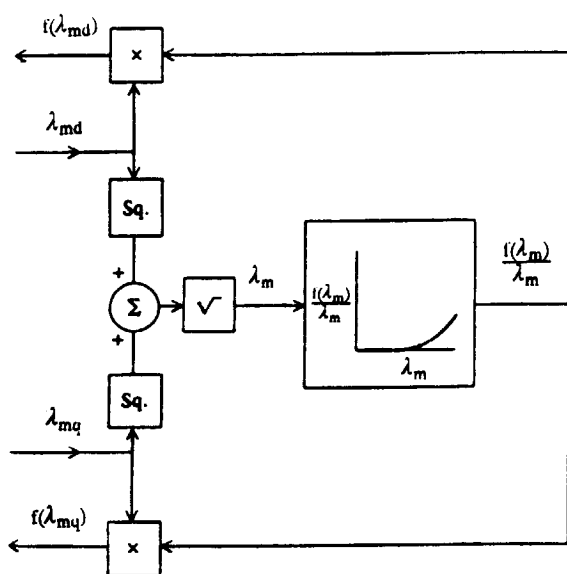
$$\lambda_{md} = L_{ad} \left(\frac{\lambda_{ds}}{L_{ls}} + \frac{\lambda_{dr}}{L_{lr}} \right) - \frac{L_{ad}}{LM} f(\lambda_{md}) \quad (۴-۵۶)$$

$$\lambda_{mq} = L_{aq} \left(\frac{\lambda_{qs}}{L_{ls}} + \frac{\lambda_{qr}}{L_{lr}} \right) - \frac{L_{aq}}{LM} f(\lambda_{mq}) \quad (۴-۵۷)$$

که :
$$L_{ad} = L_{aq} = \left(\frac{1}{L_M} + \frac{1}{L_{lr}} + \frac{1}{L_{ls}} \right)^{-1}$$

بنابراین بر اساس فرمولهای فوق می توان دیاگرامی برای شبیه سازی اشباع در دو محور رسم نمود (شکل ۴-۸).

حال بر اساس معادلات (۴-۴۸) و معادلات (۴-۵۶) و (۴-۵۷) و تابع تولیدکننده λ_{mq} و λ_{md} می توان به همراه معادله حرکت محرک به شبیه سازی پرداخت. البته مدل دو محوری بانک خازنی و بار را نیز باید اضافه نمود.



شکل ۴-۸ - دیاگرام شبیه سازی اشباع روی دو محور d و q .

۵-۴ - مقایسه معادلات حالت بر حسب جریان و فلوی پیوندی

با توجه به توضیحات مفصلی که در قسمتهای ۴-۳ و ۴-۴ ارائه شد می توان چند مزیت متغیر حالت جریان را بشرح زیر نام برد:

- I - برای اعمال اشباع کافی است روی مدلی که بر اساس شرط اشباع خطی بدست آمده، اصلاحاتی صورت گیرد. بنابراین نیاز به نوشتن برنامه مجدد نیست، بلکه با اعمال تغییرات جزئی همان برنامه کامپیوتری قبلی را می توان بکار برد.
- II - اثر اشباع متقابل به وضوح در معادلات دیده می شود.

III - بعضی از جریانها مثل جریان استاتور، کمیت‌های قابل اندازه‌گیری هستند. بنابراین بسیار راحت خواهد بود که مدار معادل را روی ترمینالهایی که کمیت‌های قابل اندازه‌گیری حضور دارند، بدست آورد.

IV - همانطوریکه قبلاً اشاره کردیم بین معادلات بدست آمده برای ماشین القایی با فاصله هوایی یکنواخت و ماشین با قطب برجسته شباهتهایی وجود دارد. شاید عیبی که بتوان برای معادله حالت بر حسب متغیر جریان وارد کرد پیچیدگی نسبی آنهاست.

مزیتی هم که در معادله حالت بر حسب متغیر فلوی پیوندی دارد این است که:

I - در این حالت دانستن L و L_m (اندوکتانس‌های استاتیکی و دینامیکی) کافی است و نیازی به بدست آوردن سایر جملات اینداکتیوی که از مشتق‌گیری نسبت به جریان i_m بدست می‌آید، نیست.

II - فرم معادلات حالت با در نظر گرفتن اشباع تغییر نمی‌کند.

عیبهایی که می‌توان بر آن وارد کرد عبارتند از:

I - اثر اشباع متقابل مشهود نیست.

II - متغیرهای فلوی پیوندی قابل اندازه‌گیری نیستند.

در کل بسته به موردی که تحت بررسی است می‌توان یکی از معادلات حالت بدست آمده را استفاده کرد.

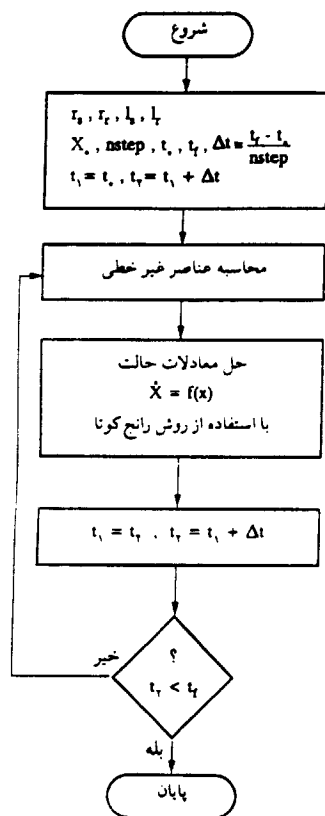
۶-۴ - شبیه‌سازی کامپیوتری پدیده ولتاژ سازی

در آخرین بخش با استفاده از بسته نرم‌افزاری مطلب به شبیه‌سازی نحوه راه‌اندازی

و ولتاژ سازی یک ژنراتور القایی نمونه پرداخته‌ایم.

با کاربرد معادلات حالت (۴-۴۶) بر حسب بردار حالت جریان و (۴-۴۸) بر

حسب بردار فلوی پیوندی در بلوک دیاگرام شکل (۴-۹)، برنامه‌هایی نوشته شده است که



شکل ۴-۹- بلوک دیاگرام شبیه سازی پدیده ولتاژ سازی.

تغییرات ولتاژ، جریان و فلوی پیوندی را در محورهای d و q و همچنین در دستگاه مرجع اصلی را نشان می‌دهد. در اجرای برنامه شبیه‌سازی، ابتدا مقادیر اولیه و پارامترهای ماشین خوانده می‌شود. سپس در هر فاصله زمانی کوچک Δt کمیت‌های غیرخطی مثل L و L_m در معادلات حالت جریان و λ_{md}, λ_m و λ_{mq} در معادلات حالت فلوی پیوندی محاسبه می‌گردد. بعد با فرض اینکه کمیت‌های فوق در فاصله زمانی بسیار کوچک Δt ثابت می‌مانند، معادلات دیفرانسیل به روش رانج کوتای درجه چهار حل می‌شود. این عمل در فاصله زمانی $t_0 \leq t \leq t_f$ تکرار می‌گردد.

۴-۶-۱ - نتایج کامپیوتری

ماشین بکار رفته برای شبیه‌سازی کامپیوتری، یک ماشین القایی جاروب حلقه‌ای (۱۲)

با مقادیر نامی زیر می‌باشد:

$$1/5 \text{ KW}, 220/380 \text{ V}, 7/4 \text{ A}, 50 \text{ HZ}, 1400 \text{ rpm}$$

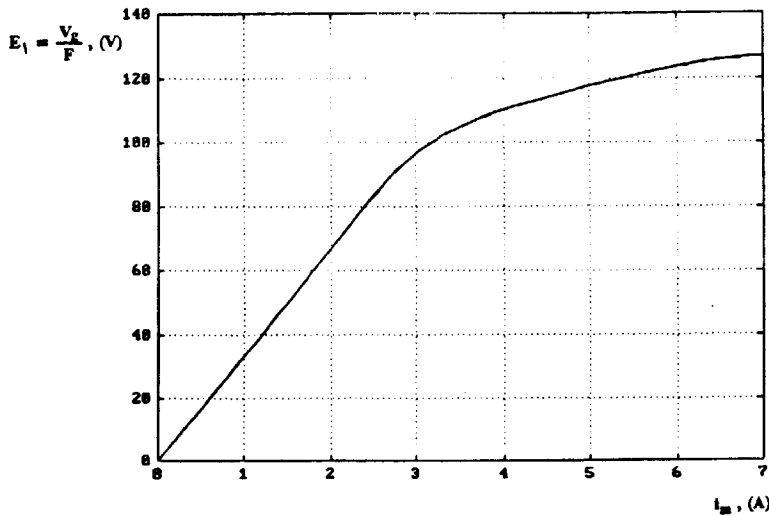
در تمام بررسیها ماشین بصورت مثلث بسته شده و نسبت ترانسفورمری با باز بودن

جاروب حلقه‌ای ۲۲۰:۳۳۵ می‌باشد. پارامترهای مداری ماشین را می‌توان با استفاده از

تستهای بی باری و اتصال کوتاه بدست آورد.

$$r_s = 0.06 \Omega, r_r = 0.083 \Omega, X_{ls} = X_{lr} = 1.81 \Omega$$

منحنی اشباع نیز از چرخاندن روتور در سرعت سنکرون و باز گذاشتن جاروب حلقه‌ای بدست می‌آید. بر روی نقاط آزمایش می‌توان یک منحنی طبق شکل (۴-۱۰) برازش نمود. E_1 ولتاژ مؤثر فاز ستاره معادل و i_m جریان مؤثر خط می‌باشد.



شکل ۴-۱۰ -
منحنی اشباع بی‌باری.

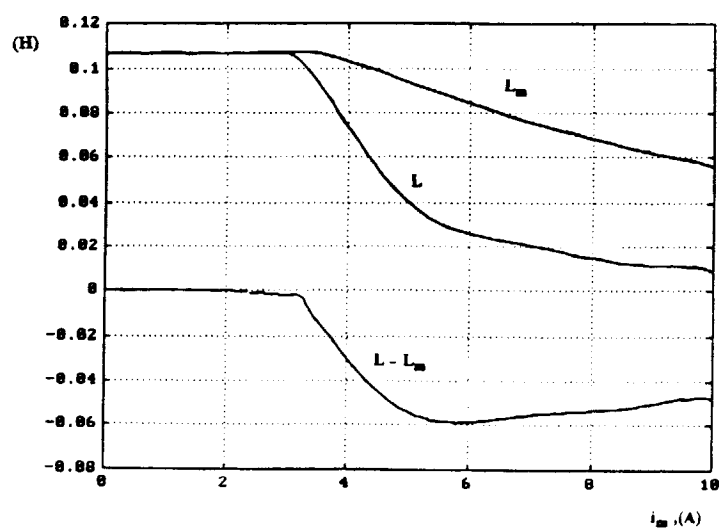
۴-۶-۱-۱ - روش جریان

با به حرکت درآوردن روتور در سرعت سنکرون، بانک خازنی به ترمینالهای ژنراتور القایی وصل می‌گردد. مقدار خازنهای $C = 135 \mu F$ بوده و طوری انتخاب شده است که در این سرعت و بی‌باری، ولتاژ نامی تولید شود.

طبق توضیحات قبلی و بلوک دیاگرام شکل (۴-۹)، اولین قدم محاسبه اندوکتانس‌های L و L_m می‌باشد. مقدار L و L_m از منحنی اشباع بی‌باری بدست می‌آید. شکل (۴-۱۱) تغییرات آنها را بر حسب جریان مغناطیس‌کننده i_m نشان می‌دهد. این شکل شامل اختلاف $L - L_m$ نیز است. به کمک این منحنیها در خلال برنامه کامپیوتری به راحتی می‌توان کمیت‌های غیرخطی را محاسبه نمود.

بعد از مقدمات فوق، می‌توان معادلات (۴-۴۶) را با انتخاب مناسب بردار حالت اولیه (X_0) حل نمود و متغیرهای i_{ds} ، i_{qs} ، i_{dr} ، i_{qr} ، V_{ds} و V_{qs} را بدست آورد.

شکل (۴-۱۲) این کمیتها را نشان می‌دهد. به ازای شرایط اولیه انتخاب شده، ماشین در کمتر از $\frac{1}{6}$ ثانیه به حالت ماندگار می‌رسد.



شکل ۴-۱۱-

تغییرات اندوکتانسهای L_m ،
 L و $i_m \frac{dL_m}{di_m}$ با،
 جریان مغناطیس کننده i_m .

شکل (۴-۱۳) شامل تغییرات عناصر غیر خطی در طول ولتاژ سازی می باشد. i_m جریان مغناطیس کننده و L_m اندوکتانس استاتیکی است. همانطوریکه از شکل های بزرگ شده (۴-۱۳ ت و ج) دیده می شود، در حالت ماندگار i_m و L_m در یک دامنه بسیار کوچکی نوسان می کنند.

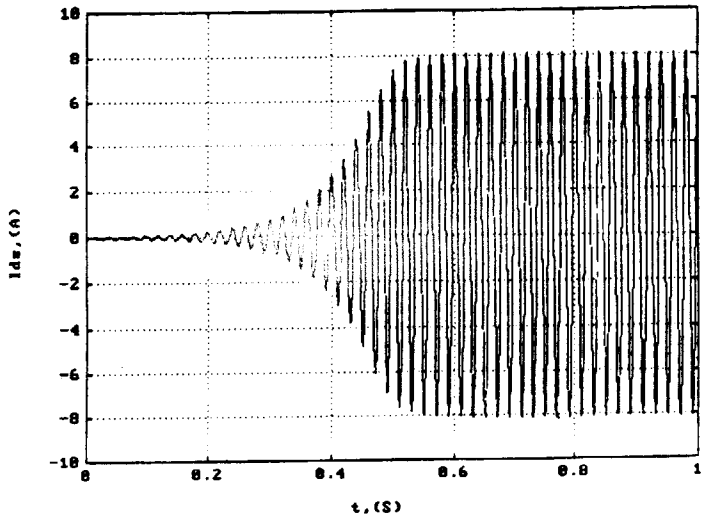
شکل (۴-۱۴) نمونه ای از کمیتها را در دستگاه مرجع اصلی نشان می دهد. در حالت ماندگار جریان i_{as} دارای دامنه ماکزیمم $6/63A$ بوده و ولتاژ v_{as} برابر با $220V$ می باشد. بالاخره تغییرات جریان روتور در دستگاه مرجع روتور در شکل (۴-۱۴ پ) آورده شده است. علت وقوع چنین تغییراتی در جریان روتور، جذب توان زیاد بهنگام راه اندازی توسط استاتور می باشد.

۴-۶-۱-۲ - روش فلوی پیوندی

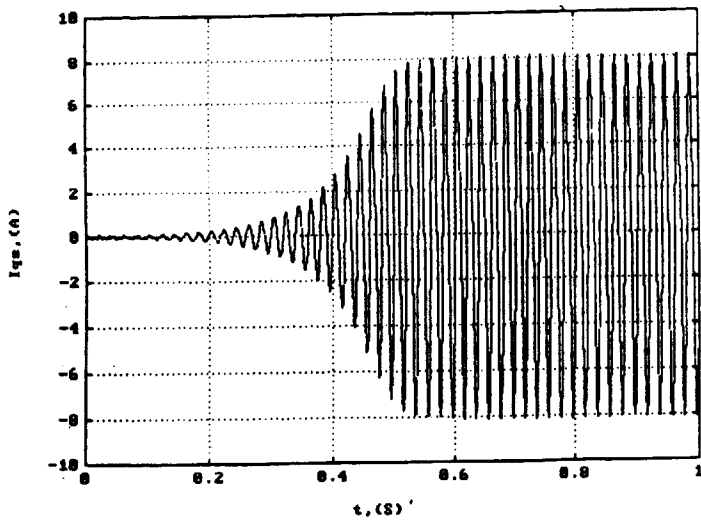
تفاوت این روش با متد قبلی فقط در بردار حالت می باشد. در اینجا نیز ابتدا مقادیر λ_{mq} و λ_{md} طبق بلوک دیاگرام شکل (۴-۹) و روابط (۴-۵۶) و (۴-۵۷) محاسبه می شوند. برای این منظور، تابع تولید کننده $f(\lambda_m)$ را بر حسب λ_m از منحنی اشباع بی باری بدست می آوریم (شکل ۴-۱۵).

با حل معادلات حالت (۴-۴۸) به ازای شرایط اولیه مناسب، متغیرهای λ_{qs} ، λ_{ds} ، λ_{qr} ، λ_{dr} و v_{qs} و v_{ds} محاسبه می گردند. شکل (۴-۱۶) تغییرات این کمیات را نشان

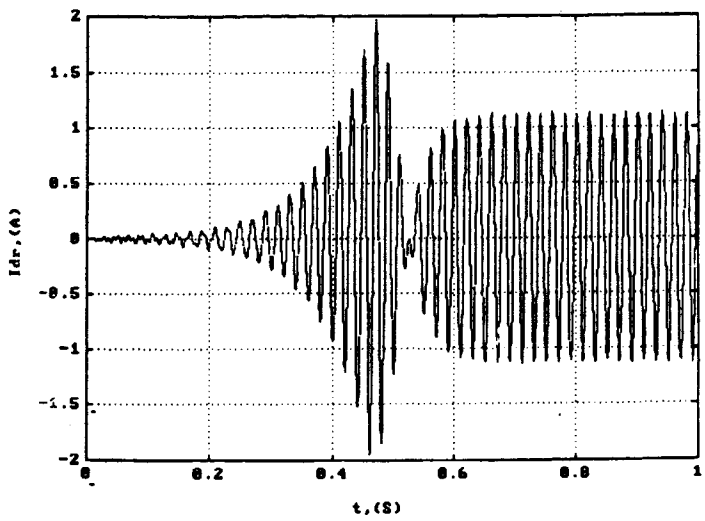
شکل ۴-۱۲ - تغییرات جریانها و ولتاژهای دو محور d و q بهنگام ولتاژسازی (الف تاج).



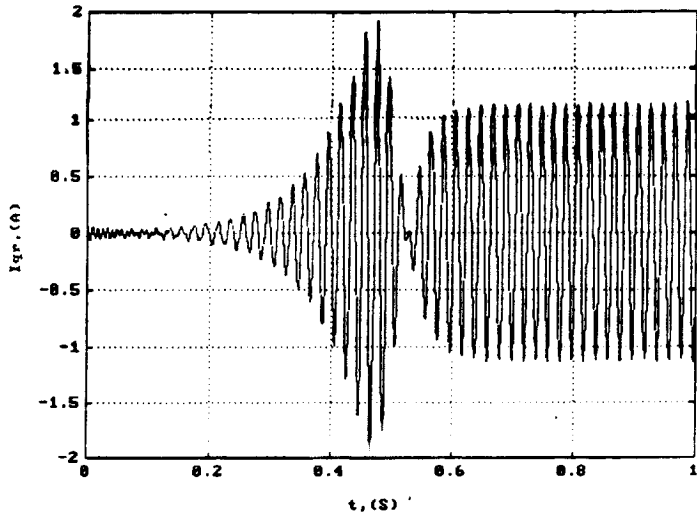
شکل ۴-۱۲ - الف - تغییرات I_{ds} بازمان.



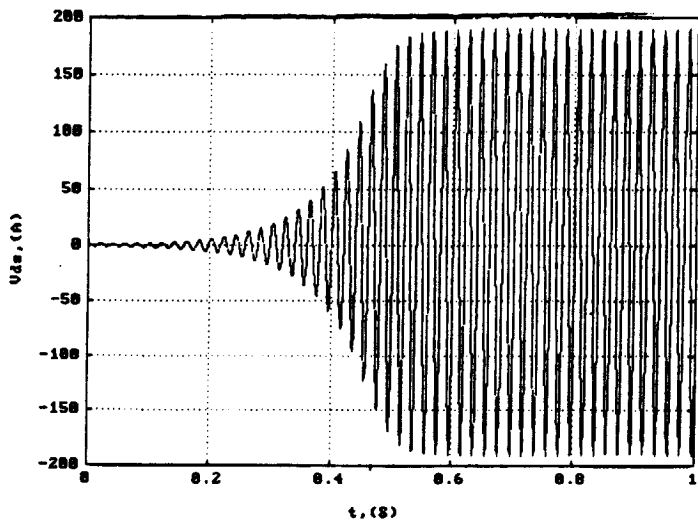
شکل ۴-۱۲ - ب - تغییرات I_{qs} بازمان.



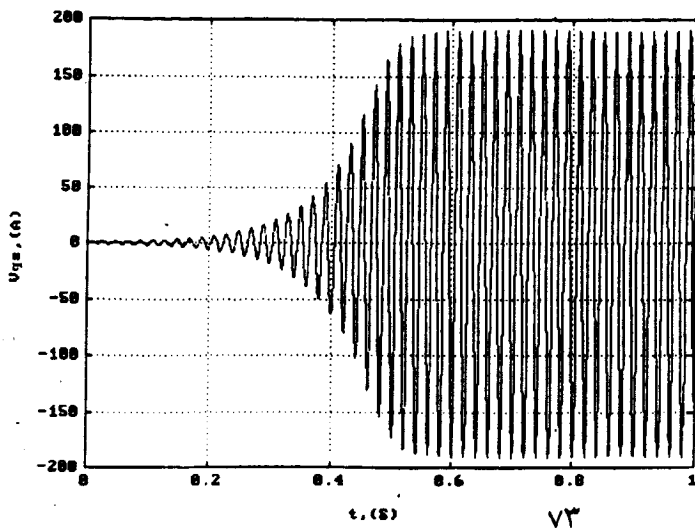
شکل ۴-۱۲ - پ - تغییرات I_{dr} بازمان.



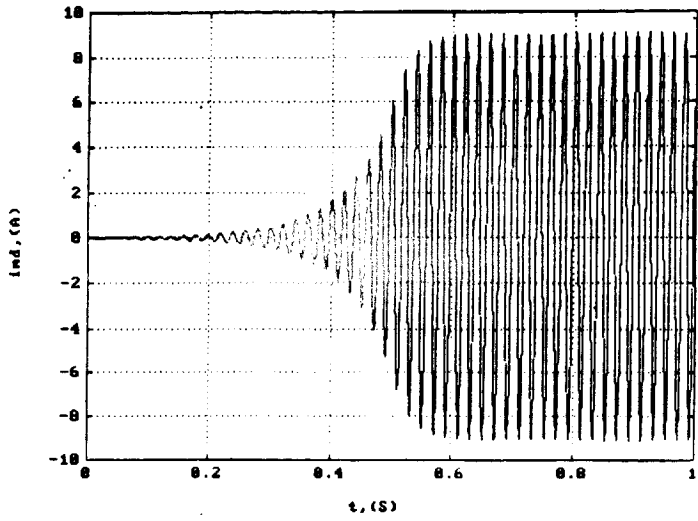
شکل ۴-۱۲-ت - تغییرات i_{qr} بازمان.



شکل ۴-۱۲-ث - تغییرات V_{ds} بازمان.

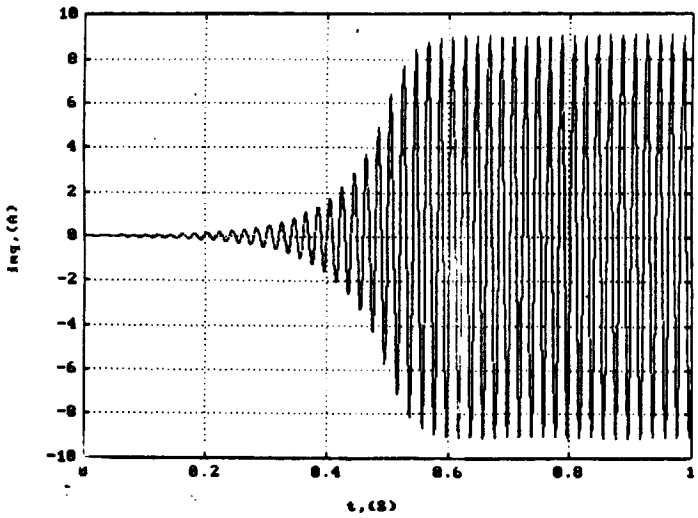


شکل ۴-۱۲-ج - تغییرات V_{qs} بازمان.

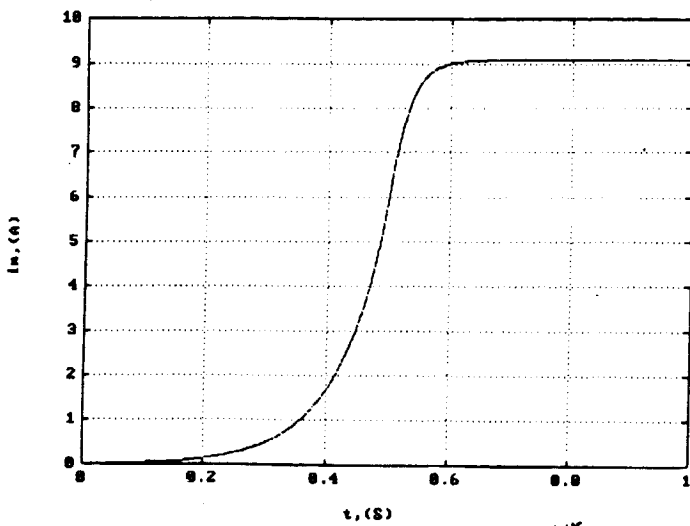


شکل ۴-۱۳- تغییرات i_m و L_m با
زمان بهنگام ولتاژسازی
(الف تاج).

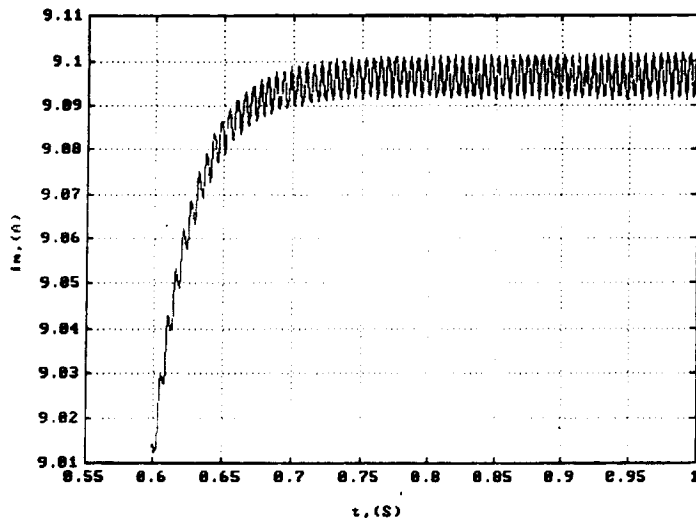
شکل ۴-۱۳- الف - تغییرات i_{md} با زمان.



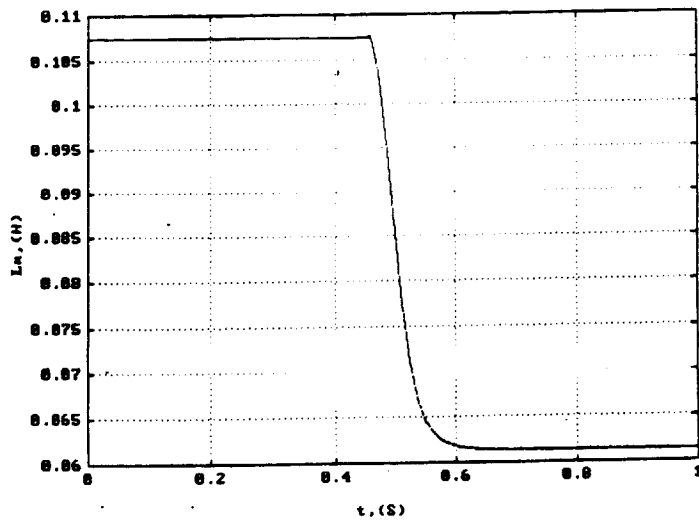
شکل ۴-۱۳- ب - تغییرات i_{mq} با زمان.



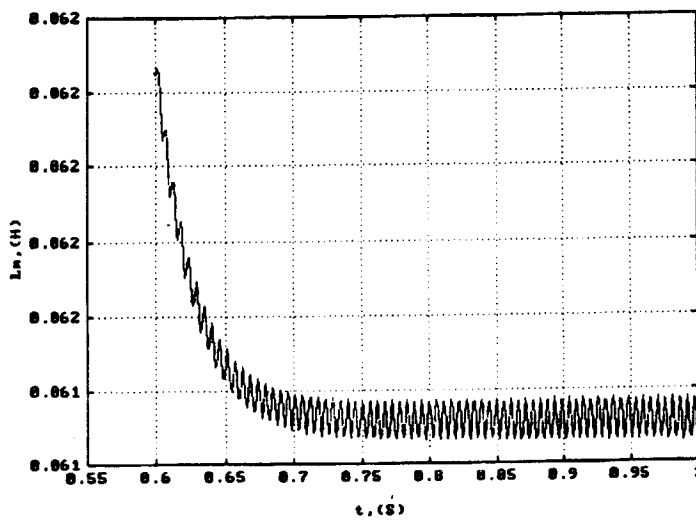
شکل ۴-۱۳- ب - تغییرات i_m با زمان.



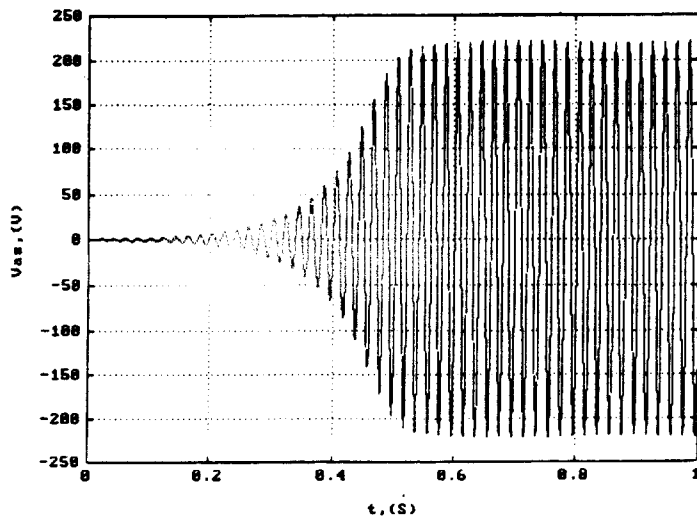
شکل ۴-۱۳-ت - تغییرات i_m
(بزرگ شده شکل پ).



شکل ۴-۱۳-ث - تغییرات L_m با زمان.

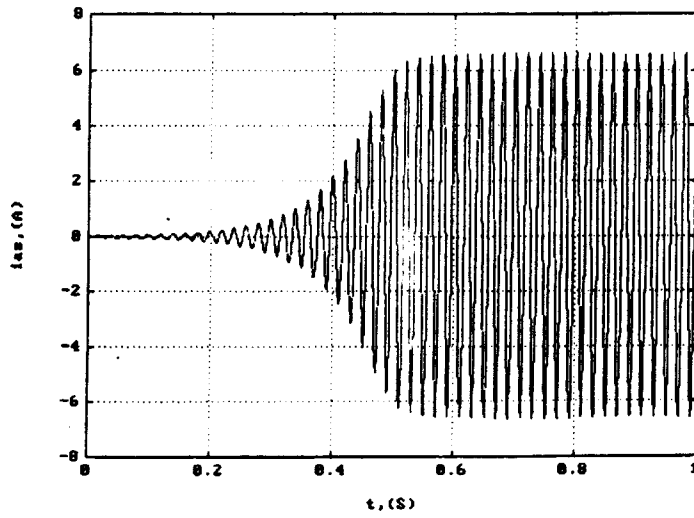


شکل ۴-۱۳-ج - تغییرات L_m
(بزرگ شده شکل ث).

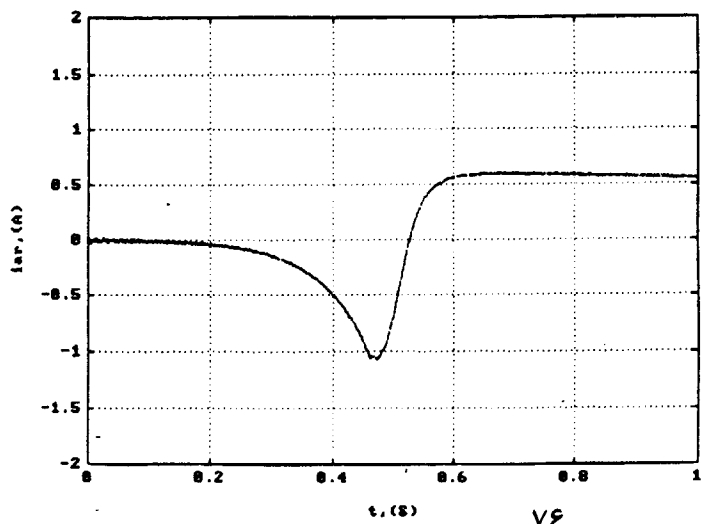


شکل ۴-۱۴- جریان ولتاژ استاتور و
جریان روتور بهنگام
ولتاژ سازی (الف تا پ).

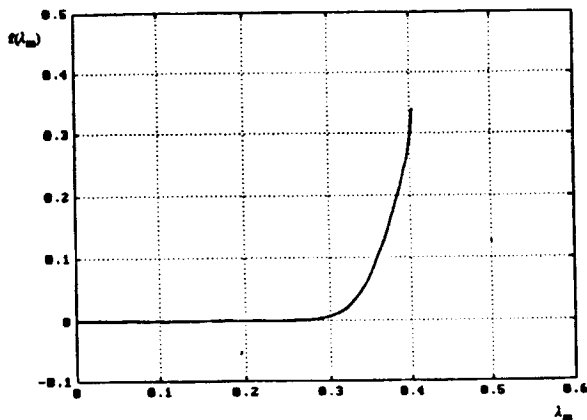
شکل ۴-۱۴- الف - ولتاژ استاتور (فاز a).



شکل ۴-۱۴- ب - جریان استاتور (فاز a).



شکل ۴-۱۴- پ - جریان رتور (فاز a).



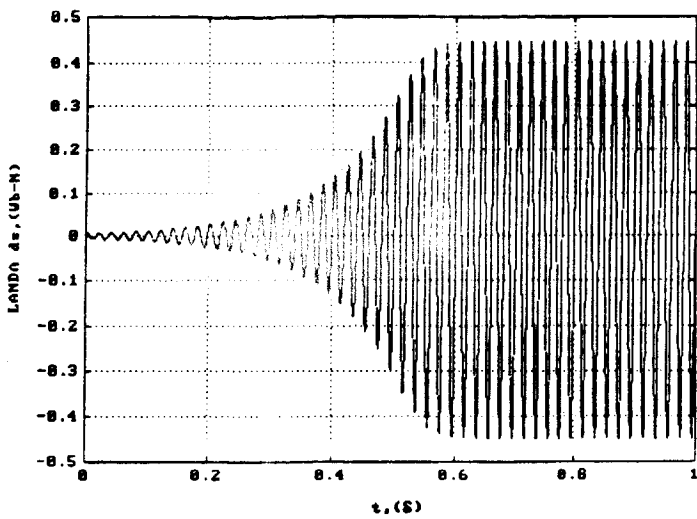
شکل ۴-۱۵- $f(\lambda_m)$ بر حسب λ_m برای ماشین
قسمت ۴-۶-۱.

می‌دهد. در اینجا نیز ماشین در کمتر از 0.6 ثانیه با حالت ماندگار می‌رسد. بایستی دقت شود که نحوه رسیدن به حالت ماندگار بستگی شدیدی به شرایط اولیه معادله حالت دارد. بطوریکه با تغییر آن این زمان نیز کم و زیاد می‌شود. شرایط اولیه در حقیقت بیانگر پسماند مغناطیسی می‌باشد.

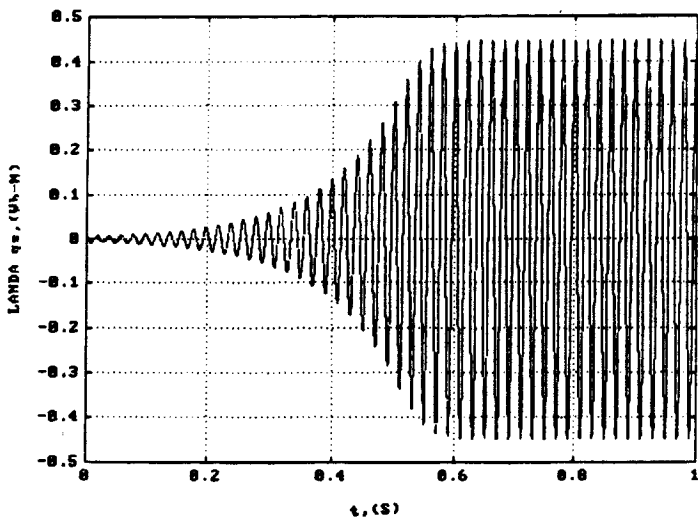
شکل (۴-۱۷) تغییرات کمیات غیرخطی λ_{md} ، λ_{mq} و λ_m را در طول ولتاژ سازی نشان می‌دهد. همانطوریکه از شکل بزرگ شده λ_m معلوم است، این فلوی پیوندی در حالت ماندگار در یک دامنه بسیار کوچکی نوسان می‌کند.

شکل (۴-۱۸) نمونه‌ای از کمیت‌های دستگاه مرجع اصلی را نشان می‌دهد. در حالت ماندگار مقدار ماکزیمم دامنه جریان $6/75A$ و ولتاژ حدوداً 220 ولت می‌باشد. تغییرات جریان روتور نیز مثل حالت قبل بوده و تنها اختلاف در نوسانات اولیه آن می‌باشد. مقایسه دوارش فوق، یکسانی آنها را بطور وضوح نشان می‌دهد. ولی در مواردی که نوسانات گذرا آشکار می‌شود شاید بخاطر مشتقات جریان باشد. تغییرات در شار بعلت عدم گرفتن مشتق از منحنی اشباع کاملاً یکنواخت تر می‌باشد.

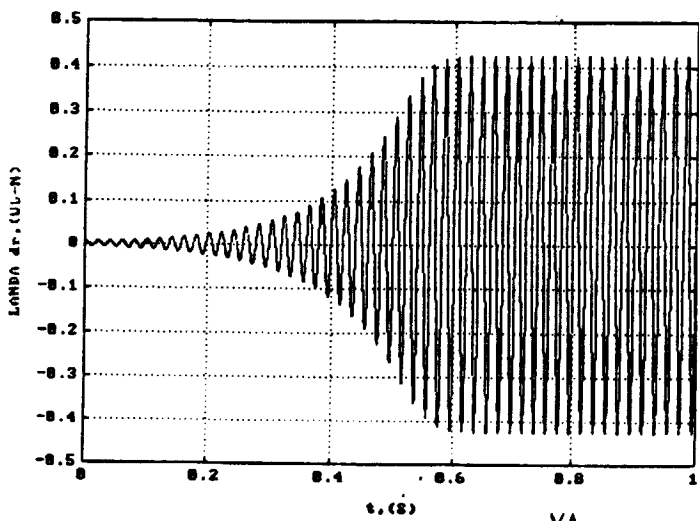
شکل ۴-۱۶- تغییرات فلوی پیوندی
و ولتاژهای دو محور d و q
بهنگام ولتاژسازی (الف تاج).



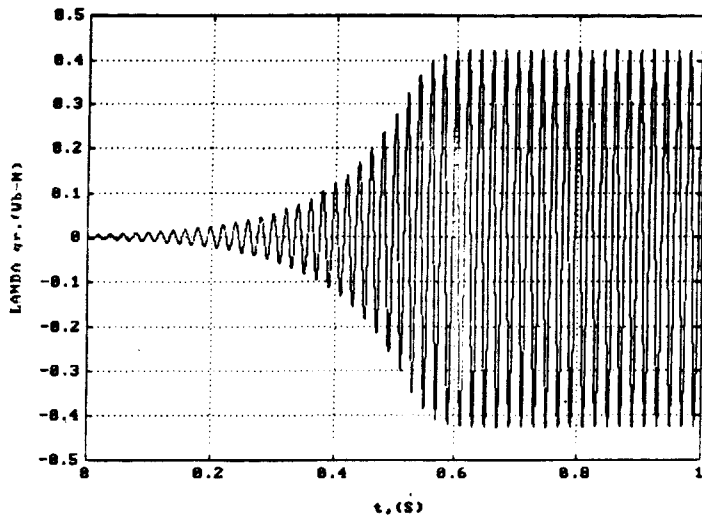
شکل ۴-۱۶- الف - تغییرات λ_{ds} با زمان.



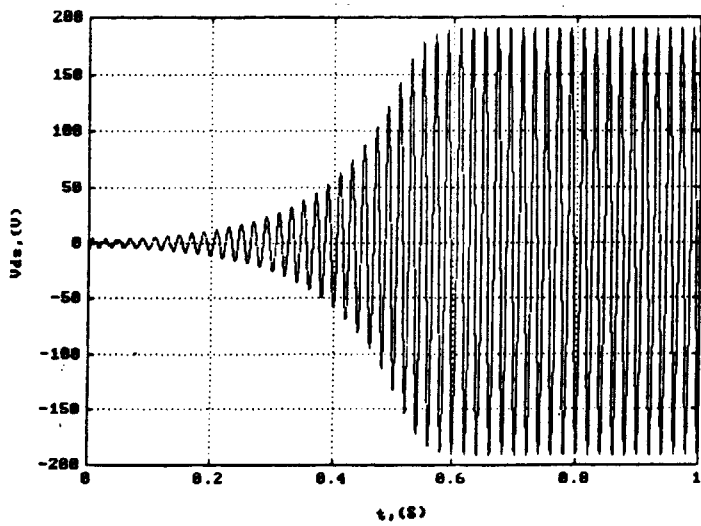
شکل ۴-۱۶- ب - تغییرات λ_{qs} با زمان.



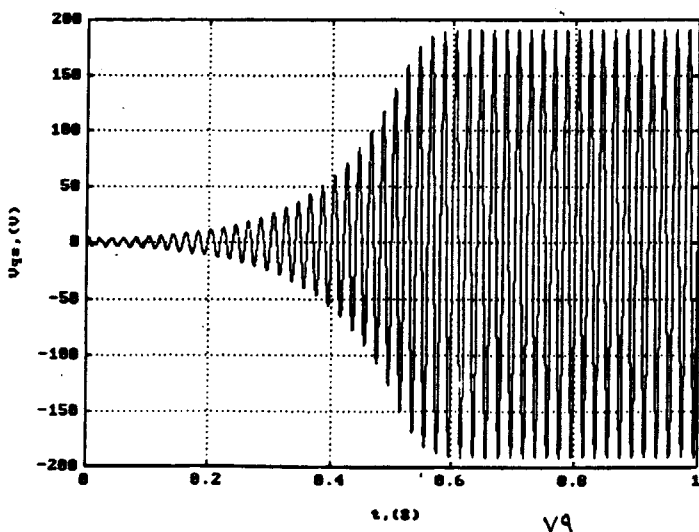
شکل ۴-۱۶- پ - تغییرات λ_{dr} با زمان.



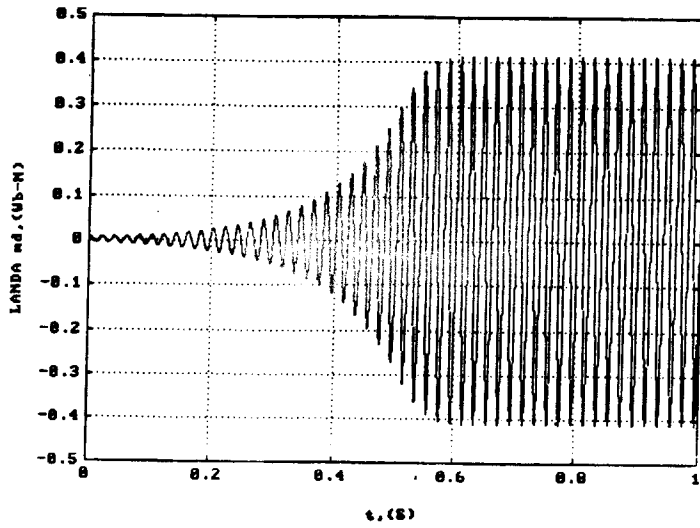
شکل ۴-۱۶-ت - تغییرات λ_{qr} بازمان.



شکل ۴-۱۶-ث - تغییرات V_{ds} بازمان.

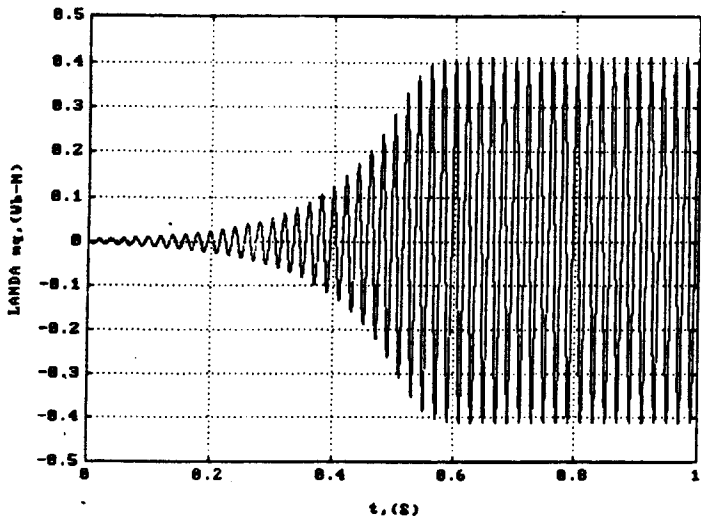


شکل ۴-۱۶-ج - تغییرات V_{qs} بازمان.

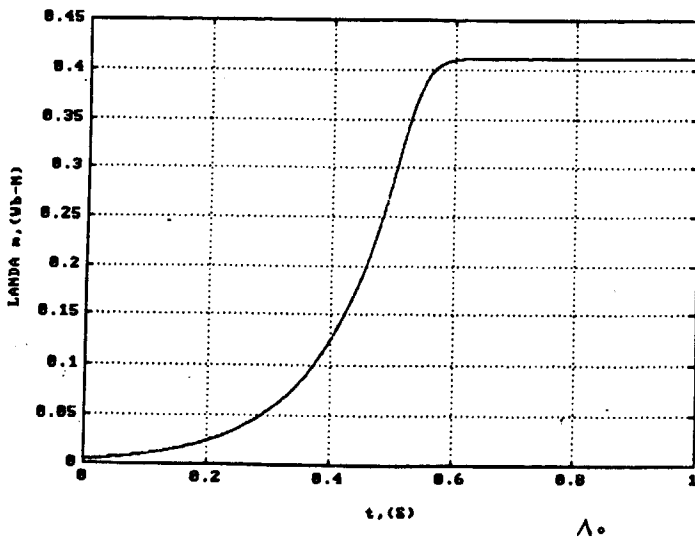


شکل ۴-۱۷- تغییرات λ_m بازمان
بهنگام ولتاژسازی
(الف تا پ).

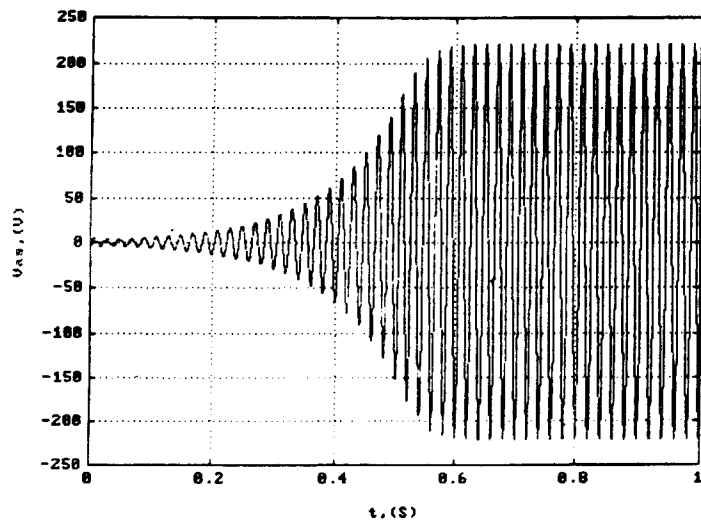
شکل ۴-۱۷- الف - تغییرات λ_{md} بازمان.



شکل ۴-۱۷- ب - تغییرات λ_{mq} بازمان.

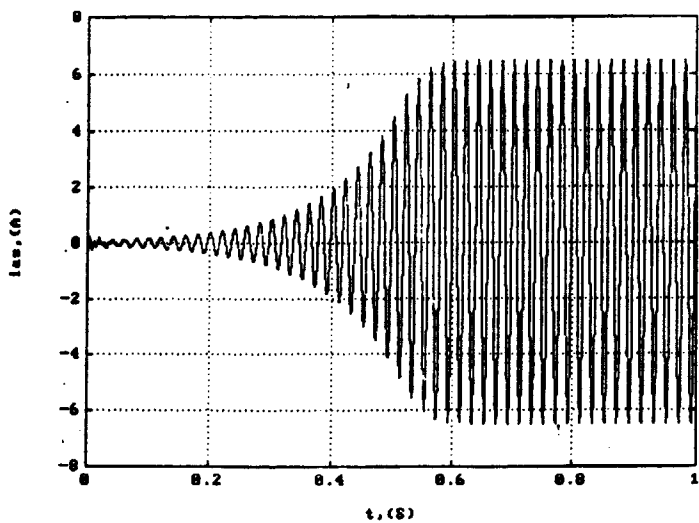


شکل ۴-۱۷- پ - تغییرات λ_m بازمان.

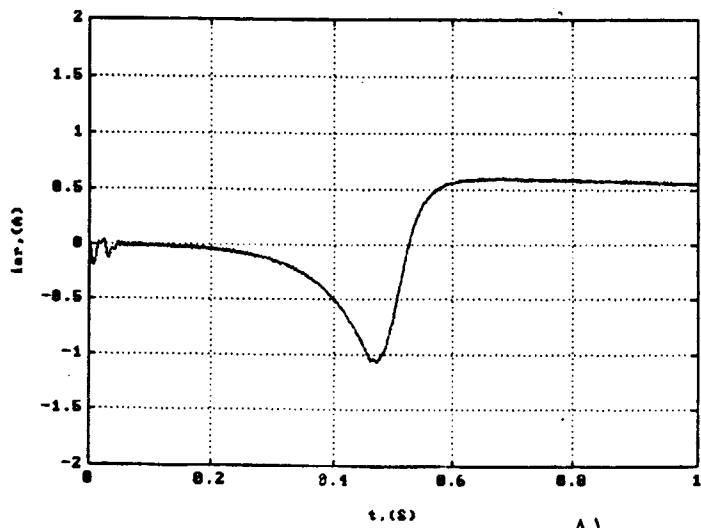


شکل ۴-۱۸- جریان وولتاژ استاتور
و جریان رتور بهنگام
ولتاژ سازی (الف تا پ).

شکل ۴-۱۸- الف - ولتاژ استاتور (فاز a).



شکل ۴-۱۸- ب - جریان استاتور (فاز a).

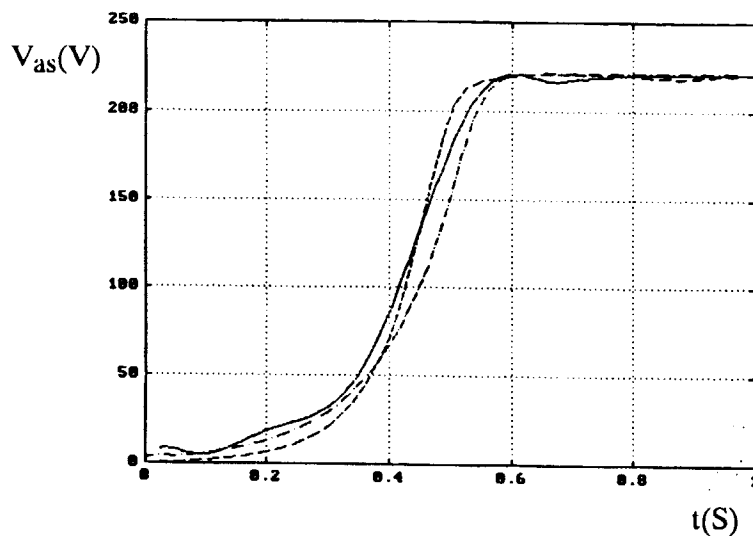


شکل ۴-۱۸- پ - جریان رتور (فاز a).

۴-۶-۲ - مقایسه با نتایج عملی

مقایسه داده های عملی با نتایج تئوری می تواند معیار خوبی برای صحت روشهای بکاربرده شده باشد. برای چنین مقایسه ای پوش منحنی فاز a استاتور (شکلهای ۴-۱۴ الف و ۴-۱۸ الف) با پوش منحنی همین ولتاژ که از مرجع [۱۵] بدست آمده در شکل ۴-۱۹ رسم گردیده است.

همانطوریکه از این شکل معلوم است، هر سه منحنی به هم دیگر نزدیک بوده و علت اختلاف موجود، خطای محاسباتی و آزمایشگاهی است.



شکل ۴-۱۹ - مقایسه نتایج تئوری با داده های عملی.

- منحنی پوش ولتاژ V_{as} (نتایج عملی)
- منحنی پوش ولتاژ V_{as} (روش جریان)
- . - منحنی پوش ولتاژ V_{as} (روش فلو پیوندی)

فصل پنجم

بررسی حالت ماندگار ژنراتور القایی

در این فصل آنالیز حالت ماندگار ژنراتور القایی مجزا (یا ایزوله) بررسی می شود. در فصل قبل پروسه گذرای ولتاژ سازی بر اساس پدیده تحریک خودی بطور کامل توضیح داده شد و با شبیه سازی کامپیوتری نحوه تشکیل ولتاژ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مشاهده گردید که بدلیل در نظر گرفتن اشباع و اثر مهم آن بر پدیده تحریک خودی و ولتاژ سازی، معادلات حاکم غیر خطی بودند و آنالیز آنها با دست مشکل بود. ولی در بررسی کارکرد ماندگار اطلاع دقیق از پروسه گذرا لازم و ضروری نیست در نتیجه بجای معادلات دیفرانسیل غیر خطی کار بر روی معادلات جبری غیر خطی انجام می شود.

نکته دیگر مشخص کردن محدوده بحث است. بر خلاف ژنراتور القایی متصل به شبکه قدرت، هر دو پارامتر فرکانس و راکتانس مغناطیس کننده (که تابع اشباع مغناطیسی است) در ژنراتور مجزا و ایزوله علیرغم ثابت ماندن سرعت روتور می تواند تغییر کند. پس حالت کلی VSVF در نظر گرفته خواهد شد. در بخش اول برای تأکید بیشتر، یک سری از پارامترهای مهم مدار معادل ماندگار معرفی و توضیح داده شده است.

۱-۵ - لیست پارامترها

کلیه پارامترهای مدار معادل حالت ماندگار (شکل ۲-۵) بعلاوه چند پارامتر اضافی دیگر در بررسی اخیر مطرح می باشند که ذکر آنها ضروری بنظر می رسد:

مقاومت معادل تلفات هسته، مقاومت بار هر فاز : r_e, R

راکتانس خازنی (مربوط به خازن ترمینال C)، راکتانس بار هر فاز : X_c, X

توجه شود که تمامی راکتانس های مدار معادل ماندگار و X و X_c در فرکانس نامی f_b می باشند.

- Z : امپدانس یک فاز سه فاز متعادل که به معادل دو محوری تبدیل شده است.
- ω_r : سرعت روتور (rad/s)
- ω_b : سرعت نامی استاتور (سرعت سنکرون)
- ν : سرعت یکه روتور
- f : فرکانس تولید شده (HZ)
- f_b : فرکانس پایه (50 HZ)
- F : فرکانس یکه (فرکانس نامی / فرکانس تولید شده)
- I_L, V_t, V_g, E_1 : فیزورهای جریان بار، ولتاژ ترمینال و فاصله هوایی در فرکانس f ، ولتاژ فاصله هوایی.
- P : اپراتور $(\frac{d}{dt})$

۵-۲ - کارکرد حالت ماندگار

مشخصات حالت ماندگار را می توان با استفاده از مدار معادل ماشین القایی بدست

آورد. مدار معادل شکل (۲-۵) مجدداً با اضافه کردن بار، خازن و اثر تلفات هسته توسط

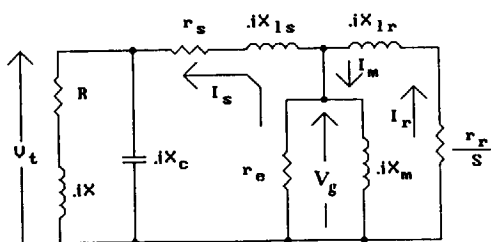
مقاومت r_e در شکل (۱-۵) رسم

شده است. توان مکانیکی ورودی

توسط ژنراتور به توان الکتریکی

تبدیل می شود. در طی این تبدیل

می توان میلان انرژی را رسم کرد.



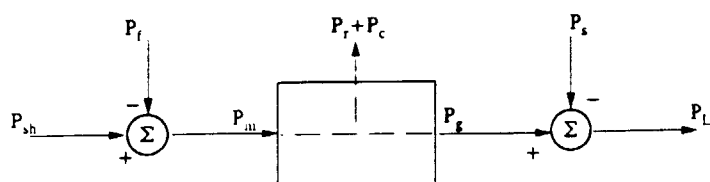
شکل (۲-۵) پخش توان در ژنراتور شکل ۱-۵- مدار معادل ژنراتور القایی در فرکانس استاتور.

القایی را نشان می دهد.

که بعداً این دیاگرام اساس فرمولهای بدست آمده خواهد شد. لازم بذکر است که لغزش

کسری از سرعت استاتور بوده و در مد ژنراتور منفی می باشد :

$$S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (5-1)$$



شکل ۵-۲ - بلوک دیاگرام پخش توان حقیقی.

P_{sh} : توان مکانیکی ورودی به شفت؛ P_f : تلفات اصطحلاک؛ P_m : توان مکانیکی ورودی به ماشین. $P_r + P_c$: توان تلفاتی در روتور شامل تلفات مسی بعلاوه تلفات هسته؛ P_g : توان الکترومغناطیسی. P_s : تلفات مسی در استاتور؛ P_L : توان اعمالی به بار (خروجی)

همچنین در اینجا دوباره بر این موضوع تأکید می شود که ω_r و ω هر دو قابل تغییر

هستند، چرا که ژنراتور را ایزوله در نظر می گیریم.

۵-۳ - تعیین حالت تعادل در فرکانس تحریک f

همانطوریکه قبلاً اشاره شد در این بررسی جزئیات پروسه گذرای ولتاژ سازی اهمیتی نداشته و برای بدست آوردن اصل و اساسی جهت آنالیز ماندگار همین قدر کافی است بدانیم که وجود یک ریشه با مقدار حقیقی مثبت در چند جمله ای مشخصه سیستم فوق (شکل ۴-۱) منجر به شروع تحریک خودی می گردد. در حالیکه ولتاژ ساخته می شود شار فاصله هوایی بتدریج ماشین را به اشباع می برد بطوریکه راکتانس مغناطیسی اشباع شده کم کم به مقداری کاهش می یابد که قسمت مثبت ریشه فوق صفر می گردد. این علامت رسیدن به حالت ماندگار است. بنابراین مقدار X_m اشباع شده بایستی در آنالیز ماندگار استفاده شود.

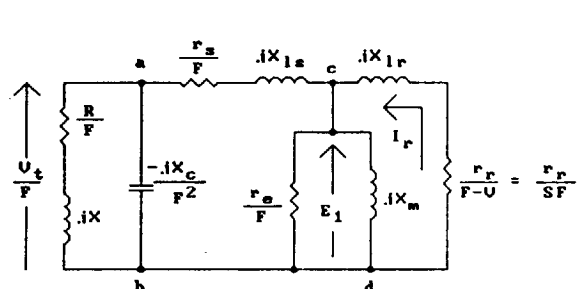
پس فرض می شود تحریک خودی با موفقیت انجام شده و سیستم به حالت ماندگار رسیده است. ذکر این موضوع نیز جالب است که در حالت ماندگار می توان این دید را نیز داشت که حالت تعادل خاصیتهایی از ژنراتور القایی مثل مبدل انرژی و مبدل فرکانسی را نشان می دهد. چون در این بخش فقط مشخصات الکتریکی مد نظر است، پس توجه خودمان را روی جمع کننده سمت راست بلوک دیاگرام شکل (۵-۲) متمرکز می کنیم.

یعنی جایی که توان عبوری از فاصله هوایی بصورت تلفات مسی استاتور و توان بار مصرف می شود. در حقیقت این اصل بقای توان است که در حالت ماندگار بکار می رود. برای توان راکتیو نیز اصل یکسانی را می پذیریم، یعنی وارهای مصرف شده در همه راکتانسهای انداکتیو بایستی از وارهای خازن ترمینالها تأمین شود.

۵-۴ - شبکه معادل در فرکانس تحریک f

در صورتیکه ماشین القایی با سرعت متغیری بحرکت درآید فرکانس استاتور نیز متغیر خواهد بود. با توجه به اینکه منحنی مغناطیس کننده (E_1, i_m) در فرکانس نامی بدست می آید شبکه شکل (۵-۱) باید به این فرکانس انتقال داده شود. در اینصورت تمامی پارامترها مقادیری در فرکانس نامی خواهند داشت.

با فرض اینکه تمامی راکتانسهای انداکتیو متناسب با فرکانس می باشند بعلت تغییر فرکانس، مدار معادل جدید شکل (۵-۳) بدست می آید.



$$S = \frac{F - \nu}{F}$$

در این مدار لغزش S است. برای جلوگیری از ایجاد ابهام

ذکر این نکته بسیار مهم می باشد که

V_g ولتاژ فاصله هوایی و Γ_e مقاومت

تلفات هسته در فرکانس

f می باشند. بنابراین در بعضی

مقالات بجای $\frac{V_g}{F}$ مستقیماً مقادیر آنها در فرکانس نامی (E_1) نوشته می شود که تأثیری روی محاسبات ندارد.

۵-۵ - روشهای بررسی حالت ماندگار

در حالت ماندگار با داشتن مقادیر خازن، سرعت روتور و بار، تنها پارامترهای X_m و F مجهول خواهند بود. بنابراین بعد از محاسبه آنها می توان با حل مدار معادل، کمیتهایی مثل جریانها و ولتاژها را بدست آورد. در دهه گذشته محققان زیادی روی این مسئله کار

کرده و مقالات متعددی را ارائه داده‌اند. با بررسی موشکافانه آنها می‌توان دو روش کلی زیر را نتیجه گرفت :

I - متد استفاده از مدار معادل حالت ماندگار

II - متد فرکانس مختلط

روشهای فوق در دو بخش بعدی توضیح داده می‌شود.

۵-۶ - محاسبه X_m و F بر اساس مدار معادل ماندگار

با دقت در مقالاتی که اساس مطالعه‌شان مدار معادل ماندگار است می‌توان به اصل یکسانی در روشهای مطالعه رسید. این اصل همان بقای توان حقیقی و وار (راکتیو) است. با فرمول سازی این اصل بر حسب کمیت‌های شبکه معادل شکل (۵-۳) و توجه به این نکته که شامل هیچ منبع جریان یا منبع نیروی محرکه (emf) نیست می‌توان به دو رابطه زیر دست یافت:

$$(Y_s + Y_m + Y_r) E_1 = 0 \quad (5-2)$$

$$Z_s I_s = 0 \quad (5-3)$$

ادمیتانس‌های Y_s , Y_r , Y_m به ترتیب ادمیتانسهای مدارهای استاتور، روتور و مدار مغناطیسی درگره فاصله هوائی (گره c) می‌باشند و Z_s امپدانس حلقه است که توسط جریان I_s دیده می‌شود :

$$Z_s = Z_A + Z_B + Z_c$$

$$Z_A = Z_r \parallel Z_m = \left(\frac{1}{Y_r}\right) \parallel \left(\frac{1}{Y_m}\right) \quad (5-5)$$

$$Z_B = \frac{I_s}{F} + jX_{ls} , Z_c = Z_L \parallel \left(-j\frac{X_c}{F}\right)$$

در حالت ماندگار E_1 (یا I_s) مخالف صفر هستند. بنابراین از (۵-۲) و (۵-۳) معادلات زیر بدست می‌آید :

$$Y_s + Y_m + Y_r = 0 \quad (5-6)$$

$$Z_s = 0 \quad (5-7)$$

روابط فوق لازم می‌دارند که قسمت‌های حقیقی و مجازی توأمأ در هر شرایطی برای حالت ماندگار برابر صفر باشند. بدین ترتیب معادلات تعادل که توصیف کننده نقطه کار در فرکانس تحریک f است، بدست می‌آید.

با توجه به اینکه استفاده یکی از معادلات (5-6) یا (5-7) کافی است پس دو روش مطرح می‌گردد:

I - متد امیدانس حلقه [18 و 19]: به ازای بار و سرعت روتور معین از مساوی صفر قرار دادن قسمت‌های حقیقی و مجازی Z_s ، دو معادله هم زمان غیر خطی بر حسب F و X_m بدست می‌آید. این معادلات غیر خطی را بطرق مختلف از جمله نیوتن رافسون می‌توان حل کرد. با دانستن F و X_m و به کمک منحنی مغناطیس کننده مدار معادل بطور کامل حل می‌شود و می‌توان عملکردهای ژنراتور القایی را بدست آورد.

II - متد ادمیتانس گره [20 و 3]: در این روش ادمیتانس‌های متصل به گره فاصله هوایی (گره c در شکل 5-3) را در نظر می‌گیرند و با مساوی صفر قرار دادن قسمت‌های مجازی و حقیقی مجموع آنها دو معادله غیر خطی بر حسب F و X_m بدست می‌آید که با روشهای عددی می‌توان حل کرد. ولی در صورتیکه $r_e = \infty$ باشد یعنی تلفات هسته را در نظر نگیریم از مساوی صفر قرار دادن قسمت حقیقی مجموع ادمیتانس‌ها یک چند جمله‌ای بر حسب F بدست می‌آید و X_m نیز با صفر قرار دادن قسمت مجازی مجموع آنها و مقدار F بدست آمده از چند جمله‌ای قبلی محاسبه می‌شود.

5-6-1 - بدست آوردن X_m و F با متد امیدانس حلقه

گفتیم که از $Z_s = 0$ دو معادله غیر خطی همزمان بدست می‌آید. این معادلات بشرح

زیر می‌باشند:

$$f(X_m, F) = \sum_{i=0}^{\infty} (a_{\nu_i} X_m + a_{\nu_i + 1}) F^i = 0 \quad (5-8)$$

$$g(X_m, F) = \sum_{i=0}^{\infty} (b_{\nu_i} X_m + b_{\nu_i + 1}) F^i = 0 \quad (5-9)$$

مقادیر ضرایب a_i و b_i در مرجع [۱۹] آورده شده است. در صورتیکه از تلفات هسته صرف نظر شود معادله F از درجه سه و معادله g از درجه چهار خواهد بود [۱۹ و ۱۸]. لازم به ذکر است که f و g همان معادلات تعادلند.

در قسمتهای بعدی بطور مختصر روشهای حل معادلات (۵-۸) و (۵-۹) که در مقالات متعددی آمده است توضیح داده می شود.

۵-۶-۱-۱ - روش نیوتن رافسون برای حل معادلات تعادل

معادلات (۵-۸) و (۵-۹) براحتی قابل حل نیستند و از روشهای عددی باید کمک گرفت تا بتوان به ازای امیدانس بار، سرعت و خازن ترمینال معینی، مقادیر X_m اشباع شده و فرکانس یکه F را بدست آورد. برای حل معادلات غیر خطی روشهای متعددی وجود دارد ولی متد نیوتن رافسون از جمله مؤثرترین آنهاست [۲۱].

اگر $F(x) = 0$ معادله برداری باشد که هر عنصر آن بفرم $F_i(X_1, X_2, \dots, X_N) = 0$

هستند در اینصورت :

$$F(x + \delta x) = F(x) + J \cdot \delta x + O(\delta x^2) \quad (5-10)$$

با صرف نظر کردن از درجات بالاتر $O(\delta x^2)$ و جایگذاری $F(x + \delta x) = 0$ خواهیم داشت:

$$\delta x = J^{-1} \cdot (-F) \quad (5-11)$$

در نتیجه مقدار جدید x برابر است با :

$$x_n = x_{n-1} + \delta x \quad (5-12)$$

J ماتریس ژاکوبین می باشد. در مسئله ما معادلات (۵-۸) و (۵-۹) تشکیل معادله

$F(x) = 0$ را می دهند و ماتریس J بصورت زیر است :

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f(X_m, F) \\ g(X_m, F) \end{bmatrix} = 0 \quad ; \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial X_m} & \frac{\partial f}{\partial F} \\ \frac{\partial g}{\partial X_m} & \frac{\partial g}{\partial F} \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

از آنجاییکه $F \approx v$ و X_m کمتر از راکتانس مغناطیس کننده غیر اشباع است، بنابراین

حدس اولیه بصورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\begin{aligned} X_{m0} &= X_m \text{ (غیر اشباع)} \\ F_0 &= v \end{aligned} \quad \text{یا} \quad \mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} X_{m0} \\ F_0 \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

حال با استفاده از (5-13) و (5-11) مقدار $\delta \mathbf{x}$ را بدست آورده و از (5-12)

مقادیر جدید بردار \mathbf{x} را محاسبه کرده و پروسه تکرار ادامه می یابد تا اینکه $|g(X_m, F)| < \varepsilon$

یا $|f(X_m, F)| < \varepsilon$. با یک الگوریتم ساده کامپیوتری می توان مجهولهای فوق را محاسبه

کرد [18].

5-6-1-2 - روش حذف متغیر برای حل معادلات تعادل

مقاومت r_e تابعی از E_1 (یا X_m) است، پس در صورتیکه از تلفات هسته صرف نظر

شود، ضرایب a_i و b_i در معادلات (5-8) و (5-9) فقط بستگی به پارامترهای ماشین

خواهند داشت و در واقع مقادیر ثابتی خواهند بود. بنابراین می توان متغیر X_m را در (5-8)

و (5-9) حذف کرد.

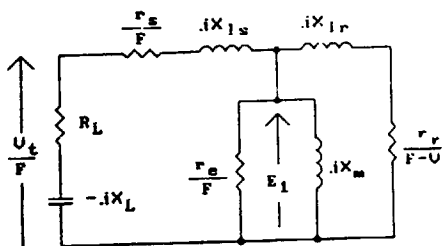
$$X_m = - \frac{\sum_{i=0}^r a_{\gamma i} + 1 F_i}{\sum_{i=0}^r a_{\gamma i} F_i} \quad \text{و} \quad X_m = - \frac{\sum_{i=0}^r b_{\gamma i} + 1 F_i}{\sum_{i=0}^r b_{\gamma i} F_i} \quad (5-15)$$

با حذف X_m یک چند جمله ای از درجه هفت بدست می آید:

$$\sum_{i=0}^v \alpha_i F_i = 0 \quad (5-16)$$

ضرایب α_i در مرجع [۲۲] آورده شده است. معادله (۵-۱۶) را می توان به روش سکانت یا نیوتن حل کرد و بعد از بدست آوردن F مقدار راکتانس مغناطیس کننده را از (۵-۱۵) محاسبه کرد.

۵-۶-۲ - بدست آوردن X_m و F با متد ادمیتانس گره



برای ساده شدن روابط ابتدا در مدار معادل

شکل (۳-۵) می توان ترکیب موازی امپدانس باروخازن تحریک را بصورت $R_L - jX_L$ تبدیل کرد:

شکل ۵-۴ - مدار معادل ژنراتور سنکرون.

$$R_L = \frac{RX_c^2}{FD} \quad X_L = \frac{X_c(XX_c + R^2 + F^2X^2)}{D} \quad (۵-۱۷)$$

$$D = F^2X^2 + F^2(R^2 - 2XX_c) + X_c^2$$

از صفر قراردادن قسمتهای حقیقی و مجازی مجموع ادمیتانسهای مربوط به شکل

(۴-۵) به روابط زیر می رسیم:

$$\frac{(R_L + r_s/F)}{(X_{ls} - X_c)^2 + (R_L + r_s/F)^2} + \frac{r_r/(F - v)}{X_{lr}^2 + (r_r/(F - v))^2} + \frac{F}{r_e} = 0 \quad (۵-۱۸)$$

$$-\frac{1}{X_m} - \frac{X_{lr}}{X_{lr}^2 + (r_r/(F - v))^2} - \frac{(X_{ls} - X_c)}{(X_{ls} - X_L)^2 + (R_L + X_{ls}/F)^2} = 0 \quad (۵-۱۹)$$

اگر این رابطه را در $|E_1|^2$ ضرب شود متناظر با بقای توان راکتیو خواهد شد.

غیر خطی بودن رابطه (۵-۱۸) بعنوان تابعی از F دستیابی به یک فرم بسته کلی را

غیر ممکن می سازد. بنابراین باز روش حل عددی مطرح می گردد. با مرتب کردن (۵-۱۸) و

(۵-۱۹) به ترتیب یک چند جمله ای درجه هفت و درجه چهار بر حسب F بدست می آید.

$$p(X_m, F) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i F^i = 0 \quad (5-20)$$

$$q(X_m, F) = \sum_{i=0}^{\infty} (q_{\nu i} X_m + q_{\nu i + 1}) F^i = 0 \quad (5-21)$$

$$X_m = - \frac{\sum_{i=0}^{\infty} q_{\nu i + 1} F^i}{\sum_{i=0}^{\infty} q_{\nu i} F^i} \quad (5-22)$$

ضرایب p_i و q_i در مرجع [۱۳] آمده است. در حالت کلی r_e ثابت نیست و تابعی از

E_1 یا X_m می باشد :

$$r_e = h(E_1) = k(X_m)$$

اگر $r_e = \infty$ باشد معادله p چند جمله‌ای درجه پنج از F خواهد شد. حال به توضیح چند روش حل معادلات تعادل (۵-۲۰) و (۵-۲۱) می پردازیم. از آنجاییکه روش نیوتن رافسون را در بخش ۵-۶-۱-۱ بطور کامل توضیح داده شد برای این معادلات نیز می توان همان روش را بکار برد فقط کافی است f و g با p و q جایگزین گردد.

۵-۶-۲-۱ - روش تکرار برای حل معادلات تعادل

روش تکرار از جمله متدهای عددی است که برای حل معادلات غیر خطی بکار می رود که خود این متد انواع مختلف دارد. در اینجا روش تکرار نقطه ثابت^(۱) توضیح داده می شود. اگر $F(x) = 0$ مجموعه معادلات غیر خطی باشد آن را به فرم معادل زیر تبدیل می کنیم [۲۳]:

$$x = G(x) \quad (5-23)$$

$G(x)$ را تابع تکرار می نامند. از حدس اولیه $x^{(0)}$ شروع می کنیم:

$$x^{(m+1)} = G(x^{(m)}) \quad (5-24)$$

۱- Fixed point iteration

آنقدر جایگذاری در معادله (۵-۲۴) ادامه می‌یابد تا $\varepsilon < |F_i(X)|$ برای $i = 1, 2, 3, \dots, N$ گردد.

روش سریعتر دیگری که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد متد تکرار گوس سایدل می‌باشد. در این روش تکرار فرمول (۵-۲۴) بصورت زیر تغییر می‌کند:

$$x_i^{(m+1)} = G_i(x_1^{(m+1)}, x_2^{(m+1)}, \dots, x_{i-1}^{(m+1)}, x_i^{(m)}, x_{i+1}^{(m)}, \dots, x_N^{(m)}) \quad (5-25)$$

روشهای فوق بسیار کلی است و می‌توان در مورد معادلات (۵-۸) و (۵-۹) و (۵-۲۰) و (۵-۲۱) اعمال نمود. ولی آقای چان [۲۰] معادلات ساده تری را برای روش تکرار نقطه ثابت مطرح می‌سازد که بدلیل کلی بودن روش و همگرا شدن سریع از یک طرف و عدم درگیر شدن در محاسبات ضرایب پیچیده معادلات تعادل از طرف دیگر، بیان و توضیح آن بسیار مفید است.

از مدار شکل (۳-۵) داریم:

$$Y_s = G_s + jB_s = (R_s - jX_T)^{-1} = \frac{R_s}{R_s^2 + X_T^2} + j \frac{X_T}{X_T^2 + R_s^2} \quad (5-26)$$

$$R_s = R_L + \frac{r_s}{F}, \quad X_T = X_L - X_{ls} \quad \text{که در رابطه فوق:}$$

روابط (۵-۱۸) و (۵-۱۹) به شکل زیر درمی‌آیند:

$$G_s + \frac{F}{r_e} + \frac{r_r/(F-v)}{X_{ls}^2 + (r_r/(F-v))^2} = 0 \quad (5-27)$$

$$B_s - \frac{1}{X_m} - \frac{X_{lr}}{(r_r/(F-v))^2 + X_{lr}^2} = 0 \quad (5-28)$$

با فرض $\gamma = F - v$ معادله (۵-۲۷) را می‌توان بصورت زیر نوشت و γ را حساب نمود:

$$G'_s = G_s + \frac{F}{r_e} \quad (5-29)$$

$$(G'_s X_{lr}^2) \gamma^2 + (r_r) \gamma + (G'_s r_r^2) = 0$$

معادله درجه دو فوق براحتی حل می‌شود:

$$\gamma = -\frac{r_r}{2G'_s X_{lr}^2} \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - 4G'_s r_r^2 X_{lr}^2} \right\}$$

چون در مد ژنراتوری λ یک عدد منفی کوچک است، پس علامت منفی داخل اکولاد

را انتخاب می‌کنیم. تابع تکرار از روابط فوق بدست می‌آید:

$$X_m = [B_s - \frac{X_{lr}}{(r_r/(F-v)) + X_{lr}}]^{-1} = G_1(X_m, F) \quad (5-30)$$

$$F = - \frac{r_r}{2G_s X_{lr}} \{1 - \sqrt{1 - 4G_s^2 X_{lr}^2}\} + v = G_2(X_m, F) \quad (5-31)$$

پس با بردار $\mathbf{x} = [X_m \ F]^T$ و تابع تکرار $\mathbf{G}(\mathbf{x}) = [G_1 \ G_2]^T$ و حدس اولیه

(5-14) می‌توان عملیات تکرار را انجام داد. فقط بایستی توجه شود که G_s تابع غیر خطی

است یعنی برای مقدار X_m که در هر مرحله تکرار وجود دارد باید E_1 را حساب کرده و از

تابع $r_e = k(E_1)$ مقدار r_e را دخالت داد. توجه کنید که در روش گوس سایدل با حدس

اولیه $F_0 = v$ شروع کرده و X_m را از (5-30) بدست می‌آوریم. سپس G_s را محاسبه کرده و

از (5-31) مقدار جدید F را حساب می‌کنیم و دوباره پروسه تکرار می‌شود تا اینکه

$$|F^{(m+1)} - F^{(m)}| < \epsilon \quad \text{و} \quad |X_m^{(m+1)} - X_m^{(m)}| < \epsilon$$

5-6-2 روشهای پیشنهادی برای حل معادلات تعادل

محاسبه ضرایب چند جمله‌ایهای تعادل (5-20) و (5-21) بسیار پیچیده بوده و

برای هر نوع باری بایستی روابط پارامتری مربوطه بدست آورده شود. بنابراین برای عدم

درگیر شدن با چنین روابطی از یک طرف و محاسبه سریع X_m و F از طرف دیگر، روشی را

پیشنهاد می‌کنیم که مبتنی بر استفاده مستقیم از رابطه زیر است:

$$\frac{(R_L F + r_s)F}{F^2 (X_{ls} - X_L)^2 + (R_L F + r_s)^2} + \frac{r_s (F - v)}{X_{ls}^2 (F - v)^2 + r_r^2} + \frac{F}{r_e} = 0 \quad (5-32)$$

در حقیقت این رابطه هیچ فرقی با معادله (5-18) ندارد و فقط صورت و مخرج

جمله اول آن را در F^2 و جمله دوم را در $(F - v)^2$ ضرب کرده‌ایم تا از وقوع احتمالی

تقسیم بر صفر در برنامه‌های کامپیوتری جلوگیری گردد.

برای پیدا کردن F و X_m باید مراحل زیر دنبال شود:

1- فرض $F_0 = v$ و (غیر اشباع) $X_{m0} = X_m$ بعنوان مقادیر اولیه

۲- محاسبه E_1 در نتیجه مقاومت r_e .

۳- استفاده از روش عددی سکانت یا نیوتن برای پیدا کردن F از (۵-۳۲).

۴- محاسبه X_m از (۵-۱۹) برای F بدست آمده از مرحله سه.

۵- تکرار مراحل دو تا چهار تا حصول همگرایی.

لازم به ذکر است که برای معادله $p(x) = 0$ فرمولهایی که بایستی در مرحله سه استفاده

شود، به ترتیب برای روشهای سکانت و نیوتن بشرح زیر هستند:

$$X^{(n+1)} = X^{(n)} - P(X^{(n)}) \frac{X^{(n)} - X^{(n-1)}}{P(X^{(n)}) - P(X^{(n-1)})} \quad (5-33)$$

$$X^{(n+1)} = X^{(n)} - \frac{P(X^{(n)})}{P'(X^{(n)})} \quad (5-34)$$

در قسمت بعد با استفاده از برنامه نویسی و به کمک کامپیوتر ثابت شده است که

روشهای پیشنهادی سریعتر می باشند.

۵-۶-۳ - مقایسه روشها

در روش نیوتن رافسون محاسبه ماتریس ژاکوبین بعلت محاسبه چندین مشتق،

مسئله را تا حدودی پیچیده ساخته و در صورت احتساب مقاومت r_e بدلیل اینکه

$r_e = k(X_m)$ یعنی تابعی از راکتانس مغناطیس کننده می باشد، محاسبات مشتق بغرنجتر

می شود. بنابراین روش نیوتن رافسون را کنار گذاشته و روش تکرار گوس سایدلی که توسط

آقای چان (قسمت ۵-۶-۲-۱) مطرح شده و ساده تر از روش نیوتن رافسون می باشد، برای

مقایسه بکار رفته است. ولی از نتایج محاسبات معلوم خواهد شد که روش آقای چان دیرتر

از روشهای پیشنهادی همگرا می گردد.

برای این منظور ماشین القایی روتور قفسی سه فاز، ۴ قطب، ۵۰ هرتز، ۳۸۰V،

۲،۵/۴A کیلووات را در نظر گرفته که ثابت های مدار معادلش در هر فاز عبارتند از [۱۳]:

$$r_s = 0.1, \quad X_{ls} = 0.112, \quad r_r = 0.0736, \quad X_{lr} = 0.1$$

مشخصات منحنی مغناطیس کننده (E_1, X_m) و (r_e, E_1) برای استفاده در کامپیوتر

به شکل زیر خطی شده است :

$$E_1 = \begin{cases} 1/345 - 0/203 X_m & , X_m < 1/728 \\ 1/901 - 0/525 X_m & , 1/728 \leq X_m < 2/259 \\ 3/156 - 1/08 X_m & , 2/259 \leq X_m < 2/446 \\ 37/79 - 15/12 X_m & , 2/446 \leq X_m < 2/48 \\ 0 & , 2/48 \leq X_m \end{cases}$$

$$r_e = 18/51 + 4/197 E_1$$

در دو حالت مقایسه شده است .

الف - صرف نظر کردن از مقاومت r_e :

نتایج استفاده از روشهای سکانت و نیوتن در حل معادلات تعادل (۵-۲۰) و (۵-۲۱) به ازای بارهای مختلف و $X_c = 0/79$ (pu) به ترتیب در سطرهای اول و دوم جدول یک آمده است. سطر سوم شامل نتایج روش گوس سایدل (بخش ۵-۶-۲-۱) می باشد و بالاخره سطرهای چهارم و پنجم، استفاده از روشهای سکانت و نیوتن را در مورد حل معادله پیشنهادی (۵-۳۲) و (۵-۱۹) را نشان می دهند.

از مقایسه نتایج معلوم است که روش تکرار گوس سایدل سرعت همگرایی کمتری نسبت به دو روش دیگر داشته و روش نیوتن نه تنها در حل معادلات تعادل (۵-۲۰) و (۵-۲۱) مفید است بلکه برای حل (۵-۳۲) نیز سریعتر به جواب می رسد. روش سکانت نیز در مورد معادله پیشنهادی (۵-۳۲) بهتر از معادلات تعادل (۵-۲۰) و (۵-۲۱) عمل می کند. لازم به ذکر است که از مراحل گفته شده در بخش قبل دیگر نیازی به فرض اولیه X_{m0} نیست و مرحله دوم نیز بایستی حذف شود. پس در کل نتیجه این است که روشهای نیوتن و سکانت سریعتر از روش گوس سایدل به جواب خواهند رسید.

$$X_c = 0.79$$

$Z=4+j3$		$Z=5+j0$		$Z=1/5+j0$	
تعداد دفعات تکرار	فرکانس	تعداد دفعات تکرار	فرکانس	تعداد دفعات تکرار	فرکانس
3	0.97452979	4	0.96866045	4	0.93601519
3	0.97452979	3	0.96866045	3	0.93601519
4	0.97453010	5	0.96866033	6	0.93601545
3	0.98274760	3	0.96866045	3	0.93601519
3	0.98274760	4	0.96866050	3	0.93601524

جدول ۱ - مقایسه روشهای تکرار، بدون در نظر گرفتن مقاومت r_e .

ب - در نظر گرفتن مقاومت r_e :

وقتی $r_e \neq 0$ است کلیه مراحل ذکر شده در بخش قبل را دنبال می‌کنیم تا F و X_m بدست آیند. نتیجه چنین محاسباتی در جدول دو آمده است. سطر اول شامل نتایج روش تکرار گوس سایدل می‌باشد و سطرهای دوم و سوم به ترتیب متدهای سکانت و نیوتن را نشان می‌دهند. در اینجا نیز باز همان نتایج قسمت الف را می‌توان بیان نمود. بایستی به این نکته اشاره شود که متدهای سکانت و نیوتن در مورد معادله $(5-32)$ و $(5-19)$ بکار گرفته شده است. پس در این حالت نیز روشهای نیوتن و سکانت سریعتر می‌باشند.

$$X_c = 0.79$$

$Z=4+j3$		$Z=5+j0$		$Z=1/5+j0$	
تعداد دفعات تکرار	فرکانس	تعداد دفعات تکرار	فرکانس	تعداد دفعات تکرار	فرکانس
4	0.97161904	5	0.96583139	6	0.93331638
3	0.97976078	3	0.96583151	4	0.93331611
3	0.97976078	4	0.96583154	3	0.93331618

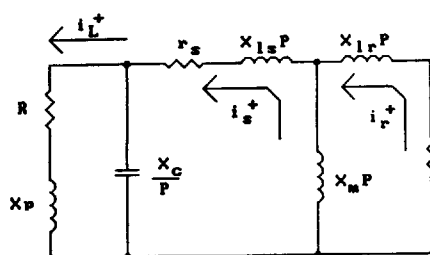
جدول ۲ - مقایسه روشهای تکرار، با در نظر گرفتن مقاومت r_e .

۷-۵ - محاسبه X_m و F به روش فرکانس مختلط

در بخش ۵-۶ بطور مفصل در مورد نحوه محاسبه X_m و F بر اساس مدل ماندگار بحث شد ولی از آنجاییکه حالت ماندگار از معادلات دیفرانسیل سیستم بدست می‌آید. بهمین جهت در دو زیر قسمت بعدی از مدارهای معادلی که بیانگر حالت گذرا است استفاده کرده، سپس حالت دائمی را از آنها نتیجه می‌گیریم.

۱-۷-۵ - مدار معادل کاربردی برای محاسبه X_m و F

آدگر [۲۴] مدار معادلی بنام مدار معادل کاربردی مطرح می‌کند که توسط آن می‌توان جریانها و ولتاژهای گذرا و سایر شرایط گذرا را بررسی نمود. در حقیقت این مدار همان مدار معادل حالت ماندگار شکل (۵-۱) است ولی با این تفاوت که بجای z عملگر $(P = \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt})$ جایگزین می‌شود. آقای مرتی [۲۴] مدار معادل را برای اینکه در حالت‌های نامتقارن نیز



قابل کاربرد باشد به فضای برداری می‌برد و بر اساس مؤلفه‌های متقارن بیان می‌کند. مؤلفه صفر را بدلیل اینکه هیچگونه اتصال نیوترال وجود ندارد کنار گذاشته و کمیت‌های

مؤلفه منفی را نیز مزدوج مختلط مؤلفه شکل ۵-۵ - مدار معادل کاربردی مؤلفه مثبت. مثبت می‌گیرد.

با توضیح فوق مدار معادل کاربردی^(۲) مؤلفه مثبت طبق شکل (۵-۵) است. توجه شود که در بدست آوردن جریانها و سایر کمیات بایستی مؤلفه منفی نیز در نظر گرفته شود. با استفاده از شکل (۵-۵) معادله حلقه بصورت زیر خواهد بود:

۲- Operational equivalent circuit

$$\left[\frac{X_m P (X_{lr} P + \frac{r_r}{1-j\omega/P})}{\frac{r_r}{1-j\omega/P} + X_{lr} P} + (r_s + X_{ls} P) + \frac{(R_L + X_L P) \frac{X_c}{P}}{R_L + X_L P + X_c / P} \right] i_s = 0 \quad (5-35)$$

چند جمله‌ای مشخصه متناظر برابر خواهد شد با :

$$\sum_{i=0}^2 K_i P^i = 0 \quad (5-36)$$

ضرایب K_i در مرجع [۲۵] آورده شده است. وقتی یکی از ریشه‌های این معادله دارای قسمت حقیقی مثبت باشد تحریک خودی اتفاق می‌افتد. همانطوریکه قبلاً اشاره شد بدلیل اشباع بتدریج قسمت حقیقی این ریشه به سمت صفر میل می‌کند تا اینکه ماشین به حالت ماندگار می‌رسد.

مفهوم فیزیکی رسیدن به حالت ماندگار در اثر اشباع مغناطیسی یک روش محاسبه‌ای را مطرح می‌سازد که از آنالیز پاسخ گذرا بی‌نیاز می‌گرداند. این روش دارای مراحل زیر است :

I - با انتخاب (غیر اشباع) $X_{m0} = X_m$ و به ازای مقادیر X_c ، امپدانس بار و سرعت معین ریشه‌های معادله (۵-۳۶) را بدست آورید.

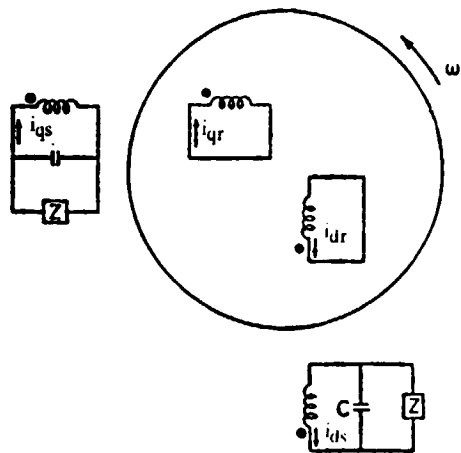
II - با تغییر پله‌ای X_m (بطور مناسب) مجدداً ریشه‌ها را محاسبه نمایید. (قسمت حقیقی یک ریشه مثبت است).

II - بدست آوردن مقداری از X_m که منجر به ریشه‌ای با مقدار حقیقی صفر شود. (با استفاده از اینترپلاسیون).

IV - ریشه بخصوصی که روی محور موهومی قرار دارد (ریشه مجازی خالص) فرکانس خروجی در حالت ماندگار را می‌دهد [۲۵].

۵-۷-۲ - مدار معادل دو محوری برای محاسبه X_m و F

از مدار معادله‌های محوره‌های d ، q نیز می‌توان در آنالیز حالت ماندگار استفاده کرد. همانطوریکه در فصول قبل نشان دادیم مدل دو محوری بسیار کلی بوده، بطوریکه در هر شرایطی با حل معادلات دیفرانسیل می‌توان رفتار ماشین را مطالعه کرد. شکل (۵-۶)



شکل ۵-۶- نمایش دو محوری ژنراتور سه فاز خود تحریک با بار .

دستگاه مرجع ساکنی را نشان می دهد که بیانگر ژنراتور القایی خود تحریک یا بار سه فاز متقارن است. در این شکل Z یکی از موارد زیر است :

I - بار سلفی $Z = R + PL$

II - بار اهمی $Z = R$

III - بی باری $Z = \infty$

IV - بار خازنی $Z = R + \frac{1}{PC_L}$

معادلات دیفرانسیل مدار معادل محورهای d, q که دارای بار Z باشند بفرم ماتریسی زیر می توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_s P + \frac{Z}{1 + ZPC} & 0 & MP & 0 \\ 0 & r_s + L_s P + \frac{Z}{1 + ZPC} & 0 & MP \\ MP & -\omega_r M & r_r + L_r P & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & MP & \omega_r L_r & r_r + L_r P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

(۵-۳۷)

در رابطه (۵-۳۷) داریم :

$$M = \frac{X_m}{\sqrt{2}\pi f}, \quad L_r = \frac{X_{lr} + X_m}{\sqrt{2}\pi f}, \quad L_s = \frac{X_{ls} + X_m}{\sqrt{2}\pi f}$$

چون هیچ ولتاژی از بیرون اعمال نمی شود و روتور اتصال کوتاه است، پس $V=0$ پس :

$$[Z][i]=0$$

و جریان i_{ds} بطور نمونه برابر است با :

$$i_{ds} = \frac{0}{\det([z])} = \frac{0}{(r_s + L_s P + \frac{Z}{1 + ZPC} - \frac{M^2 \delta P^2}{\Delta}) + (\frac{M^2 \omega_r L_r P}{\Delta})^2} \quad (۵-۳۸)$$

$$\delta = L_r P^2 + r_r P + \omega^2 L_r$$

$$\Delta = (r_r + L_r P)^2 + (\omega L_r)^2$$

بنابراین معادله مشخصه این سیستم که بیانگر پروسه تحریک خودی ژنراتور القایی

نیز هست. برای هر نوع باری بصورت زیر قابل بیان است:

$$\det(|z|) = \sum_{i=0}^{\infty} C_i P^i = 0 \quad (5-39)$$

ضریب C_i در مرجع [۱۳] داده شده است. در اینجا نیز به روشی که در قسمت

۵-۷-۱ توضیح دادیم می توان X_m و F را حساب نمود [۱۳].

۵-۸ - آنالیز حالت ماندگار ژنراتور القایی

در این قسمت به حل خود مدار حالت ماندگار می پردازیم تا کمیت‌های مجهول شامل

جریانها، ولتاژها، توانهای ورودی و خروجی، تلفات و بازده بدست آید.

۵-۸-۱ - محاسبه ولتاژ فاصله هوایی و مقاومت r_e

بعد از تعیین دو متغیر F و X_m ، مرحله دوم محاسبه ولتاژ فاصله هوایی V_g (یا E_1)

می باشد. مقدار $E_1 = \frac{V_g}{F}$ را از دو راه می توان محاسبه نمود. در صورتیکه از منحنی

(E_1, i_m) استفاده شود، کافی است خطی با شیب X_m رسم گردد. نقطه تلاقی منحنی و خط

مقدار ولتاژ فاصله هوایی را در فرکانس نامی می دهد. ولی اگر مستقیماً منحنی $E_1 = \frac{V_g}{F}$ بر

حساب X_m را بکار ببریم، به ازای X_m بدست آمده می توان ولتاژ فاصله هوایی را تعیین نمود.

این منحنی را می توان از طریق آزمایش و بطور عملی با گرداندن ماشین توسط موتور DC

در سرعت سنکرون ($F=1$) بدست آورد. در این آزمایش امپدانس ورودی سه فاز به ازای

ولتاژهای ورودی متفاوت اندازه گرفته می شود. سپس X_m در هر ولتاژ از کم کردن امپدانس

پراکندگی استاتور از امپدانس ورودی بدست می آید.

البته می توان این منحنی را از منحنی اشباع بی باری نیز بدست آورد. از نتایج آزمایش

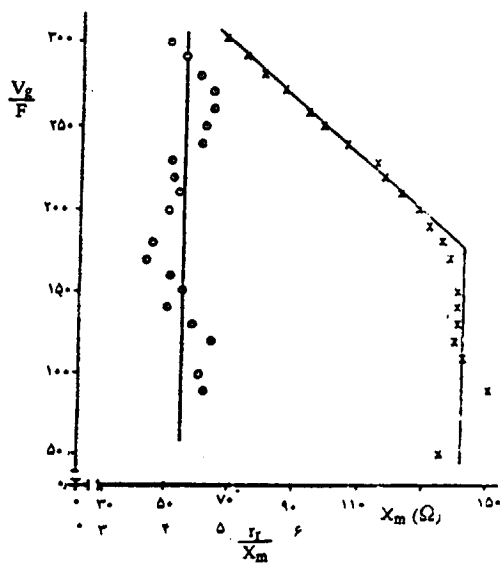
می توان ولتاژ فاصله هوایی را بر حسب راکتانس مغناطیس کننده محاسبه کرد و از آنجاییکه

رابطه بین این دو غیر خطی است به کمک برازش منحنی بر روی نقاط اندازه گیری، رابطه بین E_1 و X_m را بیان نمود. فرض کنید رابطه به شکل زیر باشد:

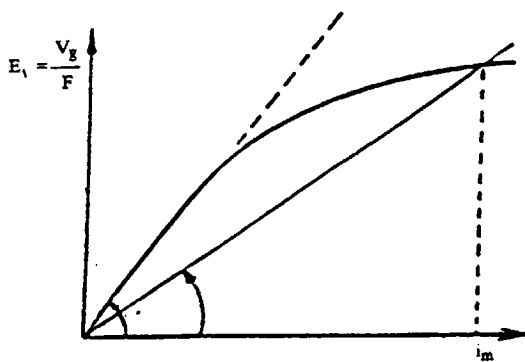
$$E_1 = \frac{V_g}{F} = \sum_{i=0}^{\infty} \pi_i X_m^i \quad (5-40)$$

π_i مقادیر حقیقی و ثابتند که بستگی به طراحی ماشین دارند. جریان I_m برابر است با:

$$i_m = \frac{E_1}{X_m} = \sum_{i=0}^{\infty} \pi_i X_m^{i-1} \quad (5-41)$$



شکل ۷-۵ - تغییرات i_m بر حسب X_m و r_c .



شکل ۸-۵ - مشخصه بی باری.

در اکثر مقالات منحنی (E_1, X_m) با

یک رابطه خطی [۲۶ و ۲۰ و ۱۸] در ناحیه اشباع تقریب زده می شود (شکل ۷-۵).

برای ماشینی که در حال کار می باشد راکتانس مغناطیس کننده همانطوریکه از شکل (۷-۵) معلوم است بایستی مقداری در ناحیه اشباع داشته باشد، یعنی X_m باید متعلق به مجموعه $\{X_m : 0 < X_m < X_{smax}\}$

باشد (شکل ۸-۵). X_{smax} ماکزیمم

راکتانس مغناطیس کننده ماشین است. پس

در روابط (۵-۴۰) و (۵-۴۱) بایستی محدودیت $0 < X_m < X_{smax}$ در نظر گرفته شود.

تغییرات r_c با $\frac{V_g}{F}$ نیز بر روش مشابهی که در بالا توضیح دادیم، بدست می آید. همانطوریکه از شکل (۷-۵) معلوم

است مقدار $\frac{r_e}{X_m}$ معمولاً حول مقدار ثابتی تغییر می‌کند [۱۹]. بنابراین یک رابطه خطی با X_m دارد [۲۶ و ۲۰ و ۱۹]. پس با دانستن E_1 یا X_m می‌توان r_e را هم بدست آورد و در محاسبه تلفات دخالت داد.

۵-۸-۲ - محاسبه کمیت‌های ولتاژ، جریان، توان و بازده:

با دانستن E_1, X_m, F, X_c, ν ، و بار (R و X) کمیت‌های مجهول مدار شکل (۵-۳)

را می‌توان از روابط زیر بدست آورد:

$$I_s = \frac{E_1}{\frac{r_s}{F} + jX_{ls} + (R_L - jX_L)} \quad (5-42), \quad I_r = -\frac{E_1}{\frac{r_r}{F - \nu} + jX_{lr}} \quad (5-43)$$

$$I_L = -\frac{jX_c I_s}{RF + jXF^2 - jX_c} \quad (5-44), \quad V_t = I_L (R + jXF) \quad (5-45)$$

$$P_{in} = \frac{\nu}{\nu - F} \cdot 3 |I_r|^2 r_r \quad (5-46), \quad Q_c = -X_c |I_s - I_L|^2 \quad (5-47)$$

$$P_{out} = \frac{|V_t|^2 R}{R^2 + F^2 X^2 F} \quad (5-48)$$

$$P_{loss} = 3 \left(|I_r|^2 r_r + |I_s|^2 r_s + \frac{|V_g|^2}{r_e} \right) \quad (5-49)$$

دقت شود که $\bar{E}_1 = E_1 \angle \phi$ بعنوان مبنا انتخاب شده و R_L و X_c هم از روابط (۵-۱۷)

بدست می‌آید. بدین ترتیب مدار معادل ماندگار شکل (۵-۳) بطور کامل آنالیز می‌شود.

۵-۹ - عملکرد حالت ماندگار ژنراتور القایی

پذیرش و قبول ژنراتور القایی بعنوان یک واحد قابل گسترش و رشد توسط این واقعیت تحت تأثیر قرار می‌گیرد که ولتاژ و فرکانس خروجی اش به شدت تابع سرعت روتور، خازن ترمینالها و بار می‌باشد. این وابستگی محدودیت‌های معینی روی کار و عملکرد ژنراتور بوجود می‌آورد. در این قسمت به بررسی و مطالعه معیارهای عملکرد ژنراتور القایی، تغییرات توان و ولتاژ در فاصله وسیعی از تغییرات عناصر (پارامترها) پرداخته می‌شود.

۵-۹-۱ - تئوری عملکرد حالت ماندگار

بر اساس مطالبی که پیشتر توضیح داده شد در واقع، چهار پارامتر F ، X_m ، X_c ، ν در مشخصه مدار معادل حالت ماندگار تعیین کننده و کلیدی هستند. با داشتن مقدار دو تا از این پارامترها، دوتای دیگر را می توان محاسبه نمود و به بررسی عملکرد^(۳) ژنراتور القایی پرداخت. بنابراین برای چنین بررسی از متدهایی که قبلاً بحث شده، استفاده می شود.

در ادامه با پذیرفتن سه فرض اساسی زیر بررسی انجام خواهد گرفت:

- ۱ - تمامی پارامترهای ماشین بجز X_m ثابت هستند. قابل ذکر است که پارامترهای روتور تابع فرکانس هستند. حال آنکه بدون داشتن F نمی توان این پارامترها را تعیین نمود. اما چنانچه نشان داده خواهد شد چون $F \approx \nu$ است [۱۲]، پس نتیجه می شود که فرکانس روتور (فرکانس لغزش) عدد بسیار کوچکی است بنابراین در صورتیکه دقت خیلی بالا مورد نیاز باشد، باید مقادیر فرکانس پایین r_r و X_{lr} استفاده شود.
- ۲ - از تلفات هسته صرف نظر می شود.

- ۳ - اثر هارمونیک های ماشین نیز صرف نظر می گردد. یعنی فرض می شود یک سیم پیچی با توزیع سینوسی وجود دارد که mmf حاصل نیز سینوسی است.

پس با توجه به مطالب فوق معادلات تعادل (۵-۸) و (۵-۹) را می توان به یکی از

فرمهای زیر نوشت:

$$\sum_{i=0}^3 (a_{\nu i} X_m + a_{\nu i+1}) F_i = 0 \quad \text{توصیف ۱:} \quad \sum_{i=0}^4 (b_{\nu i} X_m + b_{\nu i+1}) F_i = 0$$

$$\sum_{i=0}^3 (c_{\nu i} \nu + c_{\nu i+1}) F_i = 0 \quad \text{توصیف ۲:} \quad \sum_{i=0}^4 (d_{\nu i} \nu + d_{\nu i+1}) F_i = 0$$

$$\sum_{i=0}^5 (e_{\nu i} X_c + e_{\nu i+1}) F_i = 0 \quad \text{توصیف ۳:} \quad \sum_{i=0}^4 (f_{\nu i} X_c + f_{\nu i+1}) F_i = 0$$

از معادلات تعادل (۵-۲۰) و (۵-۲۱) نیز داریم:

$$\sum_{i=0}^5 P_i F_i = 0 \quad , \quad \sum_{i=0}^4 (q_{vi} X_m + q_{vi+1}) F_i = 0 \quad \text{توصیف ۴:}$$

ضرایب روابط فوق در مراجع [۲۲ و ۱۳] آمده است.

در بررسی عملکرد ماندگار چندین محدودیت را تعیین خواهد شد که دانستن آن

ضروریست. تا اینجا بطور ضمنی دو محدودیت گفته شده که بشرح زیر می باشد:

محدودیت اول: مدار معادل حالت ماندگار همانند یک اسیلاتور مقاومت منفی است که

لغزش منفی ماشین موجب ایجاد مقاومتی با مقدار منفی شده و X_m

نقش عنصر غیر خطی را در اسیلاتور بازی می کند. برای لغزش منفی

بایستی F کوچکتر از ν و بزرگتر از صفر باشد. پس اولین محدودیت

$$0 < F < \nu \text{ روی فرکانس تولیدی می باشد.}$$

محدودیت دوم: طبق توضیحات قبلی برای ماشینی که کار می کند X_m بایستی مقداری

در ناحیه اشباع داشته باشد. پس دومین محدودیت $0 < X_m < X_{smax}$

روی راکتانس مغناطیس کننده می باشد.

۵-۹-۲ - آنالیز عملکرد حالت ماندگار

سه عنصر بیرونی وجود دارند که می توان آنها را کنترل کرد. این عناصر عبارتند از:

- ۱- سرعت روتور.
- ۲- خازن ترمینال.
- ۳- امپدانس بار

تغییر هر کدام از این عناصر منجر به تغییر X_m و F خواهد شد. از روشهایی که قبلاً

گفته ایم می توان F و X_m را محاسبه نمود. بنابراین با داشتن عناصر کنترلی فوق روش مطالعه

بدین ترتیب است که یکی از عناصر (ν, Z, C) را متغیر و بقیه را ثابت نگه داریم. بنابراین

سه حالت بشرح زیر وجود دارد که در هر یک تغییرات X_m و به تبع آن تغییرات ولتاژ، توان

خروجی، جریانهها و سایر کمیات الکتریکی بدست می آید.

۵-۹-۳ - عملکرد ماندگار: کنترل کردن سرعت.

با افزایش سرعت بتدریج مقدار X_m کاهش یافته و به یک مقدار مینیمی می‌رسد، سپس شروع به افزایش می‌کند. در حقیقت افزایش بیشتر سرعت، فرکانس خروجی (F) را زیاد خواهد کرد و چون تحریک شویدی وابسته به مقدار راکتانس خازنی می‌باشد که طبق $\frac{X_c}{F^2}$ تابع فرکانس است. بنابراین با افزایش Δ مؤلفه راکتانس خازنی در مدار کاهش یافته و نهایتاً ماشین را به ناحیه قطع^(۴) خواهد بود یا به عبارت دیگر $X_m > X_{smax}$ می‌شود. بنابراین سرعتی بنام سرعت قطع مطرح می‌گردد که برای پیدا کردن مقدار آن از توصیف دو می‌توان استفاده کرد. با حذف متغیر Δ در این توصیف به چند جمله‌ای زیر می‌رسیم:

$$\sum_{i=0}^3 \beta_{\nu i} F^{2i} = 0 \quad (5-50)$$

ضرایب $\beta_{\nu i}$ در مرجع [۲۲] آمده است. در بار اهرمی چند جمله‌ای فوق از درجه چهار است:

$$\beta_4 F^4 + \beta_3 F^2 + \beta_0 = 0 \quad (5-51)$$

در اینصورت:

$$F_{1,2} = \left(\frac{-\beta_3 \pm (\beta_3^2 - 4\beta_4\beta_0)^{1/2}}{2\beta_4} \right)^{1/2} \quad (5-52)$$

اگر $\beta_3^2 - 4\beta_4\beta_0 \geq 0$ دو سرعت قطع خواهیم داشت:

$$v_l = v|_{F_2}, \quad v_u = v|_{F_1} \quad (5-53)$$

مقدار سرعتها با جایگذاری فرکانسهای F_2 و F_1 در یکی از معادلات توصیف ۲

بدست می‌آید. راکتانس X_m در سرعت معین به مینیم مقدار خود می‌رسد و متناظراً i_m در

همان سرعت مقدار ماکزیمی خواهد داشت. در نقطه مینیم X_m داریم: $\frac{dX_m}{dv} = 0$ یا

بطور معادل $F_1 = F_2$. در این حالت حل رابطه $\Delta = \beta_3^2 - 4\beta_4\beta_0 = 0$ مقدار مینیم X_m را

می‌دهد. اگر مقادیر متناظر در نقطه مینیم را با ستاره نشان دهیم:

۴- Cut off

$$v^* = v |_{(F^*, X_m^*)}$$

مقدار ماکزیمم i_m^* نیز از رابطه (۴۱-۵) بدست می آید. در حالت کلی نیز مقدار X_m ای که در شرایط $\frac{dX_m}{dv} = 0$ صدق کند به همراه معادلات توصیف یک، سه معادله را نتیجه می دهد که می توان از آنها v و F و X_m را در نقطه مینیمم محاسبه کرد. اطلاع از نحوه تغییرات توان و ولتاژ و جریانها با سرعت نیز مفید است که در زیر بخش بعدی با استفاده از کامپیوتر این بررسی انجام شده است.

۵-۹-۳-۱ - مشخصه های کنترل سرعت

ماشین سه فاز، قفس سنجابی و چهار قطبی با مشخصات زیر در نظر می گیریم:

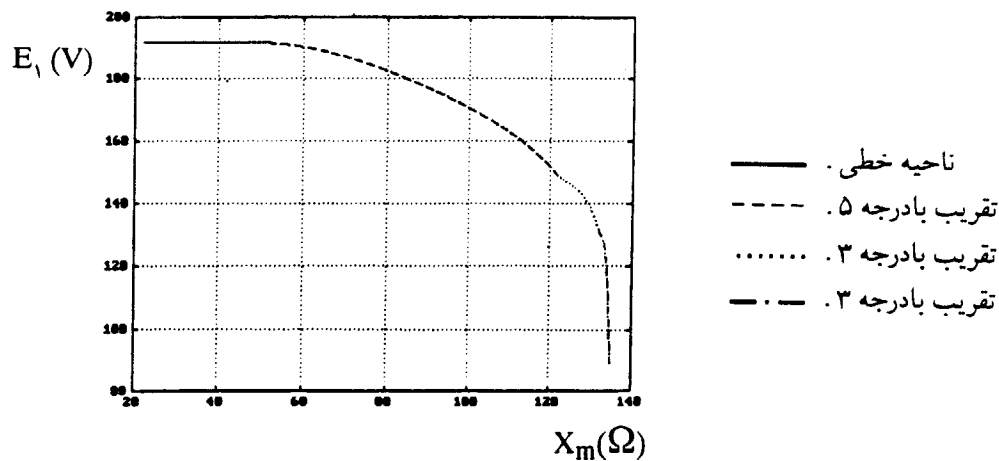
$$V_{bLL} = 380V, f_b = 50Hz, P_b = 1KW, Z_b = 144/4\Omega$$

$$r_s = \frac{1}{Z_b} \cdot 8/5 = 0/0589 \text{ و } r_r = \frac{1}{Z_b} \cdot 3/95 = 0/0274$$

$$X_{ls} = \frac{1}{Z_b} \cdot 15/715 = 0/1088, X_{lr} = \frac{1}{Z_b} \cdot 18/06 = 0/1251$$

$$X_{smax} = \frac{1}{Z_b} \cdot 133/7 = 0/9259$$

منحنی تغییرات E_1 بر حسب X_m در شکل (۵-۹) نشان داده شده است. به کمک کامپیوتر این منحنی در فواصل مختلف با چند جمله ایایی تقریب زده شده است.



شکل ۵-۹ - تغییرات E_1 بر حسب X_m . ناحیه $22 < X_m < 50$ تقریب با رابطه خطی. ناحیه $50 < X_m < 122$ تقریب با چند جمله ای درجه ۵. ناحیه $122 < X_m < 132$ تقریب با چند جمله ای درجه ۳. ناحیه $132 < X_m < 135$ تقریب با چند جمله ای درجه ۳.

از فرمولهای توصیف چهار برای بدست آوردن چند مشخصه مهم استفاده می شود. این مشخصه ها دید فیزیکی خوبی از تغییرات کمیات ماشین القایی و محدوده کاری مناسب را ارائه می دهند.

اولین مشخصه شکل (۵-۱۰) است که رفتار X_m را در محدوده وسیعی از سرعت به ازای مقادیر مختلف بار اهمی و خازن ۲۵ میکروفارادی نشان می دهد. همانطوریکه از شکل معلوم است و قبلاً نیز ذکر شد، راکتانس مغناطیس کننده X_m بصورت محدب با سرعت تغییر می کند. خارج از محدوده $0 < X_m < X_{smax}$ ماشین کار نخواهد کرد. پس از تلاقی این منحنی ها با خط $X_m = X_{smax}$ سرعتهای قطع v_1 و v_u بدست آمده و محدوده تحریک خودی مشخص می گردد. طبق این شکل، فاصله (v_1, v_u) در حالت بی باری ماکزیمم است و بتدریج با کاهش مقاومت بار کوچکتر می شود، بطوریکه به ازای $R = 0.916 pu$ دو سرعت قطع مساوی شده و تنها یک نقطه کار برای ژنراتور القایی وجود خواهد داشت. این سرعت همان سرعت بحرانی است و برابر با $v_c = 1/4739 pu$ می باشد. به عبارت دیگر برای ماشین موردنظر با $C = 25 \mu f$ و $R = 0.916 pu$ تنها در سرعت v_c ولتاژ سازی امکان پذیر است.

شکل (۵-۱۰ ب) نیز تغییرات فرکانس F نظیر بارهای شکل (۵-۱۰ الف) را نشان می دهد. نقاط حدی با علامت ستاره (*) روی این منحنیها مشخص هستند. همچنانکه ملاحظه می شود با افزایش سرعت روتور، فرکانس F تولیدی تقریباً بصورت خطی تغییر کرده و وقتی از یک حدی تجاوز نماید فرکانس کاهش می یابد. این مسئله در بارهای بزرگتر و بی باری بسیار واضح است. در جدول سه نقاط حدی سرعت فرکانس و لغزش های نظیر آنها آورده شده است.

دومین مشخصه شکل (۵-۱۱) می باشد که اثر ضریب توان بار را در تغییرات X_m و F با سرعت به ازای $|Z|$ ثابت نشان می دهد. برای این منظور $|Z| = 1 pu$ انتخاب شده است. همانطوریکه از شکل معلوم است تغییرات X_m نسبت به ضریب توان بسیار حساس

است و با کاهش ضریب توان پس فاز فاصله (v_1, v_u) بزرگتر می‌گردد. تغییرات فرکانس نظیر در شکل (۵-۱۱ ب) آمده است و جدول چهار بطور خلاصه نقاط حدی سرعت با فرکانس و لغزش را به ازای هر ضریب توان نشان می‌دهد.

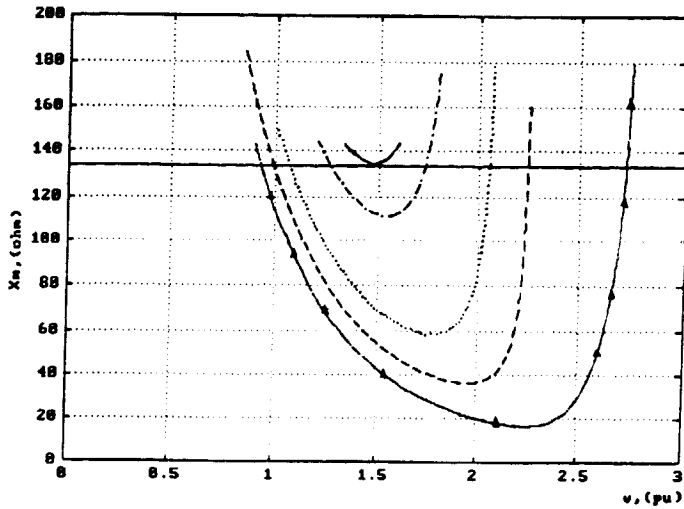
در سومین مشخصه به ازای یک بار ثابت اثر خازن تحریک بررسی شده است. شکل (۵-۱۲) نمونه‌ای از این مشخصه را به ازای بار اهمی $R=1pu$ نشان می‌دهد. همانطوریکه از شکل (۵-۱۲ الف) مشاهده می‌شود در صورتیکه مقدار خازن C با ثابت نگهداشتن بار بطور پله‌ای کم گردد، به حالتی می‌رسیم که $v_1 = v_u$ می‌شود، یعنی تنها در یک سرعت به ازای C_c پروسه تحریک خودی و ولتاژ سازی ممکن خواهد شد. چنین سرعتی، سرعت بحرانی نامیده می‌شود. تغییرات فرکانس نظیر در شکل (۵-۱۲ ب) آمده است. جدول پنج نقاط حدی فرکانس و لغزش را نشان می‌دهد.

بنابراین نتیجه مطالب فوق بیان یک محدودیت برای سرعت و تعریف سرعت بحرانی است:

محدودیت سوم : برای یک ماشین معین به ازای مقدار خازن و بار داده شده، سرعت روتور بایستی در یک فاصله معین باشد تا تحریک خودی حفظ گردد. پس سومین محدودیت $v_1 < v < v_u$ روی سرعت روتور می‌باشد.

همچنین ثابت شد که به ازای خازن معین با کاهش بار به حالتی می‌رسیم که $v_1 = v_u$ شده و تنها در یک سرعت بخصوص بنام سرعت بحرانی امکان ولتاژ سازی وجود دارد. بطور مشابه به ازای بار معین با کاهش خازن تحریک دوباره در یک حالت $v_1 = v_u$ می‌گردد که ولتاژ سازی فقط در آن سرعت بحرانی ممکن می‌شود.

برای اینکه از نحوه تغییرات کمیت‌های الکتریکی ماشین اطلاعاتی بدست آید، بهتر است که برای نقاط کار بارهای $R=∞, R=2/5pu, R=1/5pu$ و $R=1pu$ از شکل (۵-۱۰) فرمولهای آنالیز بخش ۵-۸-۲ را بکار برده و نتایج حاصله را رسم می‌نماییم.

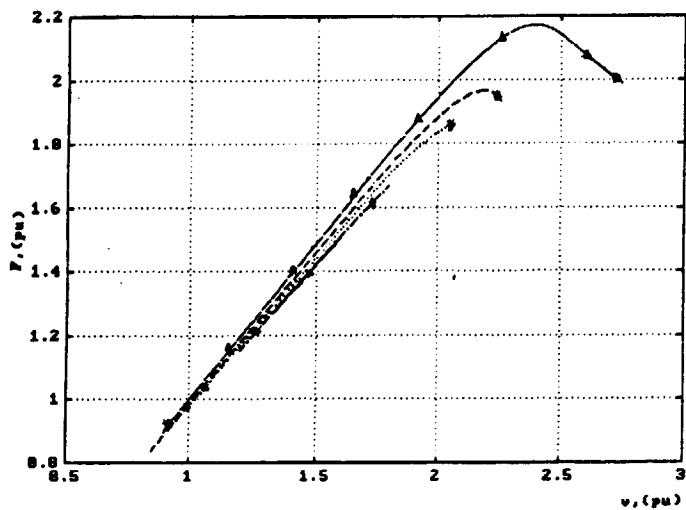


شکل ۵-۱۰ - تغییرات X_m با v

به ازای بارهای اهمی مختلف.

- $R = \infty$.
- $R = 2/5$ pu.
- $R = 1/5$ pu.
- .-.- $R = 1$ pu.
- $R = 0.916$ pu.

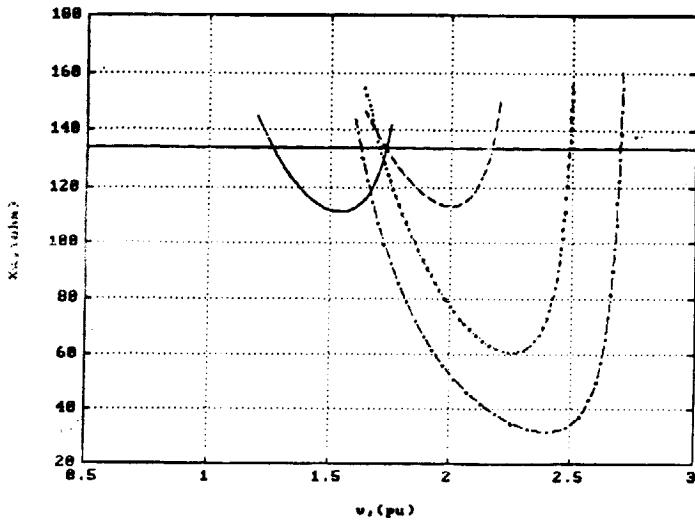
شکل ۵-۱۰ الف - تغییرات X_m با v .



شکل ۵-۱۰ ب - تغییرات F با v .

سرعت روتور (pu)	فرکانس (pu)	لغزش
۰/۹۲۷۷	۲/۷۲۳۳	۰/۰۰۲۲ ۰/۳۶۰۵
۰/۹۸۹۶	۲/۲۴۳۷	۰/۰۱۵۹ ۰/۱۵۲۵
۱/۰۶۴۷	۲/۰۵۲۶	۰/۰۲۵۶ ۰/۱۰۶۷
۱/۲۶۴۷	۱/۷۲۸۹	۰/۰۴۱۵ ۰/۰۷۰۰
۱/۴۷۳۹	۱/۴۷۳۹	۰/۰۵۴۲ ۰/۰۵۴۲

جدول ۳ - نقاط حدی برای شکل (۵-۱۰)



شکل ۵-۱۱- تغییرات X_m با v_r به ازای

$|Z| = 1$ ضریب توانهای پس فاز

مختلف . $pf = 1$.

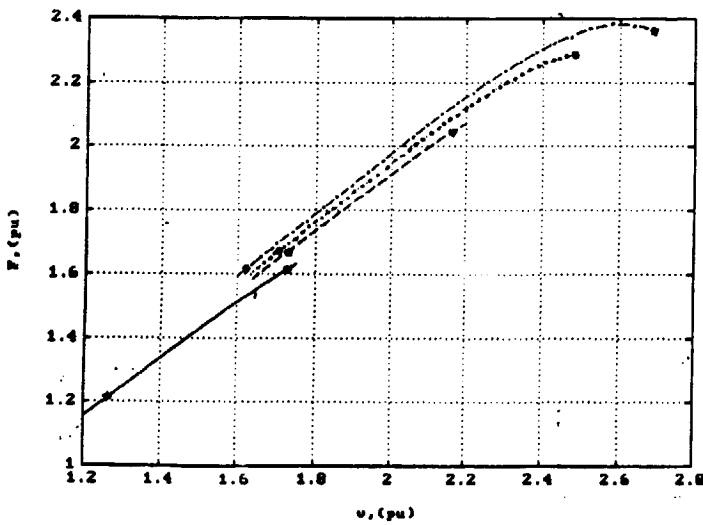
$pf = 0.9$.

$pf = 0.7$.

$pf = 0$.

شکل ۵-۱۱- الف - تغییرات X_m

با ضریب توان.



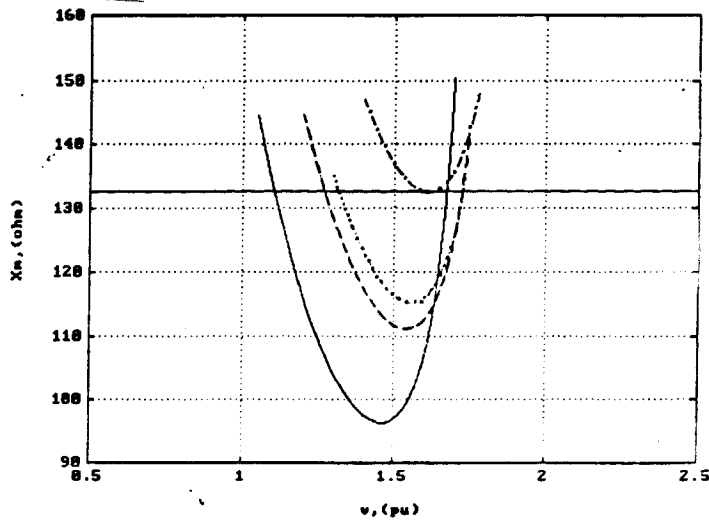
شکل ۵-۱۱- ب - تغییرات F_r متناظر

با شکل الف.

$$C = 25 \mu f$$

ضریب توان	سرعت روتور (pu)		فرکانس (pu)		لغزش	
$pf=1$	۱/۲۶۴۷	۱/۷۲۸۹	۱/۲۱۴۳	۱/۶۱۵۸	۰/۰۴۱۵	۰/۰۷۰۰۰
$pf=0.9$	۱/۷۲۸۳	۲/۱۶۵۵	۱/۶۶۹۴	۲/۰۴۵۲	۰/۰۳۵۲	۰/۰۵۸۸
$pf=0.7$	۱/۷۰۵۸	۲/۴۸۵۱	۱/۶۷۱۱	۲/۲۸۸۱	۰/۰۲۰۷	۰/۰۸۶۱
$pf=0$	۱/۶۲۲۹	۲/۶۹۱۰	۱/۶۱۶۸	۲/۳۶۶۴	۰/۰۰۳۸	۰/۱۳۷۲

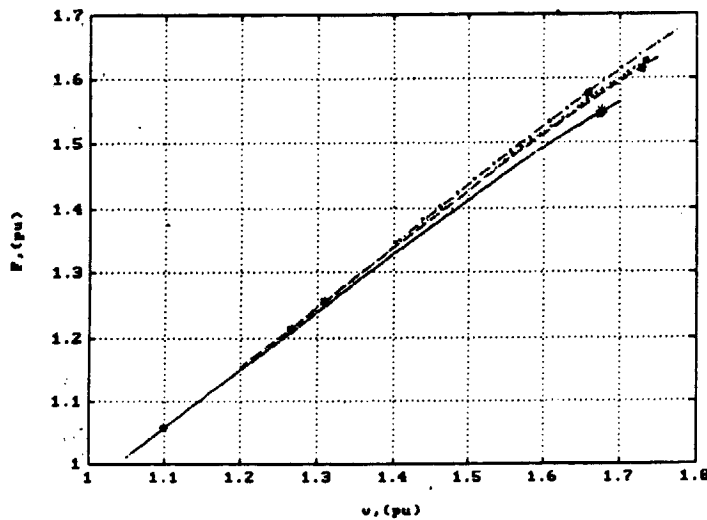
جدول ۸ - نقاط حدی برای شکل (۵-۱۱)



شکل ۵-۱۲- تغییرات X_m با v به ازای بار $R=1pu$ و خازنهای تحریک مختلف.

- $C=30\mu f$
- - - $C=25\mu f$
- $C=24\mu f$
- . - $C=21\mu f$

شکل ۵-۱۲- الف - تغییرات X_m با خازن تحریک.



شکل ۵-۱۲- ب - تغییرات F متناظر با شکل الف.

خازن تحریک (μf)	سرعت روتور (pu)		فرکانس (pu)		لغزش	
$C=30$	۱/۰۹۹۳	۱/۶۷۷۱	۱/۰۵۷۰	۱/۵۴۷۰	۰/۰۴۰۱	۰/۰۸۴۱
$C=25$	۱/۲۶۴۷	۱/۷۲۸۹	۱/۲۱۴۳	۱/۶۱۵۸	۰/۰۴۱۵	۰/۰۷۰۰
$C=24$	۱/۳۰۸۵	۱/۷۳۵۲	۱/۲۵۵۹	۱/۶۲۶۴	۰/۰۴۱۹	۰/۰۶۶۹
$C=21$	۱/۶۵۸۶	۱/۶۵۸۶	۱/۵۷۶۳	۱/۵۷۶۳	۰/۰۵۲۲	۰/۰۵۲۲

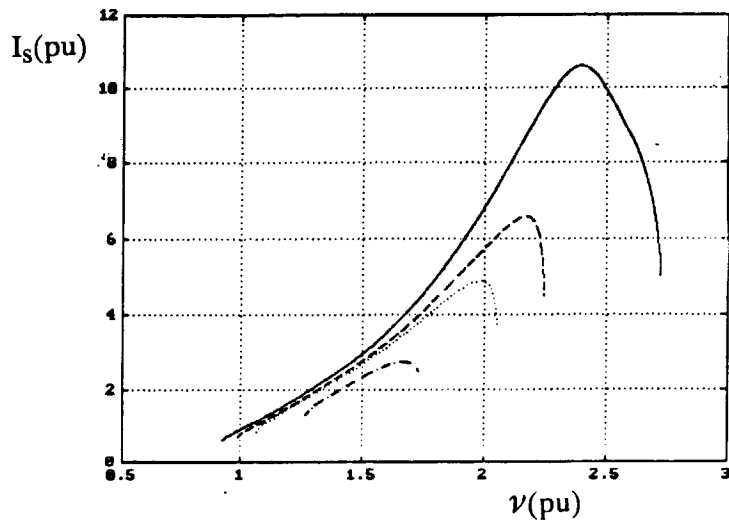
جدول ۵ - نقاط حدی برای شکل (۵-۱۲)

شکلهای (۵-۱۳) الی (۵-۱۶) نتیجه چنین محاسباتی است.

شکل (۵-۱۳) تغییرات I_s و I_r و I_L را با سرعت نشان می‌دهند. با افزایش سرعت، این جریانها زیاد شده و به یک ماکزیممی می‌رسد، سپس بتدریج کاهش می‌یابد. برای بارهای بزرگتر جریانهای I_s و I_r تا حدود ۶ الی ۷ برابر مقدار نامی (یکه) می‌رسند که می‌تواند مشکلات حرارتی بوجود آورد و افت زیادی را سبب گردد. جریان I_L نیز تغییرات مشابهی دارد، ولی با کاهش بار این جریان افزایش می‌یابد.

شکل (۵-۱۴) تغییرات ولتاژ خروجی یا ترمینال و ولتاژ فاصله هوایی را نشان می‌دهد. ولتاژ ترمینال با افزایش سرعت زیاد می‌گردد و بعد از رسیدن به یک مقدار ماکزیمم، شروع به کاهش می‌کند و مقدار آن در بارهای کوچکتر بیشتر است. شکل (۵-۱۴ ب) تغییر ولتاژ E_1 را نشان می‌دهد که با توجه به منحنی تغییرات (E_1, X_m) و تغییرات محدب X_m با سرعت طبق شکل (۵-۱۰) چنین رفتاری قابل پیش بینی است. در ابتدا، با افزایش سرعت X_m کم شده و E_1 زیاد می‌شود. سپس با رسیدن X_m به یک مقدار مینیمم ولتاژ E_1 به یک مقدار ماکزیممی می‌رسد و نهایتاً با افزایش مجدد X_m ولتاژ فاصله هوایی کم می‌گردد. محدوده تغییرات و دامنه این ولتاژ نیز مثل X_m با افزایش مقدار بار بیشتر می‌گردد. با توجه به توضیحات فوق می‌توان گفت وقتی سرعت کم می‌شود، نقطه کار روی مشخصه (E_1, X_m) در جهتی حرکت می‌کند که ولتاژ فاصله هوایی و در نتیجه i_m کاهش می‌یابد. بنابراین فلوی فاصله هوایی و به تبع آن ولتاژ استاتور کم نتیجه می‌شود. اگر کاهش سرعت ادامه یابد، نقطه کار تقریباً به نقطه شروع منحنی اشباع (خط فاصله هوایی) می‌رسد. در این حالت ماشین ناپایدار شده و ولتاژ به آرامی بطرف صفر کم می‌گردد.

در شکل (۵-۱۵) تغییرات P_{in} و P_{out} و $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ نشان داده شده است. P_{out} و P_{in} با افزایش سرعت Δ بتدریج زیاد می‌شوند و در فاصله تغییر خود دارای ماکزیممی هستند. توان ورودی و خروجی در یک سرعت بخصوص به ماکزیمم می‌رسند. بازده ماشین با افزایش Δ کاهش یافته و ماکزیمم توان خروجی در یک بازده پایین تر بدست می‌آید و

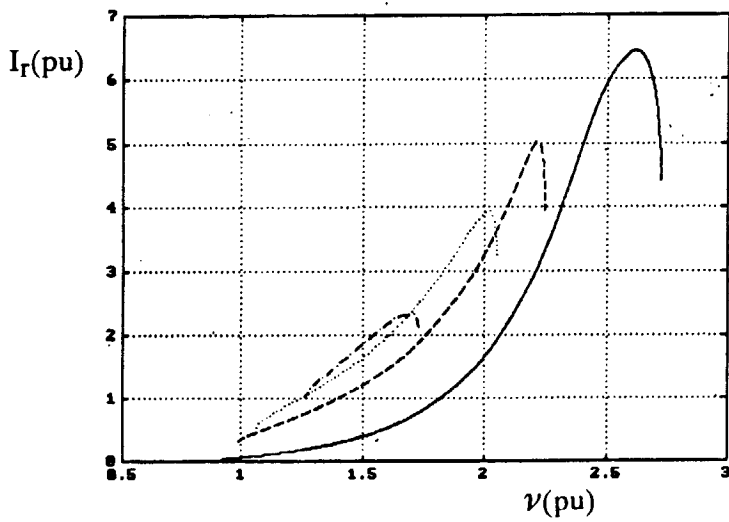


شکل ۵-۱۳- تغییرات I_s ، I_r و I_L با ν

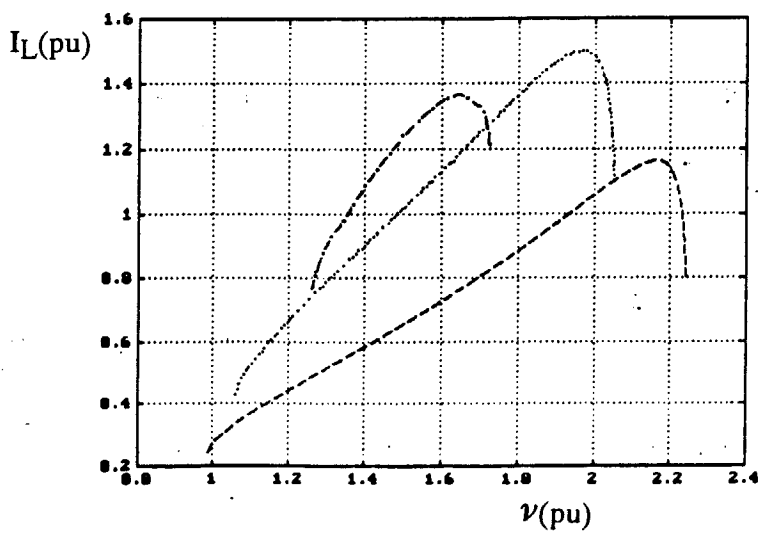
در بارهای مختلف زیر:

- $R = \infty$.
- - - $R = 2/5$ pu.
- $R = 1/5$ pu.
- . - $R = 1$ pu.

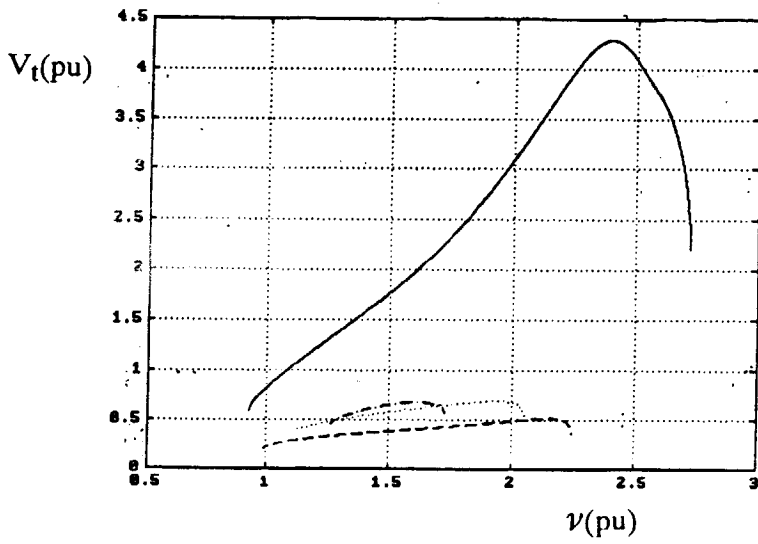
شکل ۵-۱۳- الف - تغییرات I_s با ν



شکل ۵-۱۳- ب - تغییرات I_r با ν

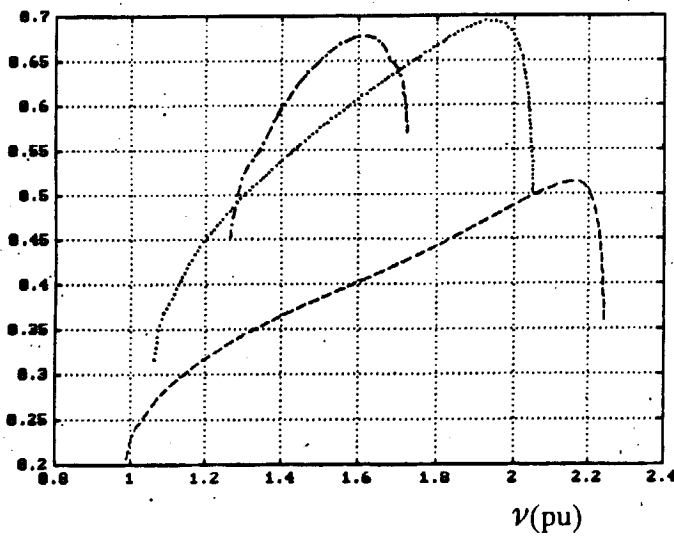


شکل ۵-۱۳- پ - تغییرات I_L با ν

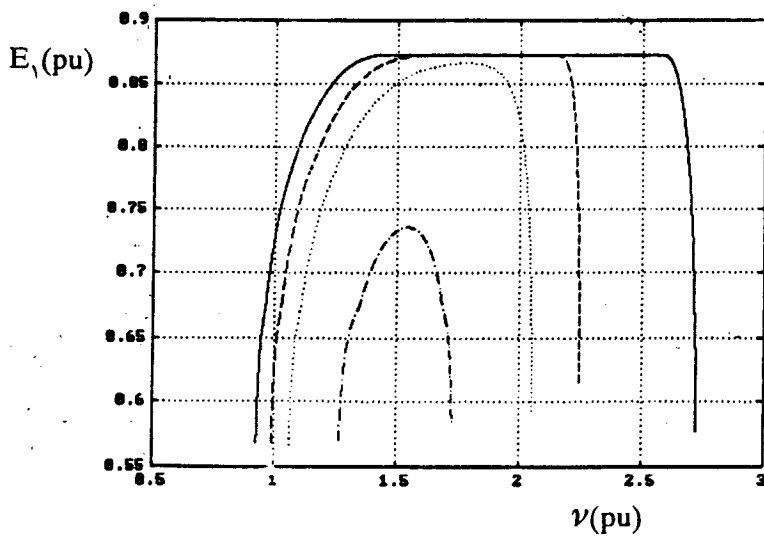


شکل ۵-۱۴ - تغییرات V_t و E_1 با ν در بارهای مختلف نظیر شکل (۵-۱۳).

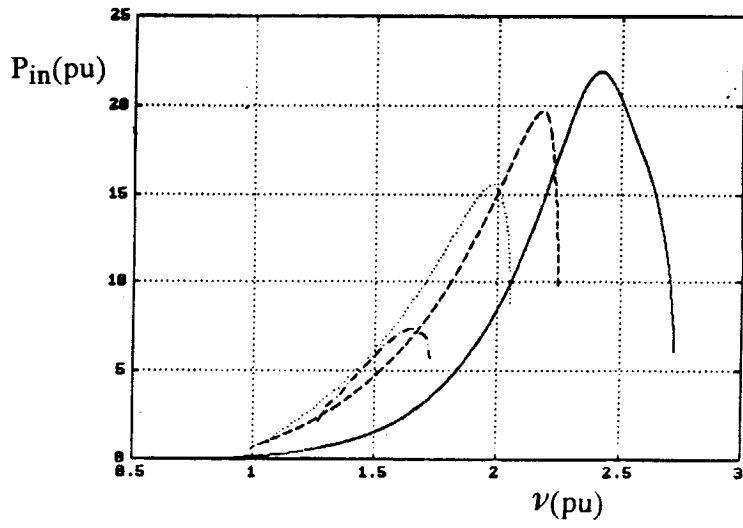
شکل ۵-۱۴ - الف - تغییرات V_t با ν .



شکل ۵-۱۴ - ب - تغییرات V_t با ν بدون ($R = \infty$).

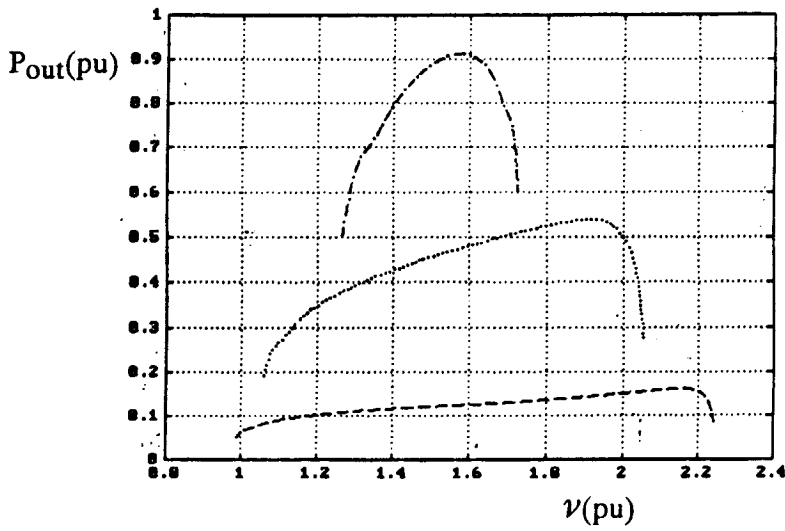


شکل ۵-۱۴ - پ - تغییرات E_1 با ν

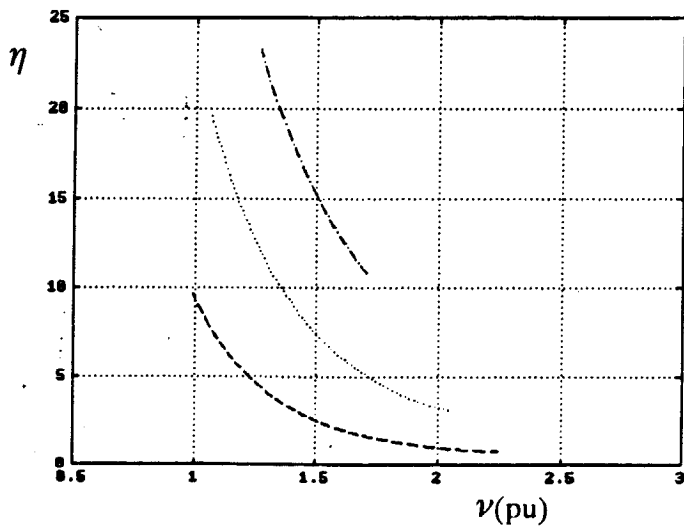


شکل ۵-۱۵- تغییرات P_{in} , P_{out} و η با ν
در بارهای نظیر شکل (۵-۱۳)

شکل ۵-۱۵- الف - تغییرات P_{in} با ν .



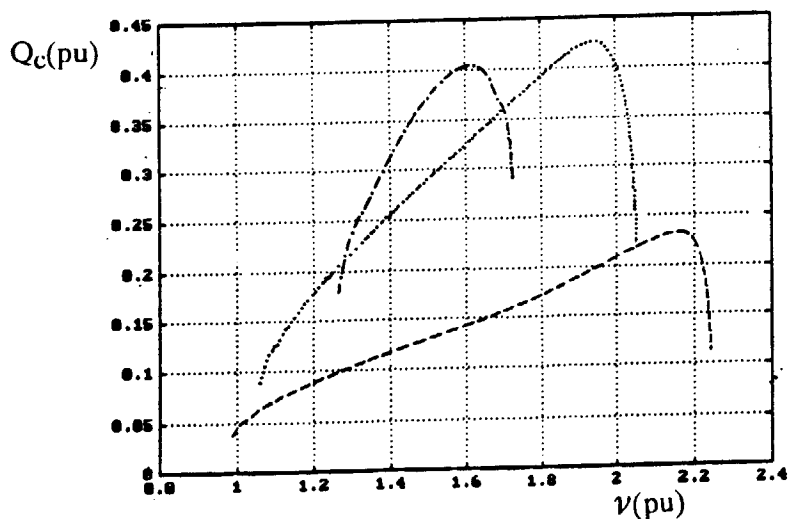
شکل ۵-۱۵- ب - تغییرات P_{out} با ν .



شکل ۵-۱۵- پ - تغییرات η با ν .

درباره‌های کمتر بازده بیشتر است.

شکل (۵-۱۶) تغییرات Q_c با سرعت است. طبق دیاگرام بدست آمده، توان راکتیو نیز دارای نقطه ماکزیمی است که در سرعت یکسان با P_{in} و P_{out} به ماکزیمم می‌رسد. پر واضح است که وقتی سرعت افزایش یابد فرکانس نیز زیاد شده و به ازای خازن ثابت راکتانس خازنی کم می‌گردد و X_m نیز کاهش می‌یابد، بطوریکه در یک نقطه به مینیمم خودش می‌رسد. پس I_m در این حالت ماکزیمم است و تنها تأمین کننده آن یعنی خازن باید جریان بیشتری را اعمال نماید تا I_m لازم را تأمین کند. این مسئله معادل با توان زیاد Q_c است.



شکل ۵-۱۶- تغییرات Q_c با v در بارهای نظیر شکل (۵-۱۳)

با توجه به پارامتری بودن معادلات، برای تعیین مقادیر مناسب آنها تحت شرایط معین می‌توان از روشهای بهینه سازی غیر خطی کمک گرفت. مثلاً با جایگذاری X_m از رابطه (۵-۱۵) در (۵-۴۰) ولتاژ E_1 بر حسب F و v بدست می‌آید. در نتیجه V_t و P_{out} فقط تابعی از F و v خواهند بود و مسئله بهینه سازی بصورت زیر مطرح می‌شود.

$$\text{Max} (|V_t| \text{ یا } P_{out})$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i F_i = 0$$

بشرطیکه

از حل این مسئله v و F محاسبه می‌شود. با نرم افزارهای کامپیوتری براحتی می‌توان این را

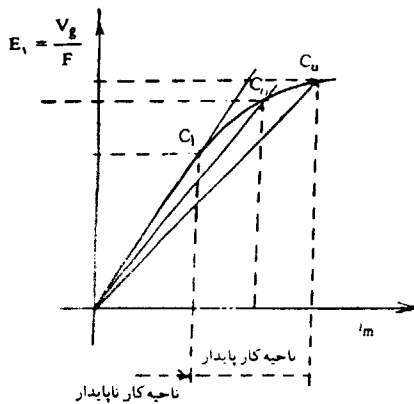
حل نمود.

۵-۹-۴ - عملکرد ماندگار: کنترل کردن خازن.

با توجه به اصول تحریک خودی در ماشین‌های القایی وجود خازن ضروری و لازم است. بنابراین خازنهای متصل به ترمینال ماشین بایستی یک حداقل مقداری داشته باشند تا تحریک خودی بوجود آید. یعنی با کاهش خازن از این حد در ترکیب موازی خازن و بار اثر خازن ترمینال کم می‌شود و ماشین را به قطع می‌کشاند. از طرف دیگر اگر C خیلی بزرگ یا X_C خیلی کوچک باشد در این صورت در ترکیب موازی X_C غالب خواهد شد. ولی افزایش بیشتر C منجر به کاهش فرکانس F می‌گردد، طوری که امپدانس روتور $Z_{R'} + jX_{R'}$ کوچک شده ($F \approx \frac{1}{p}$) و $I_s \approx I_r$ در نتیجه i_m خیلی کوچک می‌شود و منجر به رفتن ماشین به قطع می‌گردد. در این قسمت می‌خواهیم مقدار حد پایین و بالای خازن را بدست آورده و از آنجاییکه مقدار خازن بسیار مهم است بطور مفصل در مورد آن توضیح داده خواهد شد.

تئوری خازن تحریک: برای اینکه ژنراتور القایی خود تحریک باشد، ماشین بایستی در ناحیه اشباع کار کند. بنابراین برای سرعت و بار داده شده، خازن ترمینال بایستی چنان مقداری داشته باشد که X_m در اشباع قرار داشته باشد یا محدودیت دو برقرار گردد.

برای داشتن دیدی نسبت به این مطلب و درک فیزیکی از آن، کافی است ماشین را در یک حالت خاص مثلاً بی باری مورد مطالعه و بررسی قرار داد. شکل (۵-۱۶) منحنی مغناطیس‌کننده استاتور را نشان می‌دهد. فرض بر این است که آرمیچر از نوع آهن نرم است. در اینصورت طبق مدار معادل (۵-۱) در حالت بی باری ($R=0$, $X=\infty$) لغزش (s) بسیار کوچک و فرکانس روتور تقریباً صفر است. در نتیجه خازن تحریک و ماشین در حکم یک مدارالکتریکی LC موازی خواهد بود. وقتی جریان خازن با جریان سلف برابر گردد، در اینصورت چنین مداری در هر فرکانس با حداقل مقدار انرژی می‌تواند تحریک شود. همانطوریکه از شکل (۵-۱۷) پیدا است به ازای هر مقدار خازن



شکل ۵-۱۷- تحریک خازنی.

در یک نقطه جریان خازن و سلف مساوی است. این نقطه محل تلاقی منحنی مغناطیس کننده با منحنی مشخصه ولت آمپر خازن در یک فرکانس ثابت می باشد. پس محدوده خازن $C_1 < C_2 < C_3$ است و خارج از آن تحریک خودی از بین رفته و ماشین به قطع می رود. بطور

مشابه این قضیه بهنگام وجود بار هم برقرار است ولی نمی توان به سادگی توضیح گرافیکی فوق را بیان نمود [۲۷].

راکتانس مغناطیس کننده X_m با افزایش اشباع، کاهش می یابد. مقدار ماکزیمم راکتانس X_m با آزمایش بدست می آید. به این ترتیب که ضمن گرداندن ماشین در سرعت نامی ($v=1$)، ولتاژ متغیری در فرکانس ($F=1$) اعمال کرده و مقدار X_m را برای هر سطح ولتاژی اندازه می گیرند. اگرچه X_m ماشین بعلت اشباع بطور قابل ملاحظه ای با شرایط کاری تغییر می کند، ولی فرض بر این است که X_{smax} تک مقداره می باشد. در عمل این مقدار X_m متناظر با نقطه کاری است که یک کمی بالاتر از قسمت خطی منحنی مغناطیس کننده قرارداد یعنی درست جایی که نقطه کار پایدار امکان پذیر است. بنابراین X_{smax} کمی کمتر از راکتانس مغناطیس کننده غیراشباع ماشین خواهد بود. [۲۸].

حال مسئله تعیین مقادیر C_1 و C_2 به ازای پارامترهای ماشین و v معلوم و $X_m = X_{smax}$ می باشد. پس لازم است که فرکانس F نظیر محاسبه شود.

۵-۹-۴-۱ - روشهای تعیین خازنهای قطع

شاید بنظر برسد که برای تعیین این خازنها باید بررسی دینامیکی صورت گیرد. ولی اگر بیشتر تأمل شود در واقع ما دنبال مقادیری از خازنها هستیم که در ناحیه پایداری کار

باشد، پس در نقاط قطع، ماشین در حالت ماندگار قرار دارد. در اینجا نیز دقیقاً تقسیم بندی که برای محاسبه X_m و F در بخش ۵-۵ گفتیم برقرار است. ولی سعی می‌گردد بطور خلاصه اهم مطالب هر روش توضیح داده شود.

۵-۹-۴-۲ - استفاده از مدار معادل ماندگار برای تعیین C_u و C_l

چندین روش بر این اساس برای محاسبه C_l و C_u مطرح شده است. سعی می‌گردد بطور خلاصه اصول این روشها را گفته شود.

با حذف X_c از توصیف سه، یک چند جمله‌ای بر حسب F بدست می‌آید:

$$\sum_{i=0}^4 \theta_i F^i = 0 \quad (5-54)$$

ضرایب θ_i در مرجع [۲۲] بطور کامل داده شده است. لازم به ذکر است که در رابطه فوق $X_m = X_{smax}$ می‌باشد. معادله (۵-۵۴) را می‌توان بطور تحلیلی حل نمود ولی بدلیل پیچیده شدن بهتر است که از حل عددی کمک گرفت. حال فرض کنید $\{F_i, i \leq 4\}$ مجموعه‌ای از ریشه‌های حقیقی مثبت معادله فوق باشند و $\{C_i, i \leq 4\}$ مجموعه متناظر از مقادیر خازنهای مثبت که با جایگذاری F_i در یکی از رابطه‌های توصیف سه بدست آمده، باشند. توجه شود که ریشه‌های فوق بایستی در محدودیت اول یعنی $0 < F_i < 1$ صدق کند. چون همه مقادیر C_i به ازای 1 و X_{smax} محاسبه شده‌اند پس کافی برای اطمینان از تحریک خودی ژنراتور هستند. چون در حالت کلی می‌توان نشان داد که $(C)X_c$ تابع افزایشی (کاهشی) از F است. اثبات این موضوع در موارد خاص مثل بی باری بسیار راحت می‌باشد [۲۸]. پس $\max\{F_i, i \leq 4\}$ متناظر با C_l و $\min\{F_i, i \leq 4\}$ متناظر با C_u است یا:

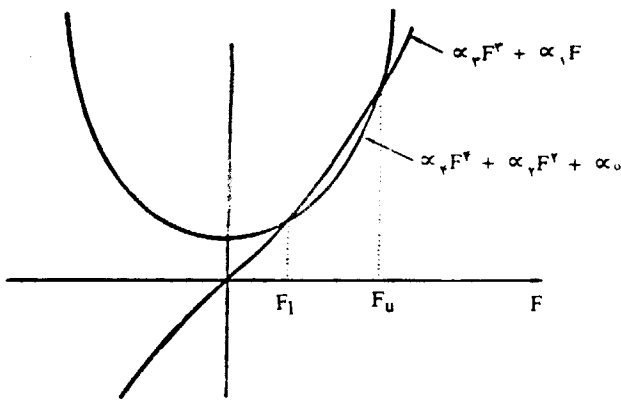
$$C_l = \min\{C_i, i \leq 4\}, C_u = \max\{C_i, i \leq 4\} \quad (5-55)$$

برای ارائه توصیف گرافیکی از وجود چنین خازنهایی، معادله (۵-۵۴) را به شکل زیر

درمی‌آوریم:

$$\alpha_4 F^4 + \alpha_3 F^3 + \alpha_2 F^2 + \alpha_1 F + \alpha_0 = 0 \quad (5-56)$$

ریشه‌های چند جمله‌ای (۵-۵۴) در حقیقت نقاط تلاقی دو منحنی تعریف شده توسط



شکل ۵-۱۸. خازنهای C_1 و C_u

طرفین رابطه (۵-۵۶) می‌باشد

(شکل ۵-۱۸). این دو منحنی

همدیگر را حداکثر در دو نقطه قطع

می‌کنند و با کاهش دادن سرعت

حالتی پیش می‌آید که فقط یک نقطه

تماس خواهند داشت. در نتیجه با

کاهش بیشتر سرعت از این حد

معین، همه ریشه‌های معادله (۵-۵۴) مختلط می‌شوند. این سرعت را سرعت بحرانی و

خازن متناظر را خازن بحرانی می‌نامند و با v_c و C_c نشان داده می‌شود. بحث فوق در هر

شرایطی از بار درست است و فقط باید ضرایب نظیر هر نوع بار را در (۵-۵۴) استفاده کرد.

در مرجع [۲۸] حالت‌های خاص بی‌باری و بار اهمی و بار سلفی خالص بحث شده است.

برای اطلاعات بیشتر به آن مراجعه شود. ولی برای کامل شدن بحث حالت بی‌باری خاصی

که $v_c \gg v$ است را توضیح می‌دهیم. چون $F = v - \varepsilon$ و $\varepsilon > 0$ یک عدد کوچکی است که

بستگی به $\frac{v_c}{v}$ دارد و $\frac{r_r}{F-v} = \frac{r_r}{-\varepsilon}$ عدد بسیار بزرگی می‌باشد. پس با پیدا کردن امپدانس سری

معادل $(X_{smax} | | \frac{r_r}{F-v})$ و صرف نظر کردن از جملاتی که شامل $(F-v)^2$ هستند خواهیم

داشت [۲۸].

$$F^2 - vF + \frac{r_s r_r}{X_{smax} v} = 0 \quad (5-57)$$

$$X_c = F^2 (X_{lr} + X_{smax}) \quad (5-58)$$

در سرعت بحرانی $F_1 = F_v$ است بنابراین از رابطه (۵-۵۷) این سرعت بدست می‌آید:

$$v_c \approx \frac{4 r_s r_r}{X_{smax} v} \quad (5-59)$$

و در اینصورت:

$$C_1 = [2\pi f_b Z_b (X_{smax} + X_r) F_{max}^2]^{-1} \quad (5-60)$$

F_{max} بزرگترین ریشه (۵-۵۷) است. توجه داشته باشید

که $C_1 \propto \frac{1}{F_{max}^2} = \frac{1}{(v-\varepsilon)^2} \approx \frac{1}{v^2}$ پس مینیمم خازن موردنیاز برای تحریک بطور عکس متناسب با مجذور سرعت است.

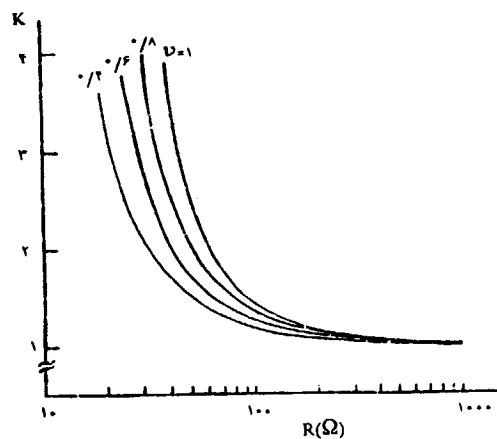
تحت شرایط گذرا، همانطوریکه قبلاً گفته‌ایم پروسه تحریک توسط شتاب ماشین نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. اگر خازن ترمینال $C=C_1$ بکار رود و ژنراتور از حال سکون راه انداخته شود ولتاژ سازی امکان ندارد که واقع شود. بنابراین در عمل، خازن ترمینال C کمی بیشتر از C_1 بایستی انتخاب شود تا مطمئن از تحریک خودی بود. بایستی به این نکته دقت کرد که روابط (۵-۵۸) و (۵-۵۹) و (۵-۶۰) در سرعت‌های خیلی بزرگتر از سرعت بحرانی برقرار است.

برای بار سلفی خالص نیز می‌توان با جایگذاری $R=0$ در روابط کلی به فرم بسته فرمول C_1 دست یافت. ولی برای بار اهمی خالص ($X=0$) رابطه (۵-۵۴) از درجه چهار است و بایستی از حل عددی و به کمک کامپیوتر C_1 و C_{II} را محاسبه نمود. جزئیات بیشتر در مرجع [۲۸] آمده است.

در مرجع [۲۹] یک روش گرافیکی برای بدست آوردن خازن مینیمم از مقدار C_1 در شرایط بی باری پیشنهاد شده است. در بی باری رابطه (۵-۵۴) به یک چند جمله‌ای درجه دو کاهش می‌یابد و براحتی می‌توان C_1 را حساب کرد. با اتصال بار به ماشین، مقدار خازن لازم افزایش می‌یابد که میزان آن بستگی به ماشین و خود بار دارد. همانطوریکه قبلاً گفته شد امکان دستیابی به فرمولهای تحلیلی برای محاسبه C_1 در این شرایط وجود ندارد، بنابراین C_1 را می‌توان از روشهایی بیان شده برای مقادیر امپدانس بار، ضریب توان بار و همچنین سرعت متفاوت حساب کرد و بصورت یک سری منحنی پارامتری رسم نمود و اثر این پارامترها را به صورت ضریبی در C_1 بی باری وارد کرد تا مقدار خازن مینیمم تحت بار بدست آید یعنی:

$$C_L = KC_1 \quad (5-61)$$

نمونه‌ای از منحنی تغییرات K برای ماشین مرجع [۲۹] در شکل (۵-۱۹) آورده شده است. طبیعی است که برای یک ماشین با پارامترهای متفاوت مقدار موردنظر K کمی



فرق خواهد داشت ولی شکل (۵-۱۹) را با تقریب خشنی می‌توان استفاده کرد.

از شکل ۵-۱۹ معلوم است که برای یک سرعت معین، با کاهش مقاومت بار ضریب K افزایش می‌یابد و برای مقدار R داده شده، در سرعت‌های کمتر K مقدار کمتری دارد. چون

مقدار واقعی خازن $K C_1$ است و C_1 طبق رابطه شکل ۵-۱۹ تغییرات K با R و ρ .

(۵-۶۰) متناسب با $\frac{1}{\rho^2}$ می‌باشد، پس مقدار خازن تحت بار با کاهش سرعت افزایش می‌یابد. ولی بر خلاف حالت بی‌باری، برای بار مقاومتی ثابت، این افزایش کمتر از $\frac{1}{\rho^2}$ است.

اثرات ضریب توان و اندازه امپدانس نیز در مرجع [۲۹] بطور کامل بررسی شده است. برای کسب اطلاعات بیشتر و جزئیات بحث به آن مراجعه شود.

۵-۹-۴-۳ - روش فرکانس مختلط برای محاسبه C_u و C_1

در اینجا به توضیح دو روش برای محاسبه خازنهای حدی می‌پردازیم. در روش اول از مدار معادل کاربردی (بخش ۵-۷-۱) و در روش دوم از مدار معادل دو محوری استفاده می‌شود.

با توجه به چند جمله‌ای مشخصه مدار معادل کاربردی (رابطه ۵-۳۶)، تحریک خودی وقتی شروع می‌شود که یک ریشه از آن دارای قسمت حقیقی مثبت باشد. بنابراین در سرعت معینی $C=C_1$ باعث خواهد شد قسمت حقیقی یکی از ریشه‌های معادله مشخصه مثبت باشد. پس با انتخاب $X_m = X_{smax}$ مقدار C_1 از مراحل زیر بدست می‌آید.

- ۱ - مقداری برای C فرض کرده و ریشه‌های معادله مشخصه (۳۶-۵) را حساب کنید.
 - ۲ - اگر هیچ کدام از ریشه‌ها قسمت حقیقی مثبت نداشته باشند، مقدار جدیدی برای C انتخاب کرده و محاسبات را ادامه دهید تا یکی از ریشه‌ها مقدار حقیقی مثبت داشته باشند.
 - ۳ - با اینترپلاسیون مقدار C_1 را طوری بدست آورید که ریشه ذکر شده در بالا مقدار حقیقی صفر داشته باشد.
 - ۴ - با افزایش مجدد C قسمت حقیقی از مثبت به منفی تغییر علامت می‌دهد، با تکرار مرحله ۳ در این حالت مقدار C_{ii} بدست می‌آید.
- روش دوم مبتنی بر مدل دو محوری ژنراتور القایی است. برای پیدا کردن خازنهای C_1 و C_{ii} مراحل زیر بایستی دنبال شود:

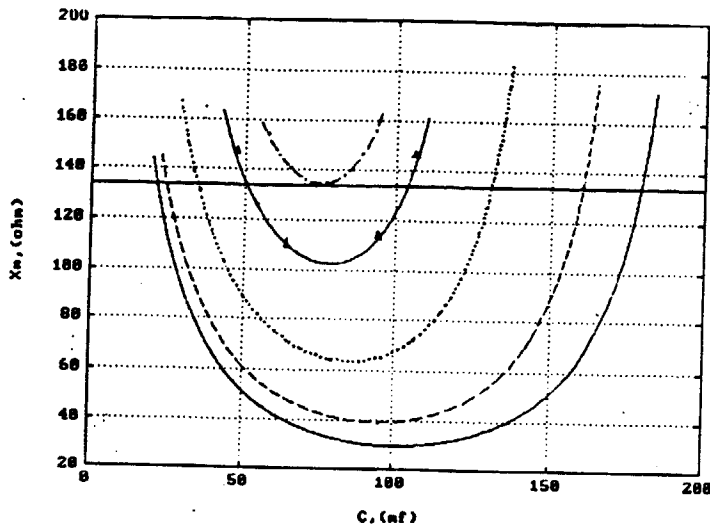
- ۱ - مقداری برای C فرض کرده و ریشه‌های چند جمله‌ای مشخصه (رابطه ۳۹-۵) را که بیانگر پروسه تحریک خودی است، محاسبه کنید.
 - ۲ - فرض کنید ریشه‌ای بفرم $\alpha_i + j\omega_i$ بدست آید که با افزایش C علامت α_i از منفی به مثبت (با عبور از صفر) تغییر کند. مقدار متناظر C در $\alpha_i = 0$ در حقیقت مقدار مینیمم لازم برای شروع پروسه تحریک خودی بوده و ω_i متناظر با فرکانس استاتور است.
 - ۳ - وقتی افزایش C ادامه یابد علامت α_i از مثبت به منفی (با عبور از صفر) تغییر خواهد کرد. در این مقدار $\alpha_i = 0$ ، خازن متناظر در حقیقت C_{ii} که تحریک در آن حفظ می‌شود، بدست می‌آید.
- در بخش بعد به کمک کامپیوتر یک سری مشخصه‌هایی بدست آمده است که تکمیل کننده مطالب فوق بوده و دیدی فیزیکی خوبی را از نحوه تغییر نقاط کار ارائه می‌دهد.
- ۴-۹-۴-۵ - مشخصه‌ای کنترل خازن

مشابه مشخصه کنترل سرعت در اینجا نیز از فرمولهای توصیف چهاراستفاده شده

است.

شکل (۵-۲۰) تغییرات X_m با C و بار اهمی R به ازای $v=1pu$ را برای ژنراتور القایی ایزوله بخش ۳-۹-۵ نشان می‌دهد. از این شکل پیداست که X_m بطور غیر خطی با C تغییر می‌کند. طبق توضیحات قبلی برای حفظ تحریک خودی در حالت ماندگار باید $0 < X_m \leq X_{smax}$ باشد. پس در اینجا نیز از تلاقی منحنی‌های بدست آمده با خط $X_m = X_{smax}$ نقاط حدی یا قطع به ازای هر بار بدست می‌آید. در بی باری بشرطیکه $C_l \leq C \leq C_u$ باشد تحریک خودی حفظ خواهد شد. وقتی بار به ماشین اضافه شود این مقادیر حدی همانطوریکه از شکل (۵-۲۰) آشکار است، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. پس به ازای هر بار یک فاصله‌ای برای C وجود دارد که در آن تحریک خودی حفظ می‌گردد. این فاصله یا محدوده بستگی به امپدانس بار، ضریب توان، سرعت ماشین و پارامترهای الکتریکی آن دارد. وقتی مقاومت بار بتدریج کاهش یابد، محدوده فوق نیز مستمراً کاهش خواهد یافت. سرانجام در مقداری از R هر دو مقدار حدی C برابر می‌شوند. این مقدار C را خازن بحرانی می‌نامند. اگر R بیشتر کاهش پیدا کند، مستقل از مقدار خازن تحریک $X_m > X_{smax}$ می‌گردد و تحریک خودی غیر ممکن می‌شود. به این ترتیب مقدار مینیمم مقاومت بار که می‌توان به ژنراتور وصل نمود تا تحریک خودی حفظ گردد بدست می‌آید. در ماشین موردنظر برای $v=1pu$ مقدار مینیمم مقاومت بار $R=0.52pu$ است.

شکل (۵-۲۰ ب) تغییرات F با C را به ازای مقادیر مختلف R نشان می‌دهد. از این شکل واضح است که در حالت بی باری وقتی $C=C_l$ است $F \approx v$ می‌باشد. ولی همینکه C افزایش یابد، F به تدریج کمتر می‌شود. نتیجتاً راکتانس خازنی $\frac{X_c}{F}$ در ابتدا با افزایش C کاهش پیدا می‌کند اما بعد عملاً مستقل از مقدار C می‌گردد. وقتی که C از یک مقدار معینی بیشتر شود، این راکتانس خازنی کمی افزایش می‌یابد. سرانجام در $C \approx C_u$ فرکانس $F \approx \frac{v}{p}$ می‌گردد. تحت چنین شرایطی امپدانس مدار روتور یعنی $\frac{I_r}{F-v} + jX_{lr}$ کوچک شده و $I_s \approx I_r$ می‌شود. بنابراین i_m همچنین ولتاژ فاصله هوایی خیلی کوچک می‌گردند، بطوریکه ماشین



شکل ۵-۲۰- تغییرات X_m با C به ازای

بارهای اهمی مختلف.

— $R = \infty$.

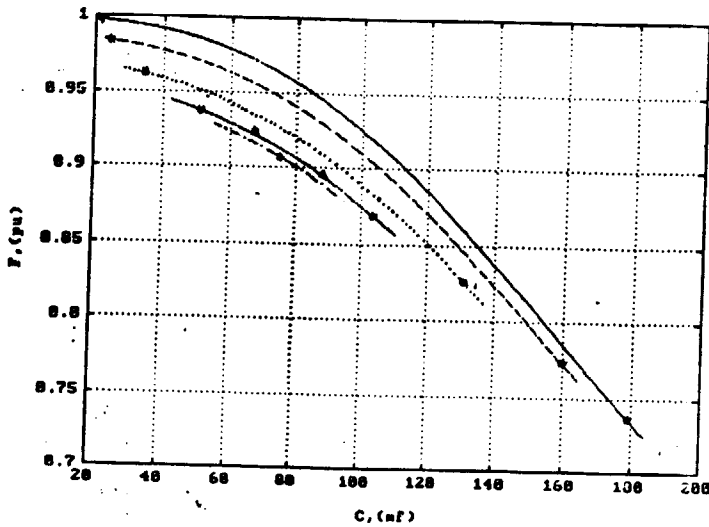
---- $R = 2/5$ pu.

..... $R = 1$ pu.

—•— $R = 0.6925$ pu.

-.- $R = 0.52$ pu.

شکل ۵-۲۰- الف - تغییرات X_m با C .



شکل ۵-۲۰- ب - تغییرات F با C

نظیر شکل الف.

خازن تحریک (μF)	فرکانس (pu)	لغزش
۲۱/۴۹۲۰	۱۷۹/۰۱۱۴	۰/۹۹۸۱ ۰/۷۳۶۷
۲۴/۵۰۷۵	۱۵۹/۷۱۳۳	۰/۹۷۴۴ ۰/۷۷۳۳
۳۴/۴۶۸۱	۱۳۰/۸۷۱۷	۰/۹۶۱۹ ۰/۸۲۶۱
۵۰/۷۹۸۹	۱۰۳/۸۱۰۰	۰/۹۳۷۸ ۰/۸۶۸۹
۷۵/۱۷۱۵	۷۵/۱۷۱۵	۰/۹۰۶۸ ۰/۹۰۶۸

جدول ۶ - نقاط حدی برای شکل (۵-۲۰)

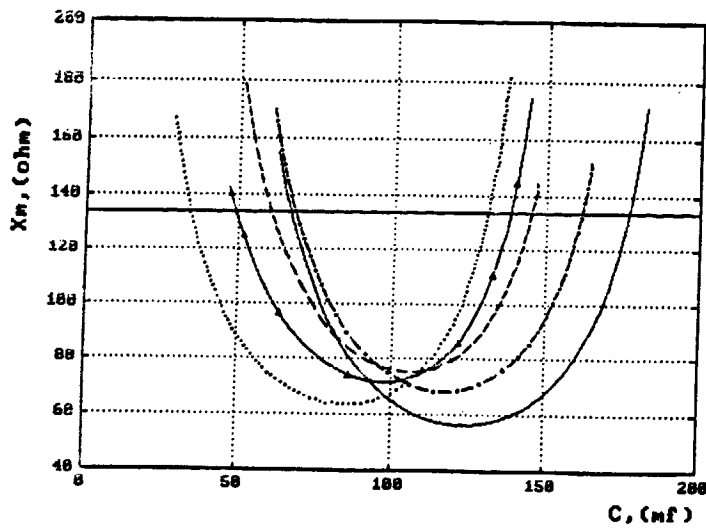
تحریک خودی را از دست می‌دهد. در صورت وجود بار پدیده مشابه برقرار بوده ولی مقدار C_{II} کمتر می‌شود. خوب است به این نکته دقت شود که برای مقدار معین R فرکانس F با افزایش C کاهش می‌باشد. بعلاوه در مقدار معین C ، فرکانس با کاهش مقدار امپدانس بار کمتر می‌شود. در این شکل نقاط حدی با ستاره (*) مشخص شده اند و در جدول شش مقادیر C_I و C_{II} و فرکانس و لغزش متناظر آورده شده است.

در شکل (۵-۲۱) اثر تغییر ضریب توان به ازای مقدار امپدانس بار ثابت به نمایش گذاشته شده است. در این شکل $R=1pu$ بوده و ضریب توان بعنوان پارامتر می‌باشد. همچنانکه از تغییرات X_m با C معلوم است با کاهش ضریب توان پس فاز C_I و C_{II} نسبت به حالت بار اهمی خالص یعنی ضریب توان واحد بیشتر می‌شود. علت این است که وجود راکتانس سلفی X در بار باعث کاهش مؤلفه خازنی در بار معادل X_L شده و بایستی C بزرگتر شود تا اثر X را خنثی نماید. خلاصه‌ای از نقاط حدی در جدول هفت آمده است.

در سومین مشخصه به ازای یک بار ثابت اثر سرعت روتور بررسی شده است. شکل (۵-۲۲) نمونه‌ای از این مشخصه به ازای بار اهمی $R=1pu$ را نشان می‌دهد. همانطوریکه از شکل (۵-۲۲) ملاحظه می‌شود در صورتیکه سرعت روتور ثابت نگه داشتن بار بطور پله‌ای افزایش یابد به حالتی می‌رسیم که $C_I=C_{II}$ می‌شود. یعنی تنها در یک سرعت به ازای C_{II} پروسه تحریک خودی و ولتاژ سازی ممکن خواهد شد. این خازن، خازن بحرانی نامیده می‌شود. شکل (۵-۲۲ ب) تغییرات فرکانس نظیر شکل الف را نشان می‌دهد و جدول هشت مقادیر عددی حدود تحریک خودی را شامل است. اگر نتایج این بررسی با شکل (۵-۱۲) مقایسه شود می‌توان نتیجه گرفت که کمیت‌های بحرانی C_c و V_c به ازای بار ثابت مساوی هستند، یعنی مستقل از تغییر خازن یا سرعت برای یک بار معین نهایتاً یک نقطه بحرانی وجود دارد.

اختلاف مشاهده شده در نتایج بدین دلیل است که از روشهای گرافیکی برای پیدا کردن

این نقاط استفاده شده است. مقادیری که از محاسبه دقیق بدست می‌آید بشرح زیر است :



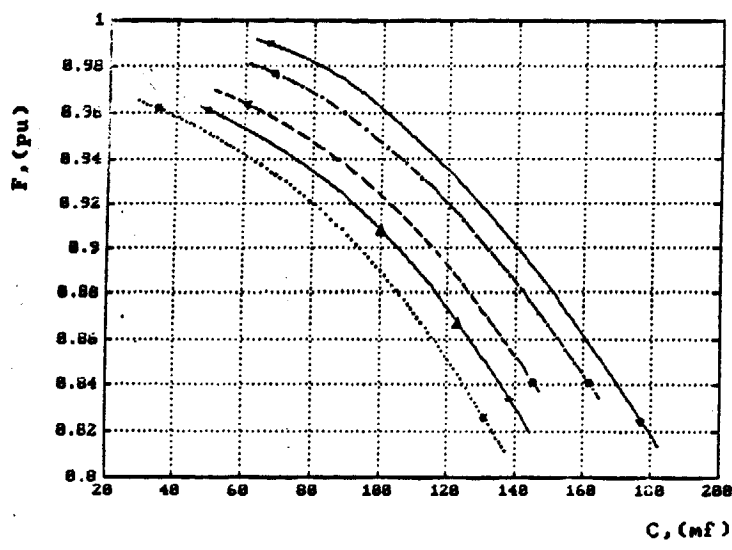
شکل ۵-۲۱- تغییرات X_m با C به ازای

$|Z|$ و ضریب توانهای پس فاز

- مختلف. $pf = 1.0$
- ▲— $pf = 0.9$
- - - $pf = 0.7$
- . - $pf = 0.3$
- $pf = 0$

شکل ۵-۲۱- الف - تغییرات X_m با

ضریب توان.

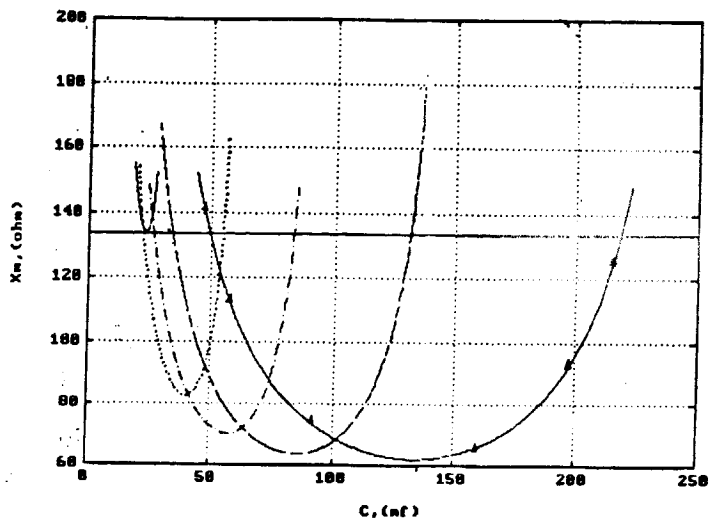


شکل ۵-۲۱- ب - تغییرات F متناظر

با شکل الف.

ضریب توان	خازن تحریک (μf)		فرکانس (pu)		لغزش	
$pf=1$	۳۴/۴۶۸۱	۱۳۰/۸۷۱۷	۰/۹۶۱۹	۰/۸۲۶۱	۰/۰۳۹۶	۰/۲۱۰۵
$pf=0.9$	۴۹/۲۷۳۶	۱۳۸/۳۶۹۸	۰/۹۶۱۵	۰/۸۳۳۸	۰/۰۴۰۱	۰/۱۹۹۳
$pf=0.7$	۶۰/۹۳۷۶	۱۴۵/۳۰۴	۰/۹۶۳۶	۰/۸۴۱۱	۰/۰۳۷۷	۰/۱۸۸۹
$pf=0.3$	۶۸/۵۱۲۴	۱۶۱/۴۹۰۶	۰/۹۷۶۷	۰/۸۴۰۸	۰/۰۲۳۸	۰/۱۸۹۳
$pf=0$	۶۷/۰۳۷۵	۱۷۶/۹۴۳۴	۰/۹۸۹۸	۰/۸۲۵۴	۰/۰۱۰۳	۰/۲۱۱۶

جدول ۷ - نقاط حدی برای شکل (۵-۲۱)

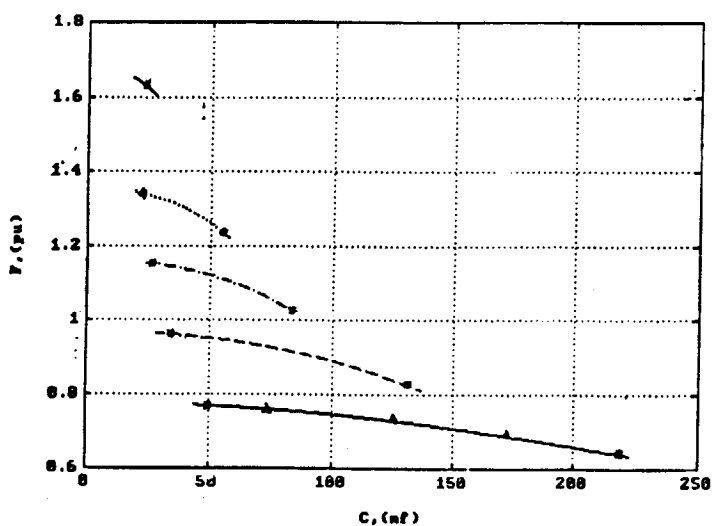


شکل ۵-۲۲ - تغییرات X_m با C به ازای

بار اهمی $R=1 pu$ در سرعت‌های v

- مختلف $v=0.8 pu$.
- $v=1 pu$.
- .- $v=1/2 pu$.
- $v=1/4 pu$.
- $v=1/\sqrt{36} pu$.

شکل ۵-۲۲ - الف - تغییرات X_m با C .



شکل ۵-۲۲ - ب - تغییرات F_z متناظر

با شکل الف.

سرعت (pu)	خازن تحریک (μf)		فرکانس (pu)		لغزش	
$v=0.8$	۴۹/۵۱۲۱	۲۱۸/۲۵۹۱	۰/۷۶۹۵	۰/۶۴۰۵	۰/۰۳۹۶	۰/۲۴۹۱
$v=1$	۳۴/۴۶۸۱	۱۳۰/۸۷۱۷	۰/۹۶۱۹	۰/۸۲۶۱	۰/۰۳۹۶	۰/۲۱۰۵
$v=1/2$	۲۶/۶۶۳۱	۸۳/۱۱۶۴	۱/۱۵۳۰	۱/۰۲۴۸	۰/۰۴۰۸	۰/۱۷۱۰
$v=1/4$	۲۲/۴۳۶۳	۵۴/۶۸۳۵	۱/۳۴۱۸	۱/۲۳۴۹	۰/۰۴۳۴	۰/۱۳۳۷
$v=1/\sqrt{36}$	۲۲/۴۵۷۷	۲۳/۴۵۷۷	۱/۶۲۹۶	۱/۶۲۹۶	۰/۰۶۵۳	۰/۰۶۵۳

جدول ۸ - نقاط حدی برای شکل (۲۲-۵)

$$F_1 = F_u = 1/64 \quad , \quad C_c = C_1 = C_u = 23/1785 \mu f \quad , \quad v_c = 1/7483115 pu$$

بنابراین نتیجه‌ای که تا اینجا می‌توان گرفت این است که :

محدودیت چهارم: برای یک ماشین معین به ازای سرعت روتور و بار داده شده،

مقدار خازن تحریک بایستی در محدوده معینی باشد تا تحریک

خودی بوجود آید. پس چهارمین محدودیت $C_1 < C < C_u$ روی

مقدار خازن ترمینالها است.

همچنین ثابت شد که به ازای سرعت معین با کاهش بار به حالتی می‌رسیم که $C_1 = C_u$

شده و تنها در یک خازن بخصوص به نام خازن بحرانی امکان ولتاژسازی و شروع تحریک

خودی وجود دارد. بطور مشابه به ازای بار معین با افزایش سرعت روتور دوباره حالتی

پیش می‌آید که $C_1 = C_u$ می‌گردد، یعنی فقط در یک خازن تحریک بخصوص تحریک خودی

ممکن می‌شود. این خازن را نیز خازن بحرانی گویند.

برای اینکه از نحوه تغییرات کمیت‌های الکتریکی ماشین بر حسب تغییرات خازن ترمینال

مطلع شویم، از فرمولهای آنالیز بخش ۵-۸ برای اطلاعات بدست آمده در شکل (۵-۲۰)

استفاده کرده و شکل‌های بعدی رسم شده است.

شکل (۵-۲۳) تغییرات I_L , I_r , I_s را با خازن تحریک نشان می‌دهد. تمامی این

جریانها دارای نقاط ماکزیممی هستند که در یک خازن یکسان واقع می‌شود. ماکزیمم

جریان روتور بین ۲/۵ تا ۵ pu می‌باشد. بعلت چنین جریانهایی تلفات ماشین در مقادیر

معین از C خیلی زیاد می‌شود. در نتیجه بازده با افزایش C کاهش می‌یابد (شکل ۵-۲۵).

شکل (۵-۲۴) تغییرات V_g , V_t را با خازن دربارهای مختلف اهمی نشان می‌دهد. با

افزایش تدریجی C از C_1 ، هم V_g و هم V_t به طور خطی افزایش می‌یابند. وقتی C خیلی

بزرگ شود، تغییر V_g و V_t همانطوریکه انتظار داریم غیر خطی می‌گردد. طبق شکل

(۵-۲۴) ولتاژهای V_g و V_t بطور شدیدی تحت تأثیر C و R قرار می‌گیرند و در بعضی

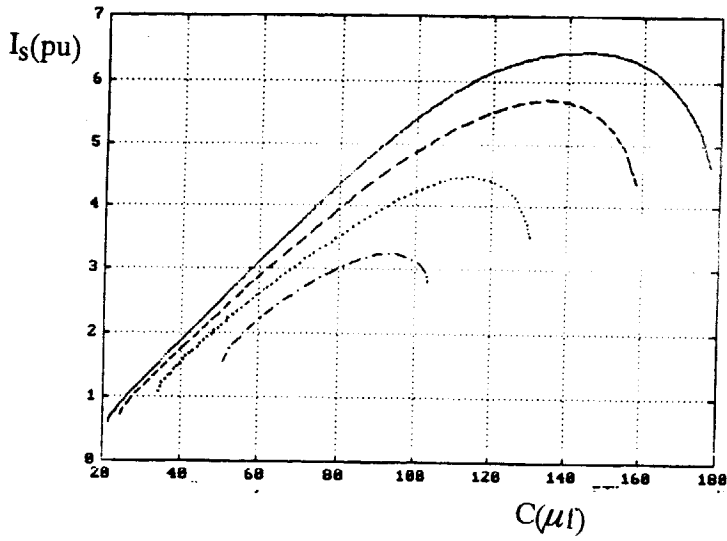
مقادیر، V_t به بالاتراز برابر مقدار نامی می‌رسد. بنابراین انتخاب مناسب مقدار خازن

شکل ۵-۲۳- تغییرات I_S , I_R و I_L با C

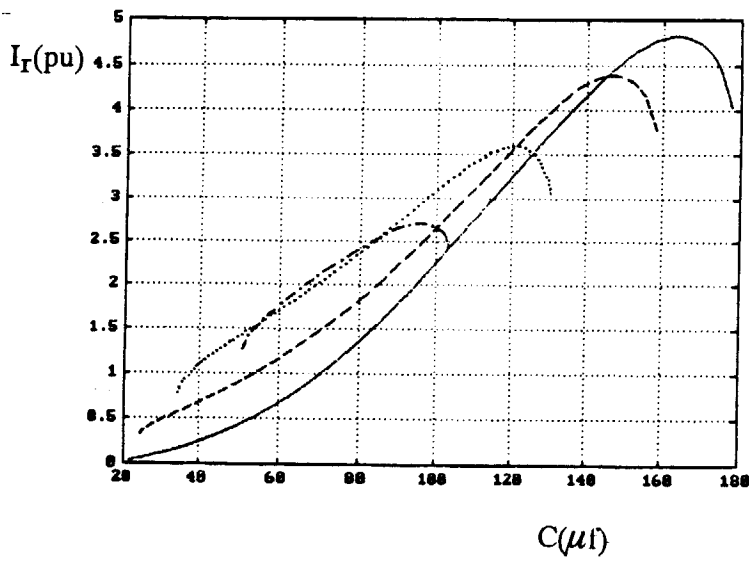
در بارهای مختلف زیر:

- $R = \infty$.
- $R = 2/5$ pu.
- $R = 1$ pu.
- .-.- $R = 0.6925$ pu.

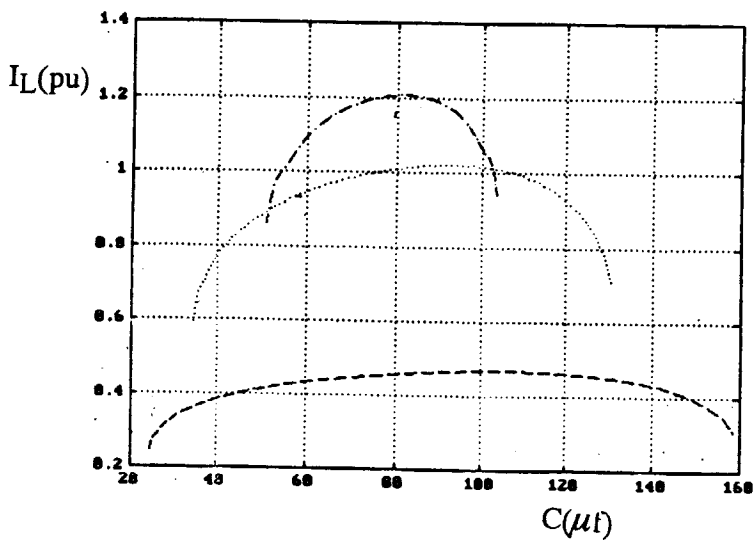
شکل ۵-۲۳- الف - تغییرات I_S با C .



شکل ۵-۲۳- ب - تغییرات I_R با C .



شکل ۵-۲۳- پ - تغییرات I_L با C .



بسیار مهم است. علاوه بر مقدار امپدانس بار، ضریب توان نیز روی مشخصه ولتاژ ماشین اثر دارد. از دیاگرام‌های شکل (۵-۲۴) واضح است که تحت هر شرایط بار، مقادیر ماکزیمی V_l ، V_g دارند که تحت تأثیر امپدانس بار و ضریب توان آن است. اختلاف بین V_l و V_g می‌تواند به بزرگی $1 pu$ باشد.

تغییرات توانهای P_{out} ، P_{in} و بازده η در شکل (۵-۲۵) رسم شده است. این توانها نیز در خازنهای بخصوص ماکزیمم مقداری پیدا می‌کنند. بازده نیز با افزایش C ، کاهش می‌یابد و برای بارهای کوچکتر بازده بیشتری بدست می‌آید.

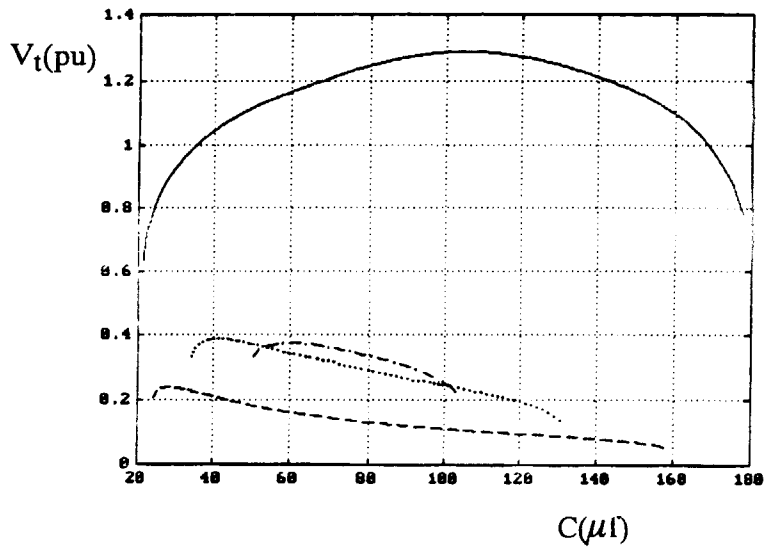
تغییرات Q_c نیز در شکل (۵-۲۶) آمده است. با افزایش مقدار C توان راکتیو گرفته شده از خازن کاهش می‌یابد.

نتایج بررسی شکل‌های (۵-۲۳) تا (۵-۲۶) این است که C بایستی حدالمقدور کوچک انتخاب شود تا:

- ۱ - ولتاژهای فاصله هوایی و ترمینال منجر به خراب شدن عایقها نگردد.
- ۲ - مقدار جریانهای استاتور روتور بزرگ نباشد، چرا که در غیر اینصورت سیم پیچها خیلی گرم می‌شوند.
- ۳ - از بازده و فرکانس کمتر جلوگیری شود.

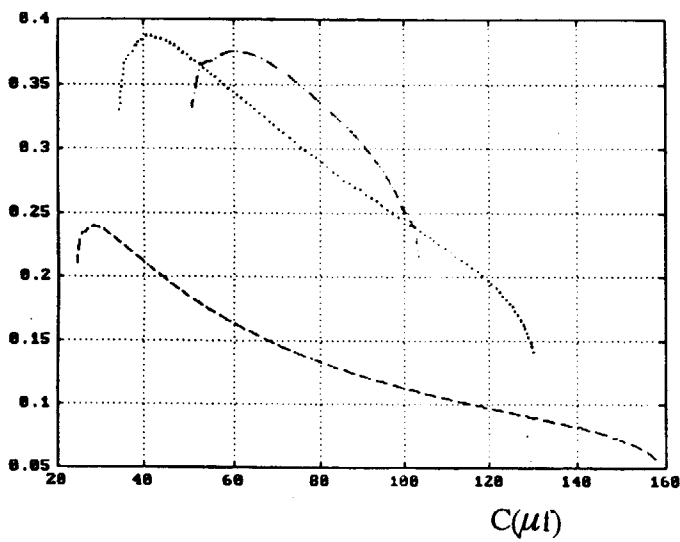
بدیهی است برای اینکه V_l در مقدار ثابت $1 p.u$ بماند، خازن تحریک بایستی با امپدانس بار افزایش یابد. برای بار و سرعت ماشین معین، مقدار موردنیاز C قابل محاسبه است. اگر V_l در مقدار $1 p.u$ نگه داشته شود مقدار C نه تنها تحت تأثیر توان خروجی است، بلکه تابع ضریب توان نیز هست. یعنی مقدار خازن در ضریب توان پس فاز بزرگتر خواهد بود و با کاهش ضریب توان، C لازم افزایش خواهد یافت. برای ضریب توان پیش فاز مقدار C کمتر از حالت بار مقاومتی خواهد بود و با کاهش ضریب توان، مقدار C لازم کمتر شده و حتی در بعضی بارها به صفر می‌رسد.

عموماً در سرعت معین ω می‌توان V_l را به ازای مقادیر متفاوت امپدانس بار با

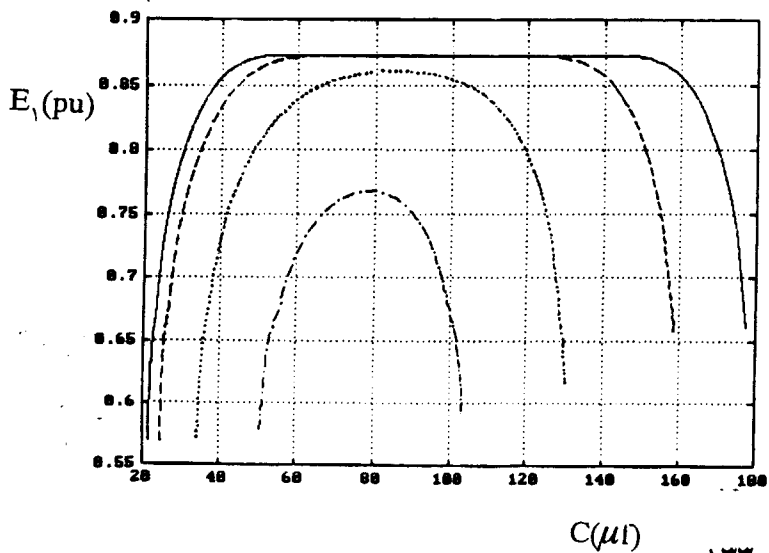


شکل ۵-۲۴- تغییرات V_t و E_1 با C در بارهای مختلف نظیر شکل (۵-۲۳).

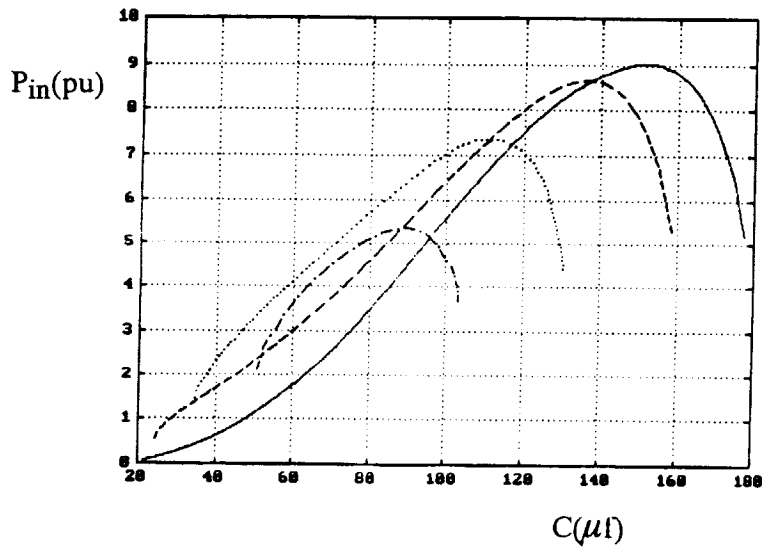
شکل ۵-۲۴- الف - تغییرات V_t با C .



شکل ۵-۲۴- ب - تغییرات V_t با C بدون $(R = \infty)$.

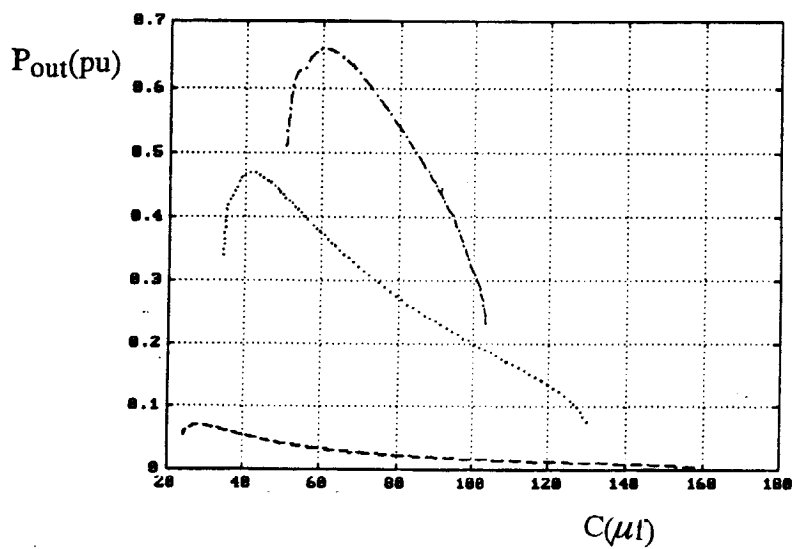


شکل ۵-۲۴- پ - تغییرات E_1 با C .

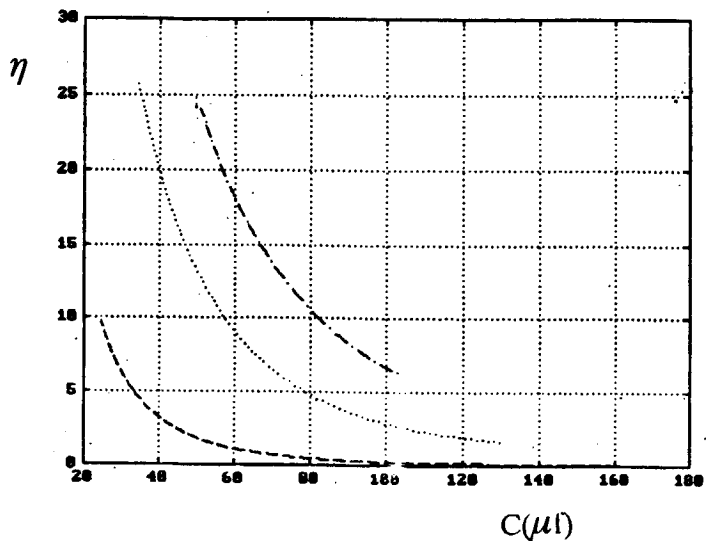


شکل ۵-۲۵- تغییرات P_{in} , P_{out} , و η با C در بارهای نظیر شکل (۵-۲۳).

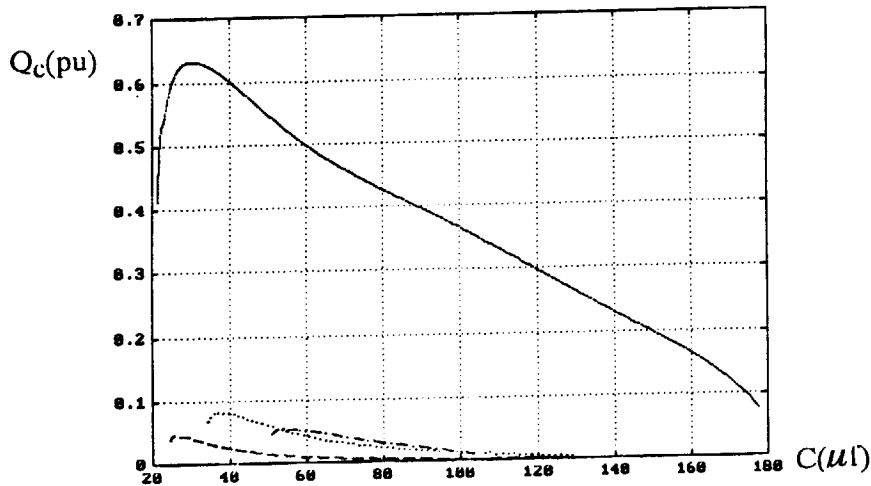
شکل ۵-۲۵- الف - تغییرات P_{in} با C .



شکل ۵-۲۵- ب - تغییرات P_{out} با C .



شکل ۵-۲۵- پ - تغییرات η با C .



شکل ۵-۲۶- تغییرات Q_c با C در بارهای نظیر شکل (۵-۲۳).

تنظیم C در 1 pu نگهداشت. ولی از آنجاییکه F تا حدودی با افزایش P_{out} افت پیدا می‌کند بهمین جهت هم V_1 و هم F را نمی‌توان فقط با تنظیم خازن ثابت نگهداشت. معمولاً وقتی $P_{out}=0$ است (بی باری) فرکانس $\omega \approx F$ می‌باشد.

اگر ω کوچکتر از 1 pu باشد امکان ثابت نگه داشتن V_1 در 1 pu با تنظیم خازن وجود دارد، ولی در سرعت روتور کمتر مقدار خازن مورد نیاز خیلی بزرگ می‌شود که این هم منجر به I_r و I_s و جریان خازن خیلی زیاد می‌گردد که به احتمال قوی کار ژنراتور در این شرایط را غیر عملی می‌سازد.

پس بایستی C در محدودیت چهار صدق کند و تا حد ممکن به C_1 نزدیک باشد، چرا که روی عملکرد ماشین اثر زیادی دارد.

۴-۹-۵ - عملکرد ماندگار: کنترل کردن امپدانس بار.

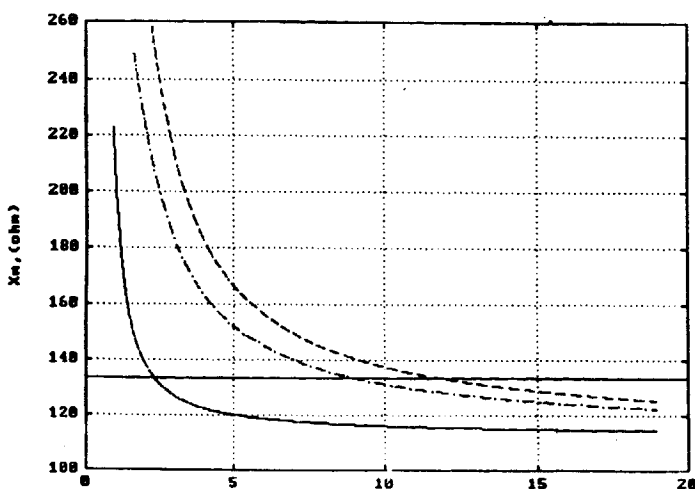
طبق بررسی‌های مفصلی که در قسمت‌های قبل انجام شد، دو نوع کمیت قطع و بحرانی برای پارامترهای سرعت و خازن ماشین مطرح شده ولی برای پارامتر امپدانس بار فقط کمیت بحرانی تعریف می‌شود. در واقع دستیابی به کمیت‌های بحرانی حل یک مسئله اپتیمم سازی است.

فرض کنید بار متصل به ترمینال ژنراتور یک بار اهمی باشد. اگر R خیلی کوچک باشد، در ترکیب موازی با خازن غالب خواهد شد و اثر C با میل کردن R به صفر از بین

می رود، بطوریکه نهایتاً ماشین را به ناحیه قطع می کشاند. از طرف دیگر اگر R خیلی بزرگ باشد معادل مدار باز خواهد شد. یعنی جریان خروجی و توان خروجی صفر می گردد. بین این دو حد یک انتخاب اپتیمم برای R وجود دارد و یک مقاومت بحرانی مطرح می گردد. در یک ماشین بخصوص برای پیدا کردن این مقدار بحرانی به ازای سرعت روتور معین، مقدار اولیه ای برای $|Z|$ فرض کرده و مقادیر C_U و C_I محاسبه می شود. سپس با کاهش دامنه امپدانس بطور پله ای به مقدار $|Z|$ ، این عمل تکرار می شود تا اینکه شرط $C_I = C_U$ برقرار گردد. این مقدار خازن، خازن بحرانی و امپدانس متناظر امپدانس بحرانی خواهند بود. در شکل (۵-۲۰) نمونه ای از این مقادیر بحرانی برای بار اهمی بدست آمده است.

بطور مشابه می توان بازای خازن معین، سرعت و بار بحرانی را بدست آورد (شکل ۵-۱۰). دقت شود که مقدار Z بحرانی که از دو مسئله اپتیمم سازی فوق محاسبه می شود متفاوت هستند ولی اگر در حالت اول $v = v_c$ باشد حتماً $|Z_c|$ بدست آمده با حالت دوم مساوی خواهد شد و برعکس.

نحوه تغییر X_m با $|Z|$ به ازای خازن و سرعت معین، منحنی جالب دیگری است که اثر کنترل بار بر روی X_m را بوضوح نشان می دهد. برای ماشین بخش ۵-۹-۳ این منحنی بدست آورده شده است (شکل ۵-۲۷).



شکل ۵-۲۷ - تغییرات X_m
بر حسب $|Z|$ برای
ضرایب توان مختلف
و $C = 25 \mu f$ ، $v = 1 pu$.
— pf = 1
- . - pf = 0.9
- - - pf = 0.8

از شکلهایی که قبلاً بدست آمده می توان تغییرات V_t و P_{out} و F و η را بر حسب

$|Z|$ هم بدست آورد [۲۲].

بنابراین خلاصه مطالب فوق بیان محدودیت زیر برای بار است :

محدودیت پنجم : برای ماشین معین به ازای سرعت خازن مشخص و ثابت مقدار دامنه

امپدانس از یک حدی نباید کمتر شود.

۵-۱۰ - بهینه سازی کارکرد ژنراتور القایی بر اساس محدودیتهای کاری

در بخشهای قبل عملکرد ژنراتور القایی بر اساس تغییر یکی از عناصر بیرونی و

ثابت نگه داشتن دو عنصر دیگر آنالیز و بحث شد و محدودیتهای کاری ماشین بدست آمد.

مرحله بعدی در نظر گرفتن حالتی است که هر سه عنصر ν و C و بار (مثلاً R) بتوانند تغییر

کنند. یعنی ترکیبی از این سه عنصر وجود دارد که توان خروجی (یا هر کمیت دیگری) در

آن ماکزیمم می گردد. مسئله بصورت زیر فرموله می شود :

$$\max (P_{out})$$

$$\sum_{i=0}^{\nu} \alpha_i F_i = 0 \quad , \quad X_m = - \frac{\sum_{i=0}^{\nu} a_{\nu i+1} F_i}{\sum_{i=0}^{\nu} a_{\nu i} F_i}$$

$$0 < F < \nu \quad , \quad 0 < X_m < X_{smax} \quad , \quad R > 0$$

با روشهای عددی می توان این مسئله را حل کرد. در مواردی که سرعت قابل کنترل

نیست و مقدار مشخصی ندارد (مثل قدرت باد) ترکیب R و C چنان انتخاب می شود که

توان متوسط ماکزیمم گردد.

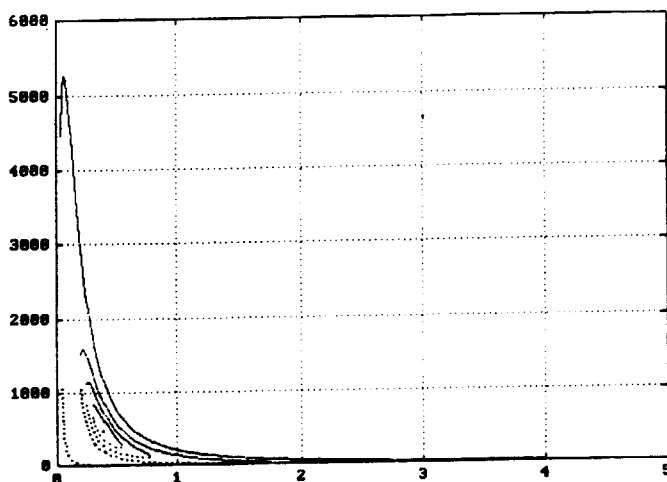
۵-۱۱ - عملکرد ماندگار ژنراتور القایی در یک مشخصه

مشخصههایی که تاکنون برای ژنراتور القایی بدست آوردیم بدلیل تنوع ممکن است

موجب سردرگمی شوند. بنابراین برای خلاصه کردن این مشخصهها کافی است که از سه

متغیر قابل کنترل یکی را بعنوان پارامتر انتخاب کرده، سپس متغیر دوم را بر حسب سومی بدست آورد یا برعکس. ظاهراً بنظر می‌رسد برای انتخاب یکی از آنها بعنوان پارامتر بایستی دلیل منطقی وجود داشته باشد. از آنجاییکه تغییر بار بعنوان یک پارامتر مستقل مشکل و شاید در بعضی موارد غیر ممکن باشد، پس بهتر است که مقدار امپدانس را بعنوان پارامتر گرفته و خازنهای C_1 و C_2 را به ازای سرعت بار بدست آوریم.

نتیجه چنین مشخصه‌ای برای ماشین بخش ۵-۹-۳ در شکل (۵-۲۸) رسم شده

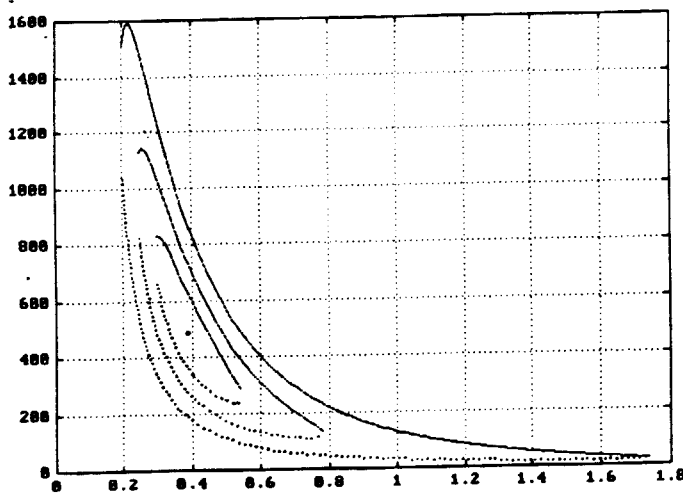


شکل ۵-۲۸-الف - حد تحریک خودی

در هر بار.

— C_2 .

..... C_1 .



شکل ۵-۲۸-ب - بزرگ شده شکل الف .

(بدون $R = \infty$) .

شکل ۵-۲۸- خازنهای C_1 و C_2 در مقابل سرعت v به ازای بارهای متفاوت. از بیرون به داخل به ترتیب بارها عبارتند از $R = \infty$ ، $R = 1 pu$ ، $R = 0.5 pu$ ، $R = 0.4 pu$ ، $R = 0.364 pu$.

است. قسمت الف این شکل به ترتیب از بیرون به داخل شامل بی باری و بارهای اهمی
 $R=0/3641pu$ و $R=0/4pu$ ، $R=0/5pu$ ، $R=1pu$ برای بهتر مشخص شدن
تغییرات، در شکل (۵-۲۸ ب) مجدداً منحنی‌های مربوط به بارهای اهمی نشان داده شده
است. همچنانکه از این شکل معلوم است به ازای بار معین در هر خازنی می‌توان v_1 ، v_u را
بدست آورد و برعکس به ازای سرعت مشخص می‌توان مقادیر C_1 ، C_u را نتیجه گرفت. در
اینجا نیز براحتی می‌توان در هر بار نقطه بحرانی را پیدا کرد. طبق تعریف در جایی که
 $C_u=C_1$ یا بطور معادل v_1 ، v_u می‌شود نقطه کار بحرانی نظیر آن بار بدست می‌آید.
همچنین از این شکل دیده می‌شود که با کاهش بار محدوده تغییر سرعت و خازن
کاهش پیدا می‌کند و نهایتاً به ازای یک بار معین ماشین فقط یک نقطه کار خواهد داشت.
یعنی در این بار فقط خازن و سرعت معین منجر به ولتاژسازی می‌گردد. در شکل (۵-۲۸)
ایسن وضعیت بایک نقطه به مختصات $v_c=0/39pu$ ، $C_c=484/5977\mu f$ ،
 $R_c=0/3641pu$ مشخص شده است.

فصل ششم

مثالهایی از حالت‌های گذرا در ژنراتور القایی

در آخرین فصل، نمونه‌هایی از حالت‌های گذرا بررسی می‌شود که در اثر اتصال بار به ژنراتور و وقوع اتصال کوتاه در ترمینال‌های آن بوجود می‌آیند. ماشین بکار رفته در تمام بررسیهای زیر همان ماشین بخش ۴-۶ می‌باشد [۳۰].

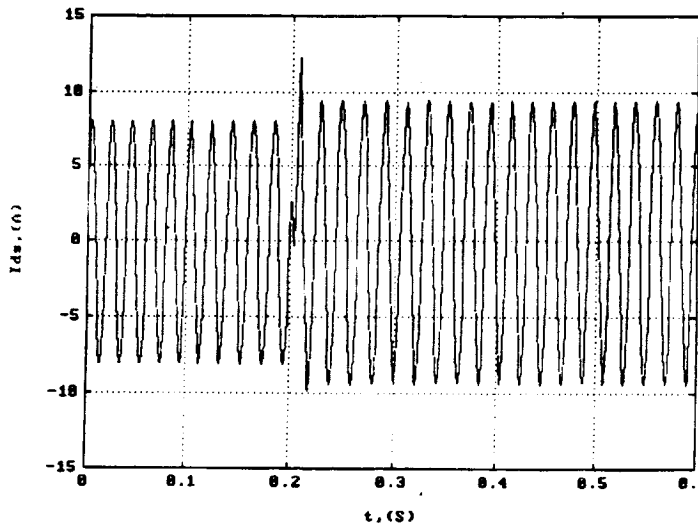
۶-۱ اتصال بار اهمی به ژنراتور القایی

فرض می‌کنیم ماشین القایی با سرعت سنکرون بهمراه بانک خازنی متصل به ترمینال‌های استاتور، چرخانده شده و تحریک خودی ماندگار بدست آمده است. در این حالت بطور ناگهانی در زمان $t=0$ / ۲ ثانیه یک بار ستاره ۲۷ اهمی به ترمینال‌های ژنراتور وصل می‌گردد. تغییرات کمیت‌های الکتریکی در شکل‌های (۶-۱) و (۶-۲) نشان داده شده است.

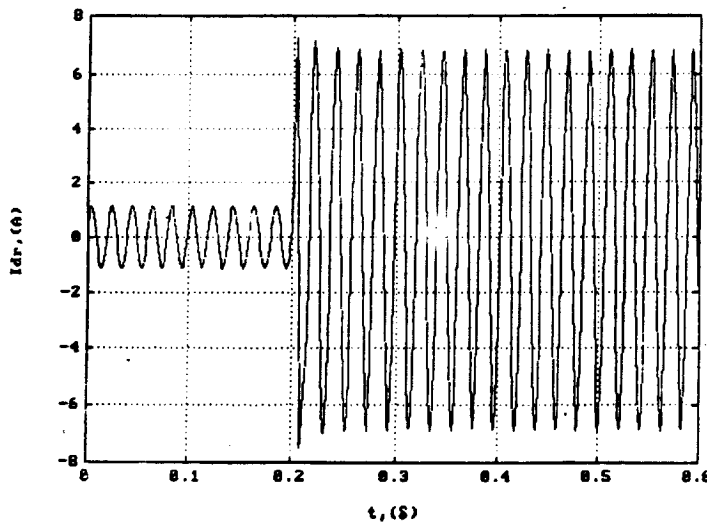
شکل (۶-۱) شامل متغیرهای محور d ، جریان و اندوکتانس مغناطیس‌کننده می‌باشد. همانطوریکه از این شکل مشاهده می‌شود با اتصال بار اهمی جریان‌های d استاتور و روتور به جهت تزریق توان افزایش می‌یابد. ولی ولتاژ V_{ds} افت پیدا می‌کند. نکته قابل توجه این است که وجود بار باعث می‌شود میزان تغییرات جریان روتور بیشتر از استاتور باشد.

بر اساس توضیحات قبلی می‌توان پیش بینی کرد که i_m در اثر خاصیت ضد مغناطیسی بار کاهش خواهد یافت. شکل (۶-۱) تغییرات i_m را در پریرود گذرا نشان می‌دهد. نحوه تغییرات I_m نیز در همین شکل آورده شده است.

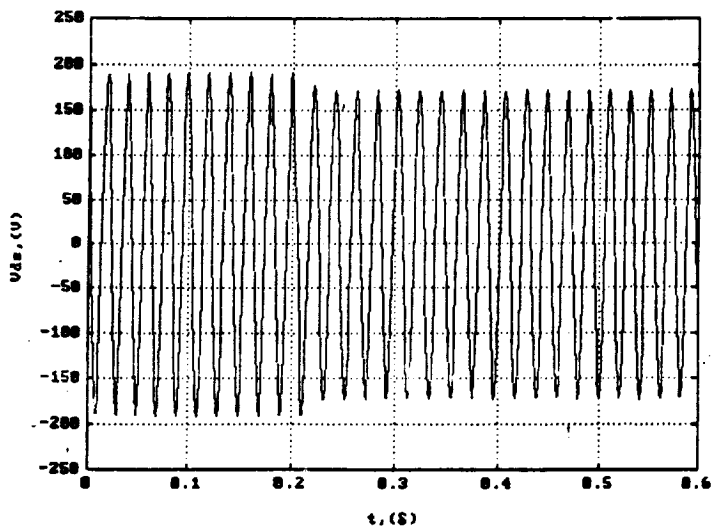
شکل ۱-۶- تغییر کمیات V_{ds} , i_{dr} , i_{ds}
 i_m و L_m بهنگام اضافه شدن
 بار $R = 27 \Omega$.



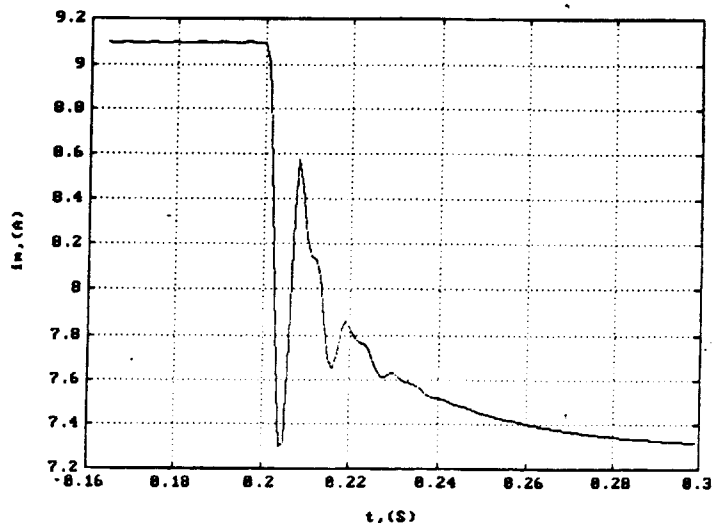
شکل ۱-۶- الف - تغییرات i_{ds} با زمان.



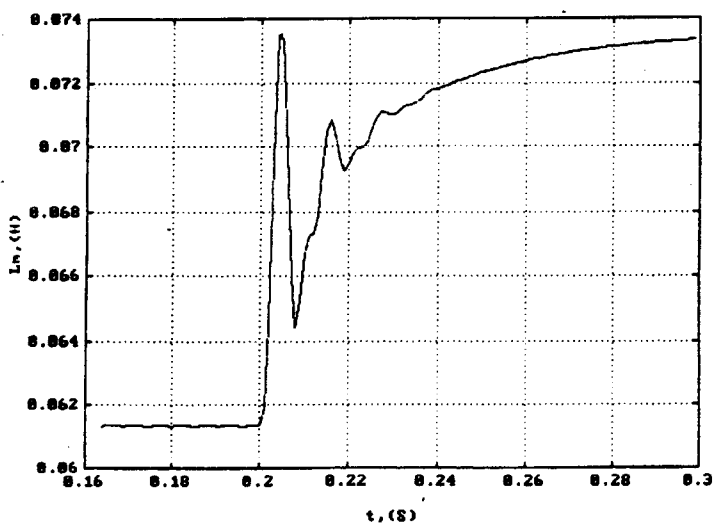
شکل ۱-۶- ب - تغییرات i_{dr} با زمان.



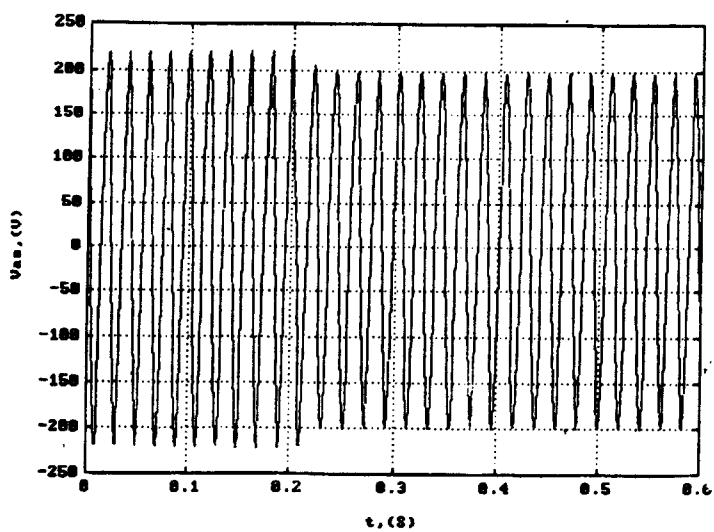
شکل ۱-۶- پ - تغییرات V_{ds} با زمان.



شکل ۱-۶-ت - تغییرات i_m با زمان.

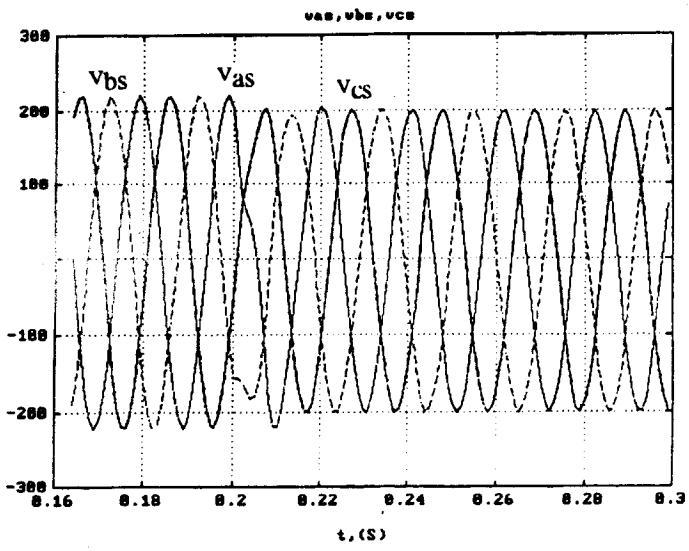


شکل ۱-۶-ث - تغییرات L_m با زمان.

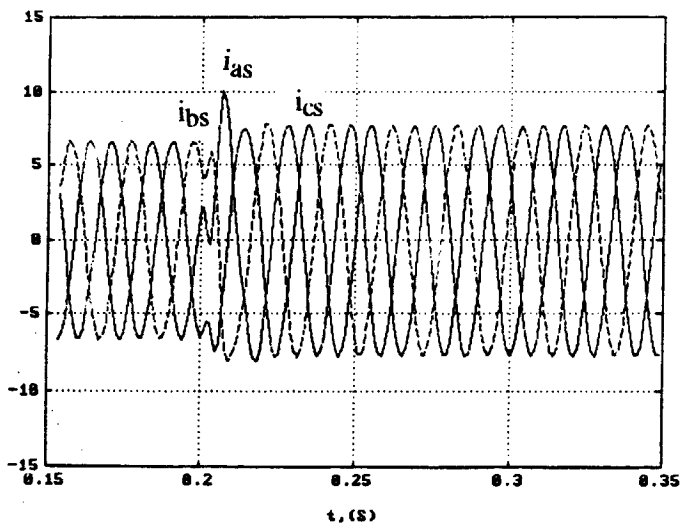


شکل ۲-۶-ز - تغییر جریانها و ولتاژهای استاتور و جریان روتور بهنگام اضافه شدن ناگهانی بار $R=27\Omega$.

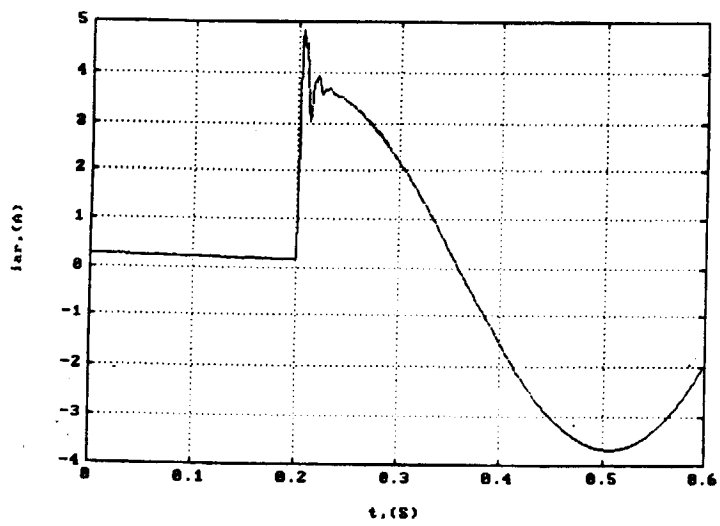
شکل ۲-۶-الف - تغییرات V_{as} با زمان.



شکل ۶-۲-ب - تغییرات V_{cs} , V_{bs} , V_{as} با زمان.



شکل ۶-۲-پ - تغییرات i_{cs} , i_{bs} , i_{as} با زمان.



شکل ۶-۲-ت - تغییرات i_{ar} با زمان.

شکل (۶-۲) حالت‌های گذرای بوجود آمده در i_{as} ، V_{as} و i_{ar} را نشان می‌دهد. در اینجا بد نیست به این موضوع اشاره شود که اختلاف نتایج عملی با نتایج کامپیوتری بطور عمده ناشی از دو عامل خواهد بود:

- I - وجود جریانهای گردابی در هسته آهن.
 - II - عدم اتصال همزمان بار ستاره به سه فاز ژنراتور.
- بنابراین بخاطر عوامل فوق تفاوتی در نتایج عملی و تئوری وجود خواهد داشت.

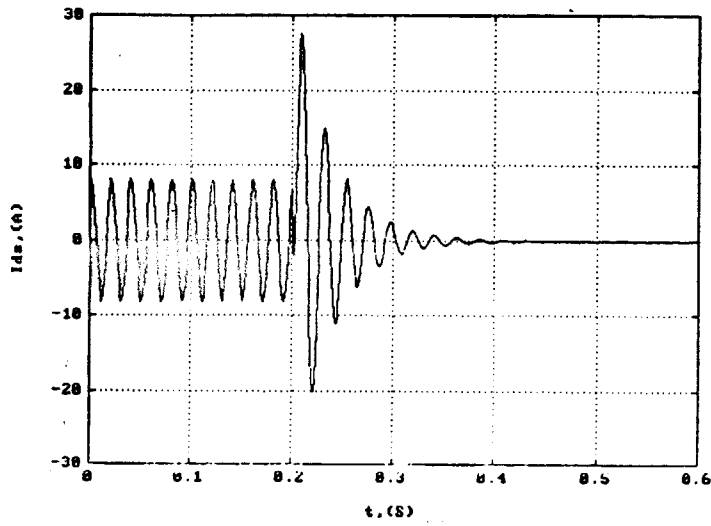
۶-۲ - اتصال کوتاه سه فاز متقارن

برای اتصال کوتاه سه فاز متقارن در لحظه وقوع خطا و بعد از آن داریم:

$$V_{as} = V_{bs} = V_{cs} = 0 \Rightarrow V_{ds} = 0, V_{qs} = 0 \quad (6-1)$$

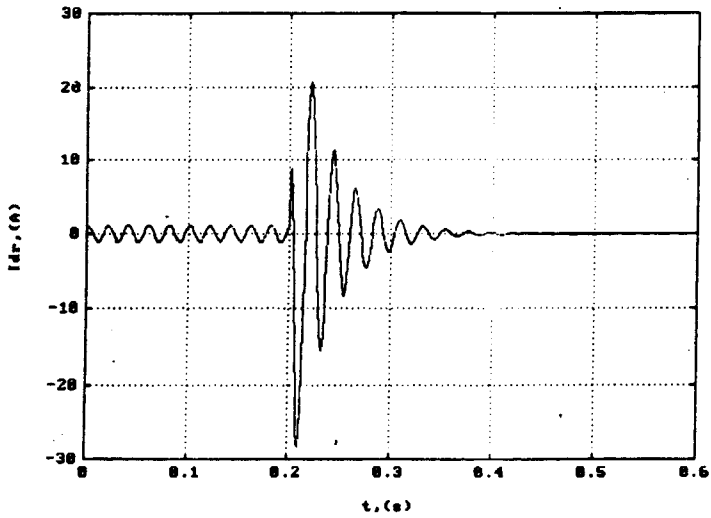
شکل‌های (۶-۳) و (۶-۴) نتایج شبیه سازی جریانها، ولتاژها، سرعت روتور، گشتاور مغناطیسی و توان حقیقی ژنراتور القایی را نشان می‌دهد. از شکل (۵-۳) مشاهده می‌شود که بعد از وقوع اتصال کوتاه دامنه جریانهای i_{ds} و i_{dr} شدیداً افزایش یافته و در طی $0/2$ ثانیه به صفر میل می‌کنند. ولتاژ V_{ds} نیز بعد از افزایش کمی در همان مدت زمان صفر می‌گردد.

توجه شود که در شبیه سازی فوق فرض بر این است که بعد از لحظه وقوع اتصال کوتاه، گشتاور اعمالی از طرف محرک در مقدار ماندگار یعنی $T_m = 0/0348 \text{ Nm}$ باقی بماند. بنابراین باید معادله مکانیکی گشتاور در بلوک دیاگرام شکل (۴-۹) در نظر گرفته شود و در هر فاصله زمانی Δt سرعت ω_r مربوطه محاسبه گردد. همانطوریکه از شکل (۶-۳) ملاحظه می‌شود سرعت ابتدا تغییر زیادی پیدا می‌کند ولی بتدریج با گذشت زمان نرخ رشد آن کمتر می‌گردد. گشتاور T_e به جهت تغییرات سریع جریانها، نوسانات گذرای

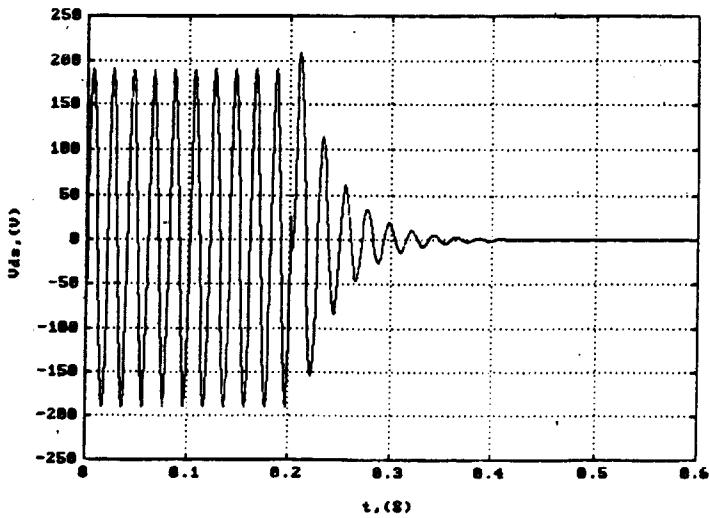


شکل ۳-۶- تغییر کمیات V_{ds} , i_{dr} , i_{ds} و ω_r , T_e بهنگام وقوع اتصال کوتاه سه فاز متقارن.

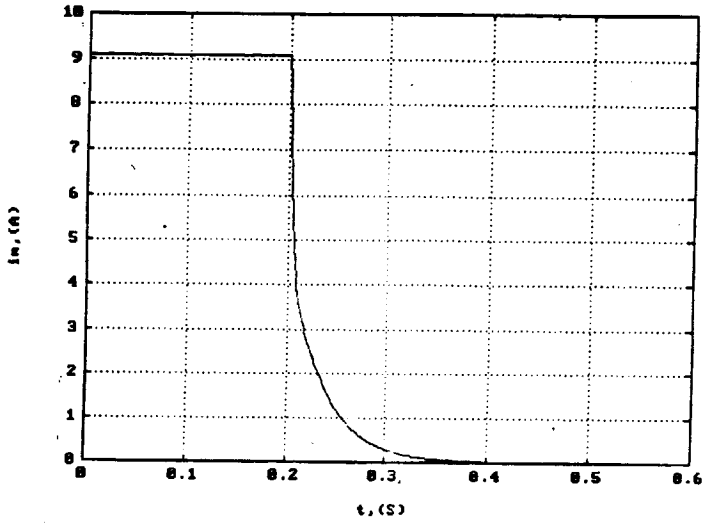
شکل ۳-۶- الف - تغییرات I_{ds} با زمان.



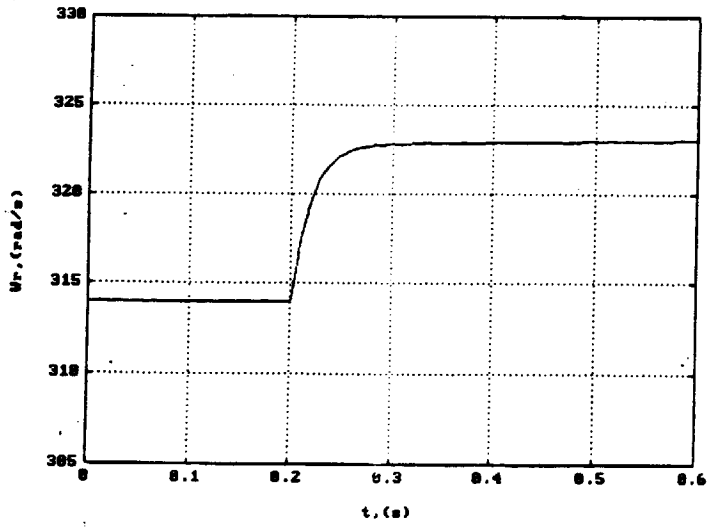
شکل ۳-۶- ب - تغییرات I_{dr} با زمان.



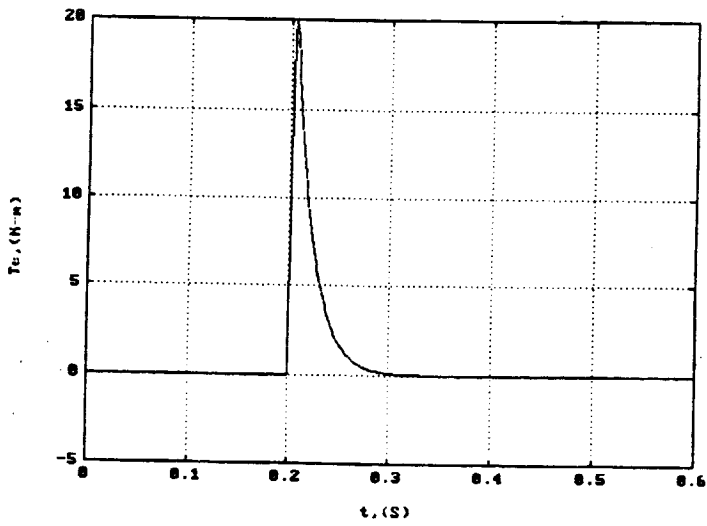
شکل ۳-۶- پ - تغییرات V_{ds} با زمان.



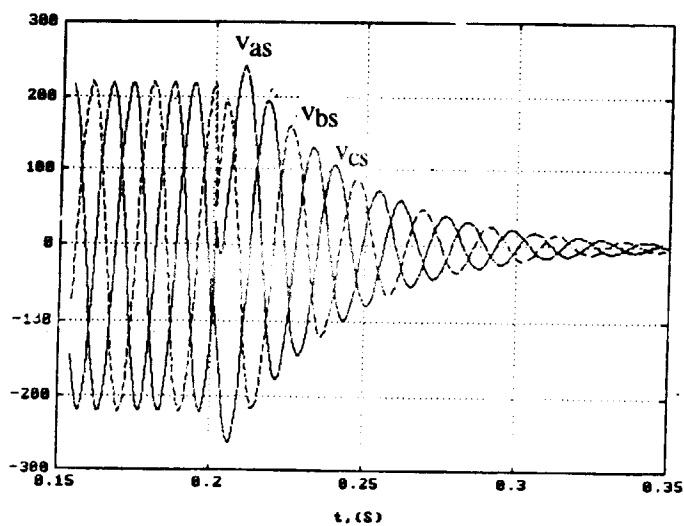
شکل ۳-۶-ت - تغییرات i_m با زمان.



شکل ۳-۶-ث - تغییرات ω_r با زمان.

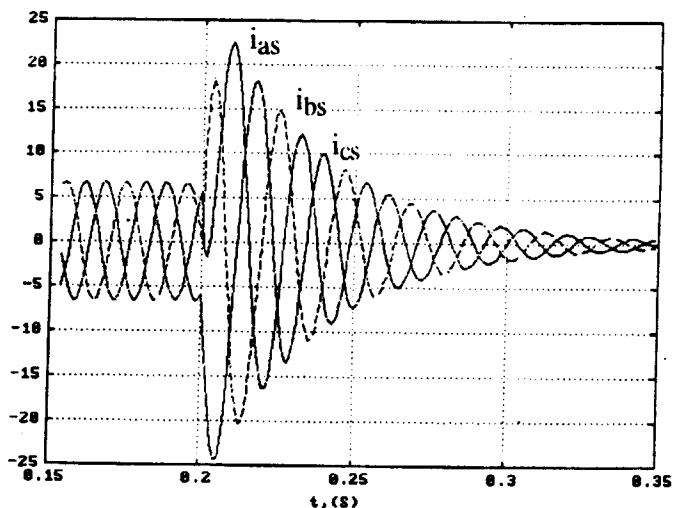


شکل ۳-۶-ج - تغییرات T_e با زمان.

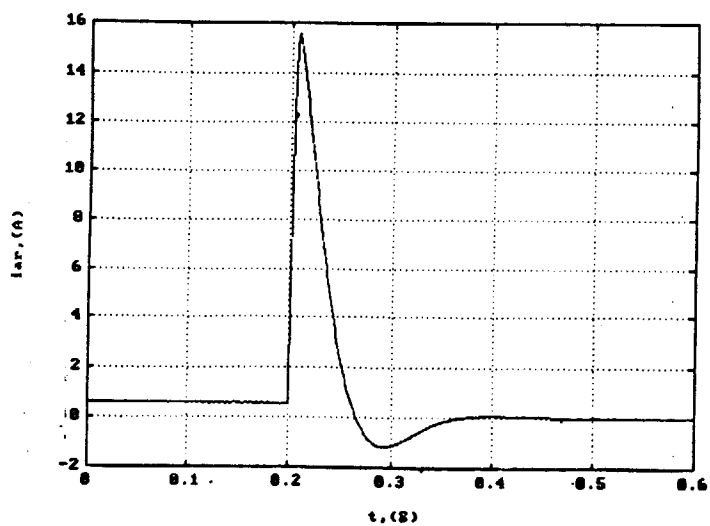


شکل ۶-۴- تغییر جریانها و ولتاژهای استاتور و جریان روتور بهنگام وقوع اتصال کوتاه سرفاز متقارن.

شکل ۶-۴- الف - تغییرات V_{cs} ، V_{bs} ، V_{as} با زمان.



شکل ۶-۴- ب - تغییرات i_{cs} ، i_{bs} ، i_{as} با زمان.



شکل ۶-۴- پ - تغییرات i_{ar} با زمان.

بزرگی تولید می‌کند و بعلت مثبت بودن، با جهت گردش روتور مخالف می‌کند. پس در لحظات بعد از اتصال ماشین قبل از شتاب گرفتن، آهسته می‌شود. این مسئله را در ژنراتور سنکرون نوسان برگشتی^(۱) می‌نامند.

شکل (۴-۶) تغییرات جریانها و ولتاژ سه فاز استاتور و i_{ar} را نشان می‌دهد. همانطوریکه ملاحظه می‌شود جریانهای استاتور در حالت گذرا به دو تا سه برابر مقدار نامی می‌رسند که می‌تواند از نظر حرارتی مشکلاتی را بوجود آورد. جریان روتور نیز بهنگام اتصال کوتاه فوق العاده زیاد شده ولی در مدت زمان کوتاهی به مقادیر پایین نیز کاهش می‌یابد. توان حقیقی P نیز بعد از اتصال کوتاه صفر می‌گردد در حالیکه T_e دارای نوساناتی است.

از شکلهای فوق نتیجه می‌شود که بعد از پریرود کوتاه گذرا، جریانها و گشتاور به صفر میل کرده و ژنراتور تحریک خود را از دست می‌دهد. به عبارت دیگر می‌توان گفت ژنراتور القایی دارای اتصال کوتاه سه فاز پایداری خودش را از دست خواهد داد.

۳-۶ - اتصال کوتاه دوفاز

برای اتصال کوتاه بوجود آمده روی دو فاز b و c داریم:

$$V_{bs} = V_{cs} \quad (۶-۲)$$

$$V_{as} + V_{bs} + V_{cs} = 0 \quad ; \quad i_{os} = 0 \quad , \quad V_{os} = 0 \quad \text{و چون}$$

پس می‌توان نتیجه گرفت:

$$V_{bs} = V_{cs} = -\frac{1}{2}V_{as} \Rightarrow V_{abcs} = [V_{as} \quad -\frac{1}{2}V_{as} \quad -\frac{1}{2}V_{as}]^T \quad (۶-۳)$$

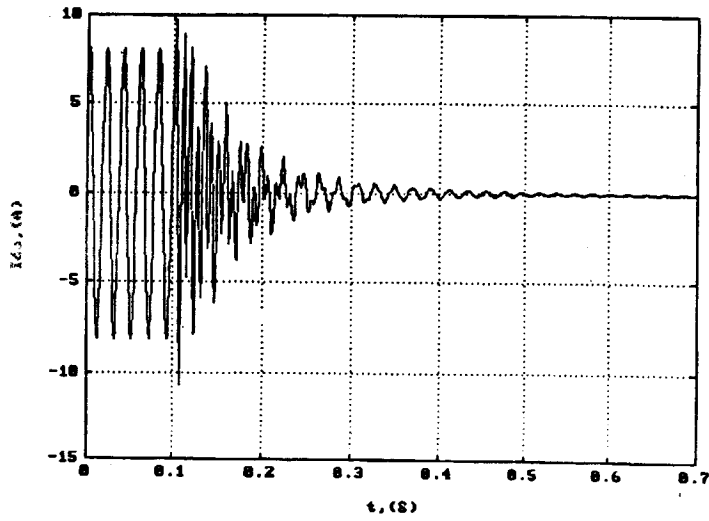
با تبدیل بردار ولتاژ V_{abcs} خواهیم داشت:

$$V_{odqs} = [0 \quad \left(\frac{3}{2}\right)^{1/2} V_{as} \quad 0]^T$$

۱- Backswing

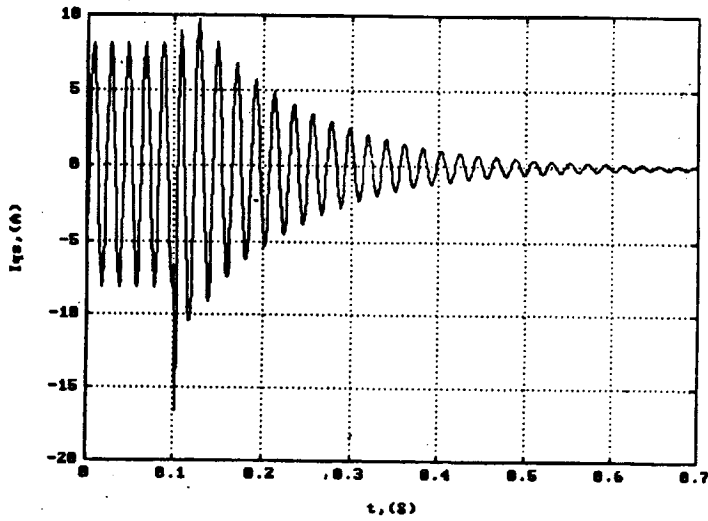
بنابراین برای اعمال شرایط فوق نسبت به حالت ماندگار کافی است که در زمان اتصال کوتاه و بعد از آن $V_{qs} = 0$ قرار داده شود. شکل‌های (۵-۶) و (۶-۶) نتایج شبیه سازی را نشان می‌دهد. بعلت عدم تقارن در شرایط اتصال کوتاه، شکل موجهای جریانها و ولتاژهای محور d و q متفاوت بوده و همه آنها در شکل (۵-۶) آورده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود تغییرات در محور d شدیدتر از محور q می‌باشد.

شکل (۶-۶) شامل تغییرات i_m ، ω_r ، T_e ، جریانها و ولتاژهای سه فاز استاتور و i_{ar} می‌باشد. جریان مغناطیس کننده i_m در پریرودگذرا نوساناتی داشته و نهایتاً به صفر می‌رسد. ولی درست بعد از وقوع اتصال کوتاه مقدار بیشتری از حالت ماندگار پیدا می‌کند. در اینجا نیز گشتاور مغناطیسی در طول اغتشاش در مقدار حالت ماندگار ثابت نگه داشته می‌شود. تغییرات سرعت در این شکل توجه شود می‌بینیم که سرعت با نرخ کمتری نسبت به اتصال کوتاه سه فاز افزایش می‌یابد. در رابطه با جریانها توجه شود که جریان اتصال کوتاه i_{bs} سریعاً به صفر نرسیده و برای چند سیکل با i_{cs} مخالفت می‌کند. جریان روتور هم دارای نوساناتی است که نسبت به حالت اتصال کوتاه سه فاز نیز می‌باشد. ولی در کل دامنه جریانها در پریرودگذرا کمتر از حالت سه فاز است. گشتاور الکترومغناطیسی و توان حقیقی نیز دارای نوساناتی هستند که بتدریج به صفر میل می‌کند.

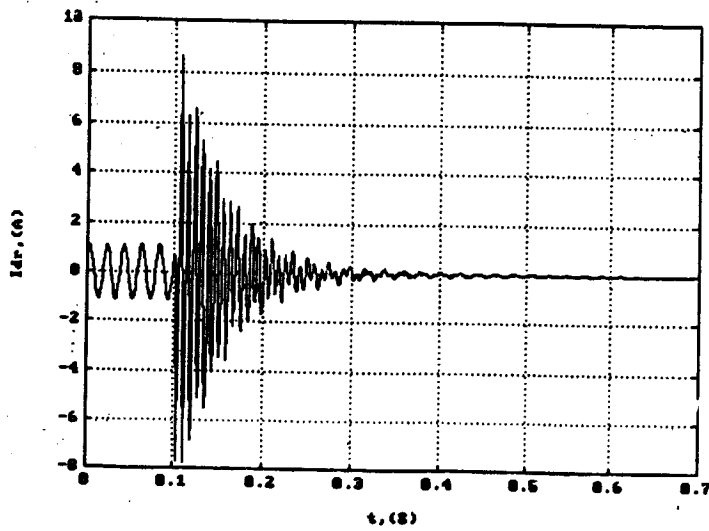


شکل ۶-۵- تغییر کمیات i_{qr} , i_{dr} , i_{qs} , i_{ds} بهنگام وقوع اتصال کوتاه دوفاز.

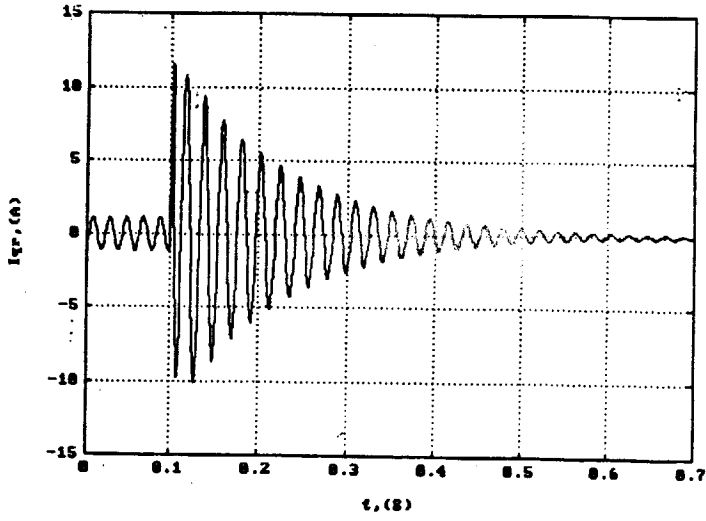
شکل ۶-۵- الف - تغییرات i_{ds} با زمان.



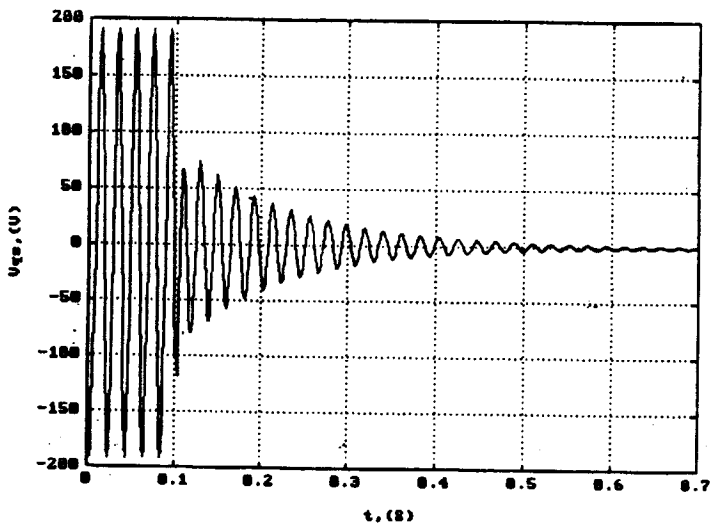
شکل ۶-۵- ب - تغییرات i_{qs} با زمان.



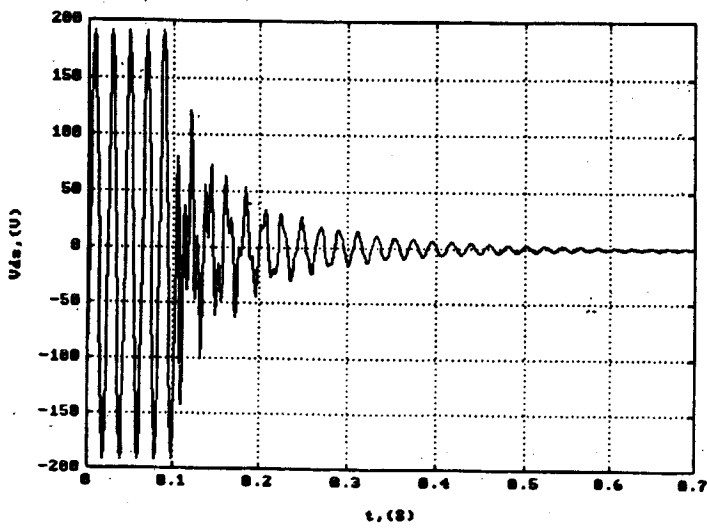
شکل ۶-۵- پ - تغییرات i_{dr} با زمان.



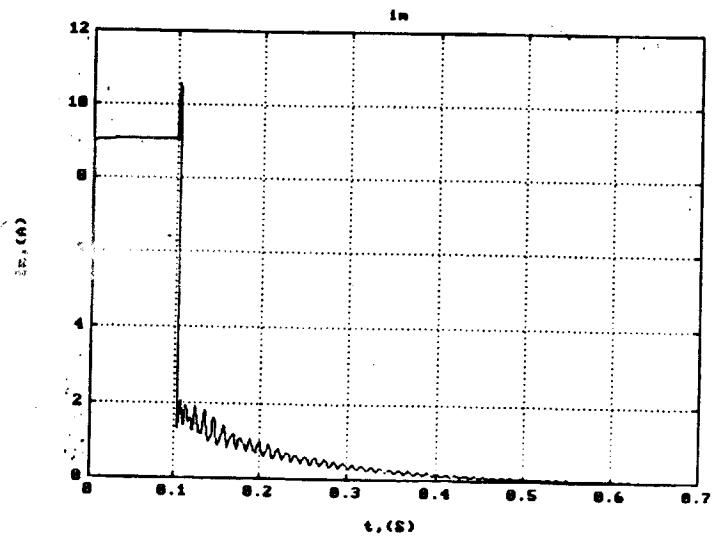
شکل ۶-۵-ت - تغییرات i_{qr} با زمان.



شکل ۶-۵-ث - تغییرات V_{qs} با زمان.

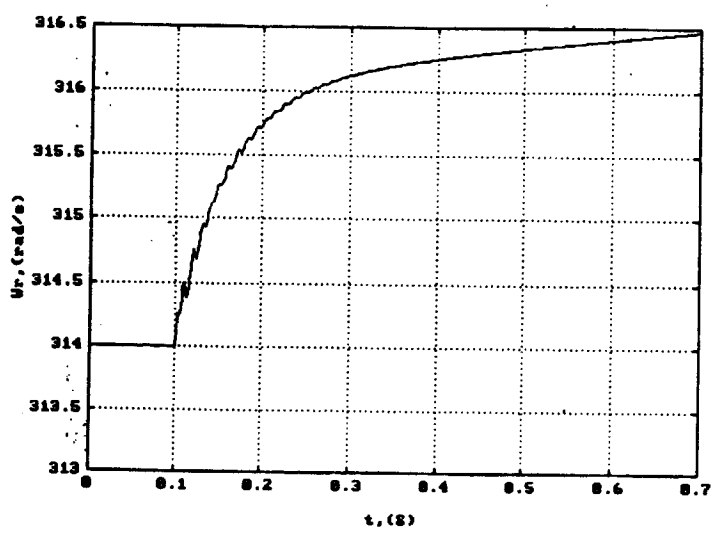


شکل ۶-۵-ج - تغییرات V_{ds} با زمان.

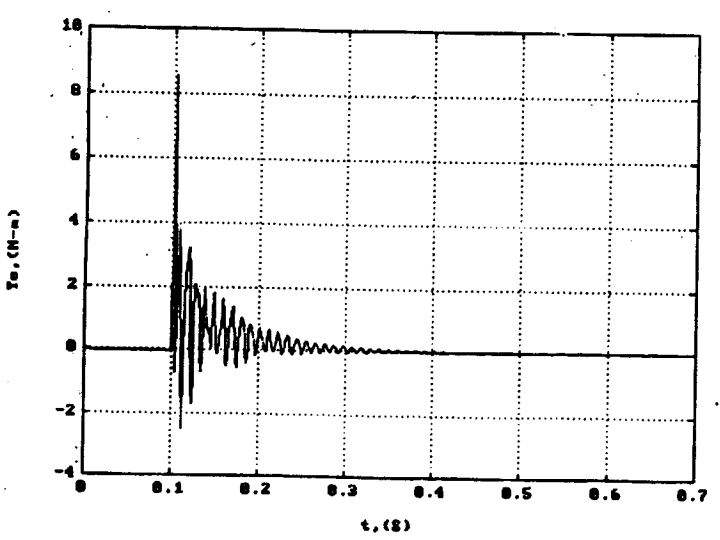


شکل ۶-۶- تغییرات کمیاب T_e ، ω_r ، i_m جریانهای ولتاژهای سه فاز استاتور و i_{ar} بهنگام وقوع اتصال کوتاه دو فاز.

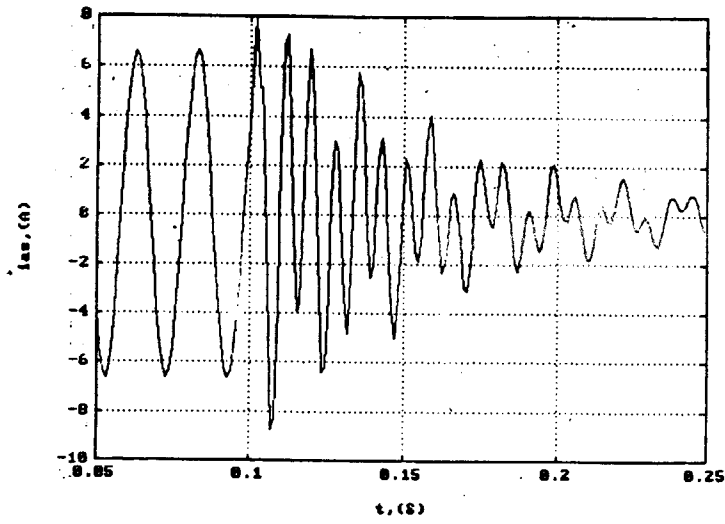
شکل ۶-۶- الف - تغییرات i_m با زمان.



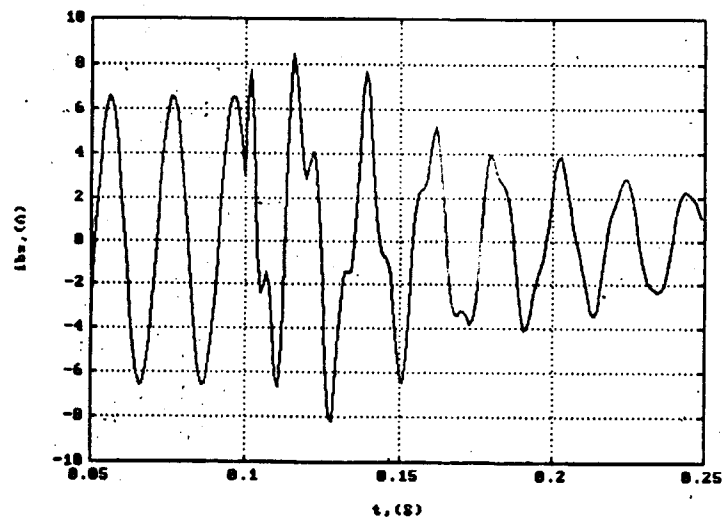
شکل ۶-۶- ب - تغییرات ω_r با زمان.



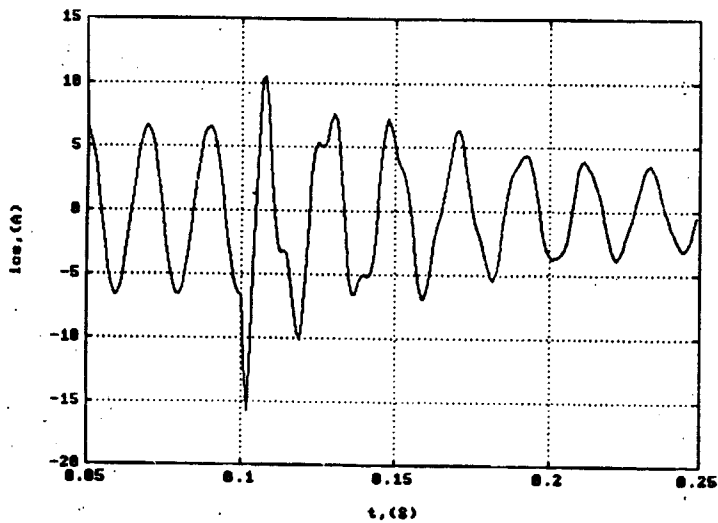
شکل ۶-۶- پ - تغییرات T_e با زمان.



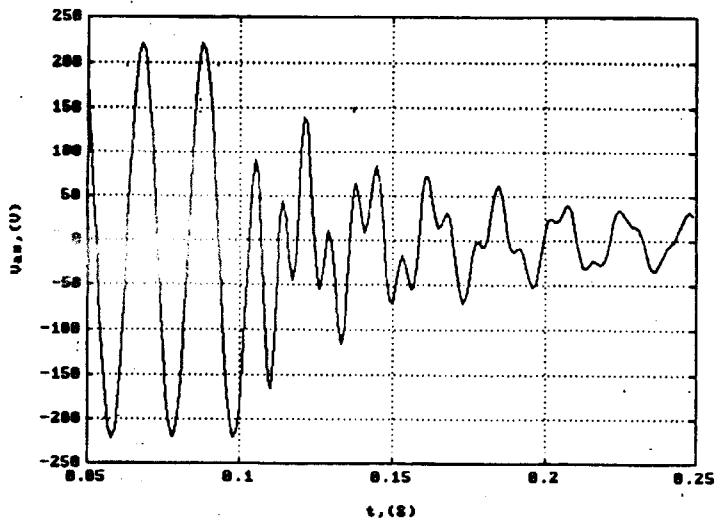
شکل ۶-۶-ت - تغییرات i_{as} با زمان.



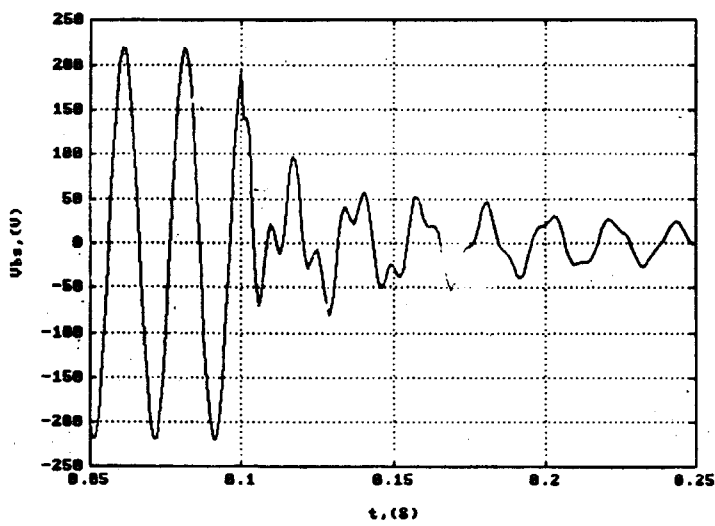
شکل ۶-۶-ث - تغییرات i_{bs} با زمان.



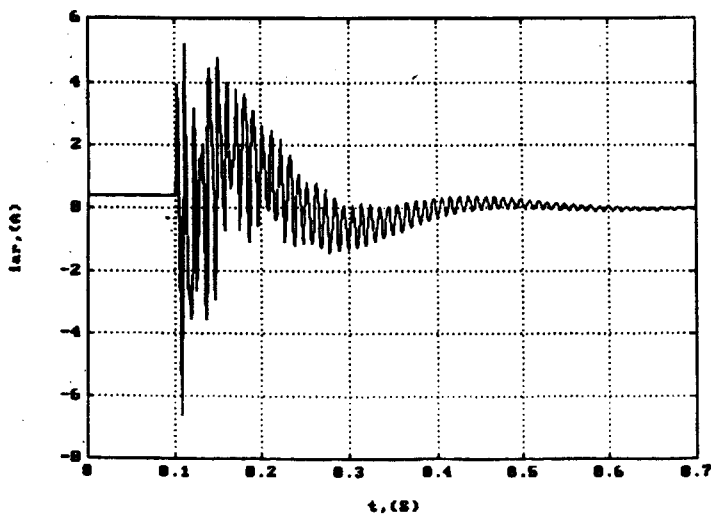
شکل ۶-۶-ج - تغییرات i_{cs} با زمان.



شکل ۶-۶-ج - تغییرات V_{bs} با زمان.



شکل ۶-۶-خ - تغییرات V_{bs} با زمان.



شکل ۶-۶-ح - تغییرات I_{ar} با زمان.

۶-۴ - اتصال کوتاه دوفاز به زمین

برای اتصال کوتاه دوفاز d و c به زمین داریم:

$$V_{bs} = V_{cs} = 0 \Rightarrow V_{abcs} = [V_{as} \quad 0 \quad 0]^T \quad (۶-۴)$$

با تبدیل بردار ولتاژ V_{abcs} خواهیم داشت:

$$V_{odqs} = \left[\frac{V_{as}}{\left(\frac{2}{3}\right)^{1/2}} \quad \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} V_{as} \quad 0 \right]^T$$

بنابراین در اعمال شرایط فوق نسبت به حالت ماندگار کافی است در زمان اتصال

کوتاه و بعد از آن $V_{qs} = 0$ و $V_{ds} = \left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} V_{as}$ قرار داده شود.

نتایج این شبیه سازی بسیار نزدیک به حالت قبل است. شکل‌های (۶-۷) و (۶-۸)

این نتایج را نشان می‌دهند. در اینجا نیز بعلاوه عدم تقارن در شرایط اتصال کوتاه شکل

موجهای جریانها و ولتاژهای محور d و q در شکل (۶-۷) آورده شده است. با توجه به این

شکل می‌توان گفت که تغییرات گذرا در محور d شدیدتر از محور q است.

شکل (۶-۸) شامل تغییرات i ، ω_r ، T_e ، جریانها و ولتاژهای سه فاز استاتور، i_{ar}

می‌باشد. جریان مغناطیس کننده i_m در پریرود گذرا نوساناتی داشته ولی دامنه نوسانات

کمتر از حالت قبل است و مقدار ماکزیمم بعد از اتصال کوتاه نیز کمتر می‌باشد. در اینجا نیز

گشتاور مکانیکی در مقدار $T_m = 0 / 348 \text{ Nm}$ در طول اغتشاش نگه داشته می‌شود. بنابراین

تغییرات ω_r را می‌توان بدست آورد. همانطوریکه از شکل (۶-۸) معلوم است نرخ

تغییرات ω_r در این حالت بیشتر از حالت قبلی می‌باشد. گشتاور الکترومغناطیسی نیز در

مدت گذرا دارای نوساناتی است که شدیدتر از حالت قبل می‌باشد

تغییرات جریانهای سه فاز استاتور نشان می‌دهد که دامنه i_{cs} بعد از اتصال کوتاه

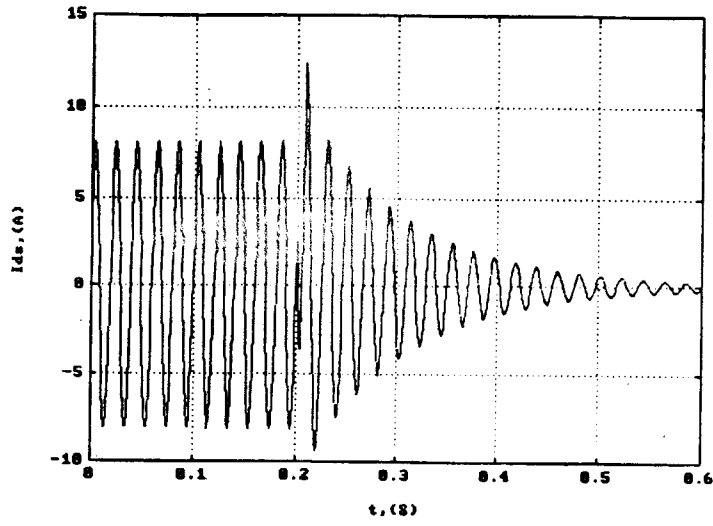
بیشتر از سایر فازها است. ولی توجه نمایید که جریان لحظه‌ای بستگی به زاویه اتصال کوتاه

دارد. بنابراین ماکزیمم مقدار جریانهای اتصال کوتاه مشاهده شده کاملاً قطعی نیست.

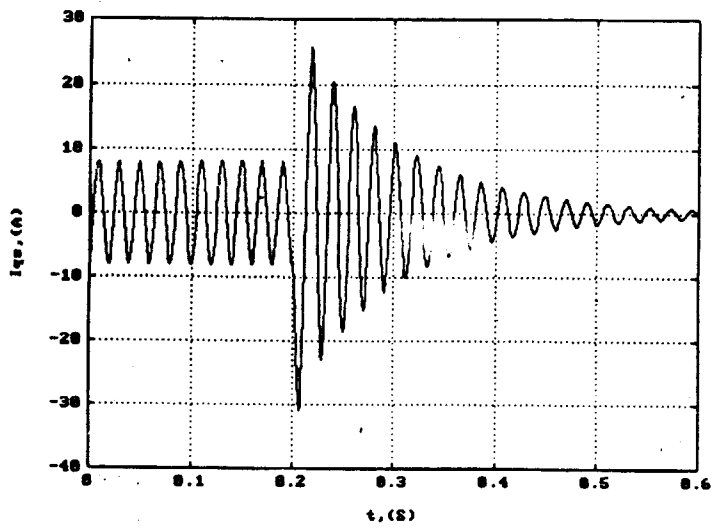
همچنین این شکل نوسانات i_{ar} ، T_e تبر حسب ω_r جهت مطالعه بیشتر آورده شده

است.

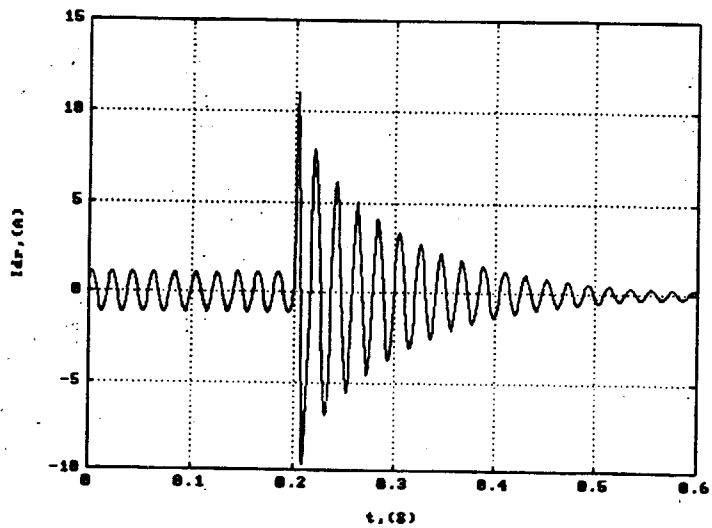
شکل ۶-۷- تغییر کمیات i_{qr} ، i_{dr} ، i_{qs} ، i_{ds} دو فاز به زمین. V_{qs} ، V_{ds} بهنگام وقوع اتصال کوتاه



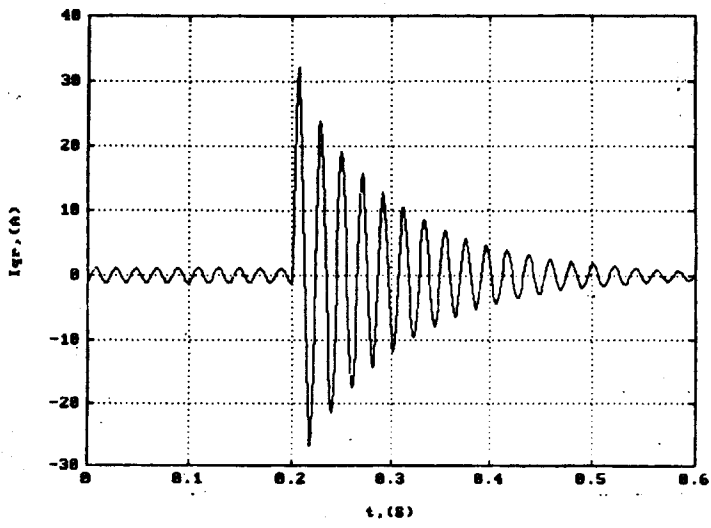
شکل ۶-۷- الف - تغییرات i_{ds} با زمان.



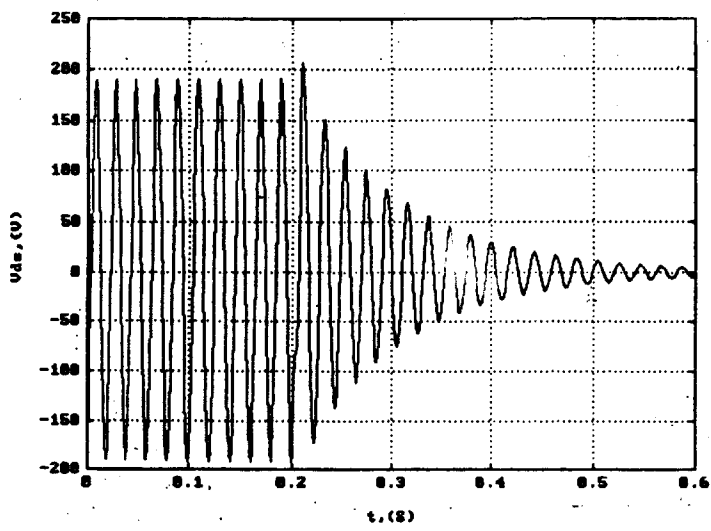
شکل ۶-۷- ب - تغییرات i_{qs} با زمان.



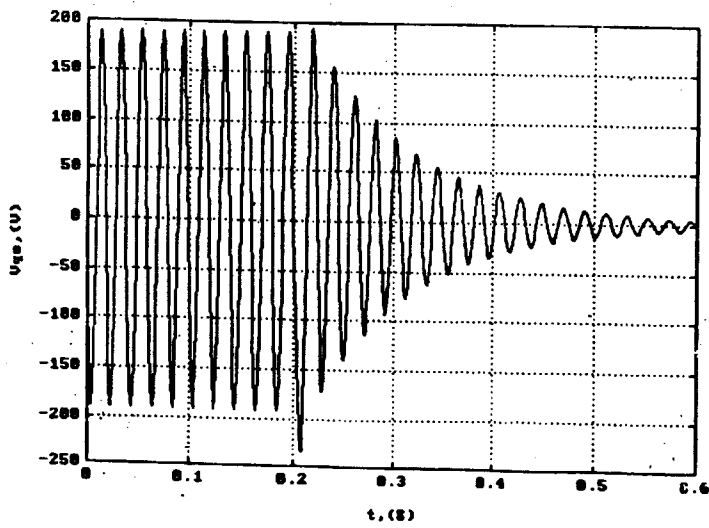
شکل ۶-۷- پ - تغییرات i_{dr} با زمان.



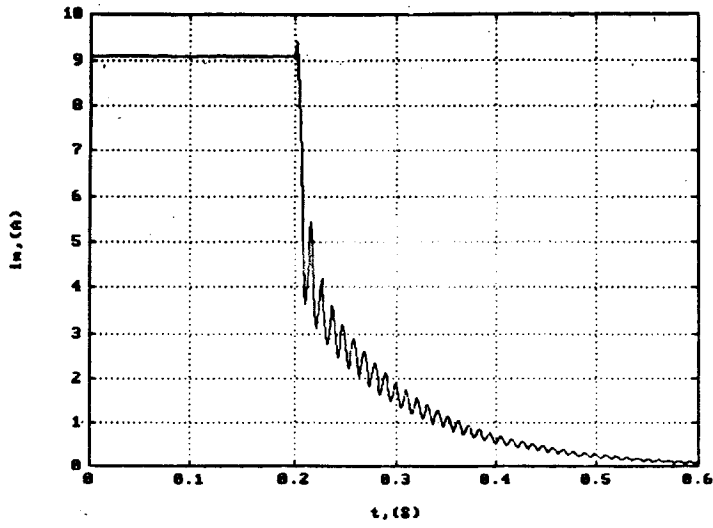
شکل ۶-۷-ت - تغییرات i_{qr} با زمان.



شکل ۶-۷-ث - تغییرات V_{ds} با زمان.

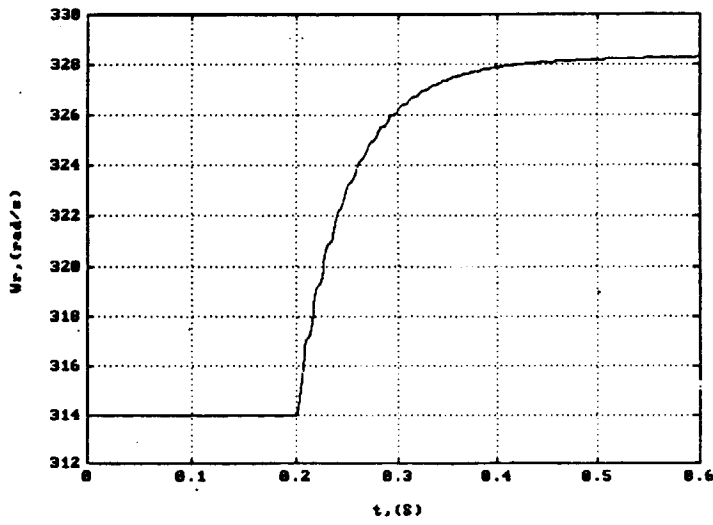


شکل ۶-۷-ج - تغییرات V_{qs} با زمان.

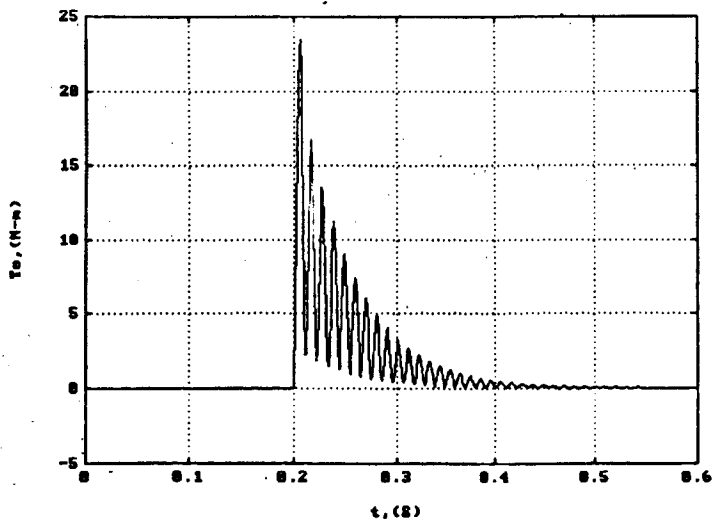


شکل ۶-۸ - تغییر i_m ، ω_r ، T_e ، جریان‌ها و ولتاژهای استاتور و جریان i_{ar} .

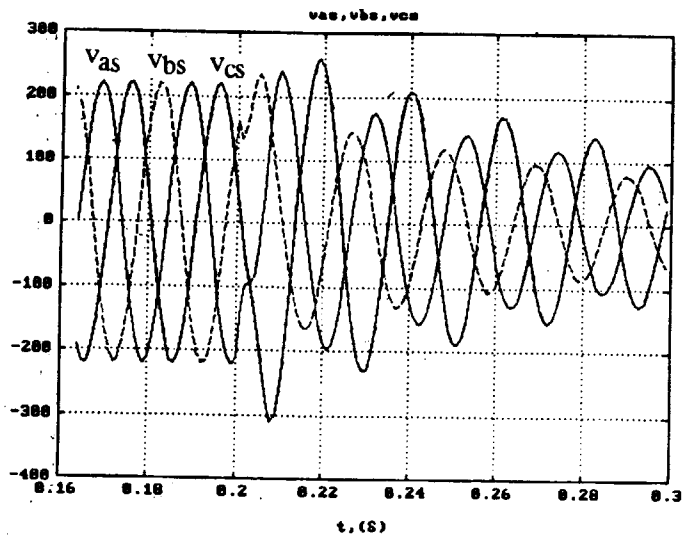
شکل ۶-۸-الف - تغییرات i_m با زمان.



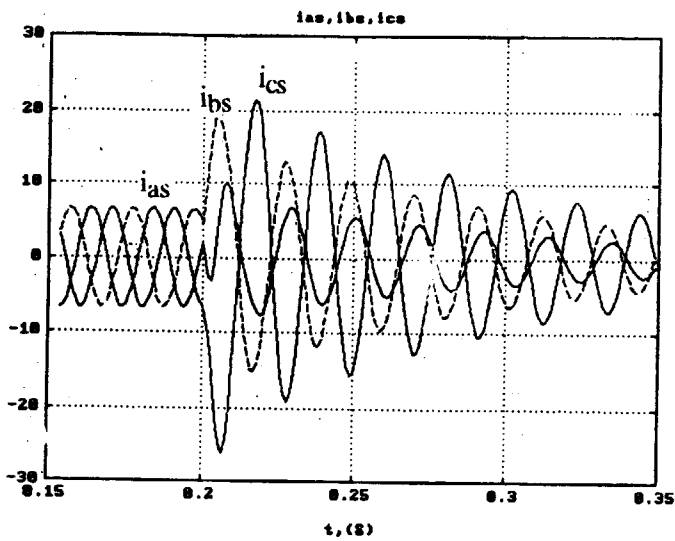
شکل ۶-۸-ب - تغییرات ω_r با زمان.



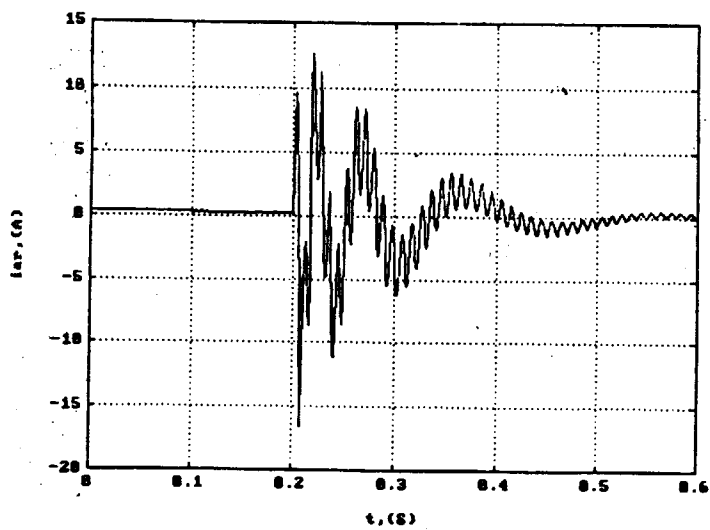
شکل ۶-۸-پ - تغییرات T_e با زمان.



شکل ۶-۸-ت - تغییرات v_{cs}, v_{bs}, v_{as} بازمان.



شکل ۶-۸-ث - تغییرات i_{cs}, i_{as}, i_{bs} بازمان.



شکل ۶-۸-ج - تغییرات i_{ar} بازمان.

۵-۶ - اتصال کوتاه یک فاز به زمین

برای اتصال کوتاه تک فاز a داریم:

$$V_{as} = 0$$

در اینصورت:

$$V_{bs} = -V_{cs} \Rightarrow V_{abcs} = [0 \quad V_{bs} \quad -V_{bs}]^T \quad (6-5)$$

با تبدیل بردار ولتاژ V_{abcs} خواهیم داشت:

$$V_{odqs} = [0 \quad 0 \quad -\sqrt{2}V_{bs}]^T$$

بنابراین در اعمال شرایط فوق نسبت به حالت ماندگار کافی است که در زمان اتصال کوتاه و بعد از آن $V_{ds} = 0$ قرار داده شود.

شکل‌های (۹-۶) و (۱۰-۶) نتایج شبیه سازی را نشان می‌دهند. در اینجا نیز مثل

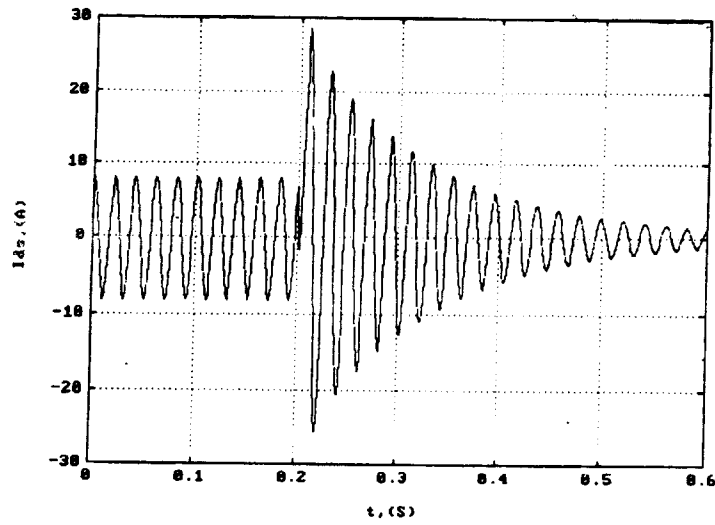
بخش ۳-۶ بعلت عدم تقارن در شرایط اتصال کوتاه شکل موجهای محوره‌های d و q متفاوتند. از این رو تمامی آنها در شکل (۹-۶) آورده شده است. درست بر خلاف اتصال کوتاه دو فاز در اینجا تغییرات در محور q شدیدتر می‌باشد.

شکل (۱۰-۶) شامل شکل موجهای گذرای i_m ، ω_r ، T_e جریانه‌ها و ولتاژهای سه فاز

استاتور و i_{ar} می‌باشد. همانطوریکه ملاحظه می‌شود i_m دارای نوساناتی است که شدیدتر از حالت اتصال کوتاه سه فاز متقارن و دو فاز می‌باشد. گشتاور الکترومغناطیسی نیز دارای نوساناتی است. با مقایسه نتایج T_e در چند حالت فوق می‌توان نتیجه گرفت که هرچه عدم تقارن در شرایط بیشتر شود تغییرات و نوسانات در T_e افزایش می‌یابد.

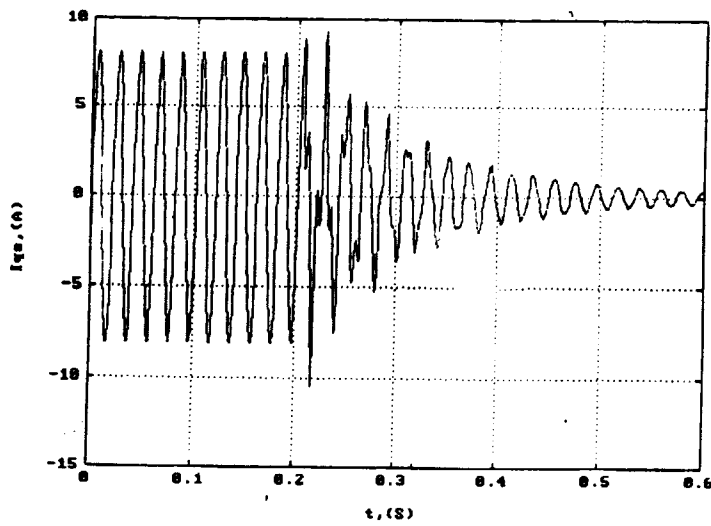
نحوه تغییرات جریانه‌ها و ولتاژهای سه فاز استاتور و جریان i_{ar} را نیز می‌توان در

(۱۰-۶) مشاهده نمود.

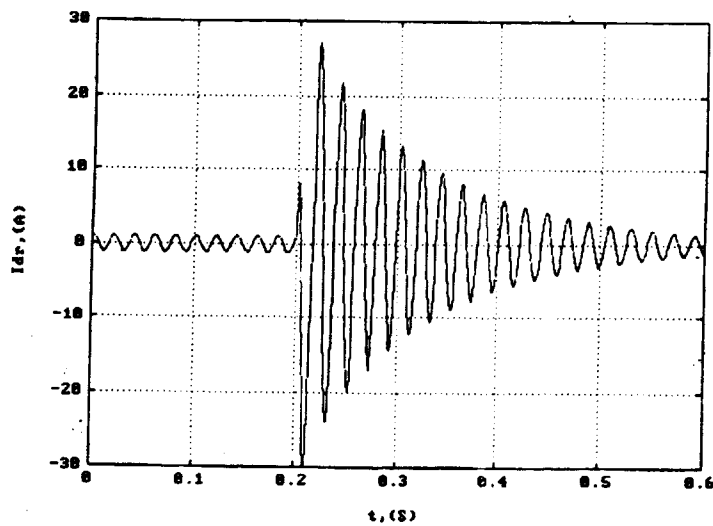


شکل ۶-۹- تغییرات کمیات i_{qr} , i_{dr} , i_{qs} , i_{ds} تک فازیه زمین. V_{qs} , V_{ds} بهنگام وقوع اتصال کوتاه

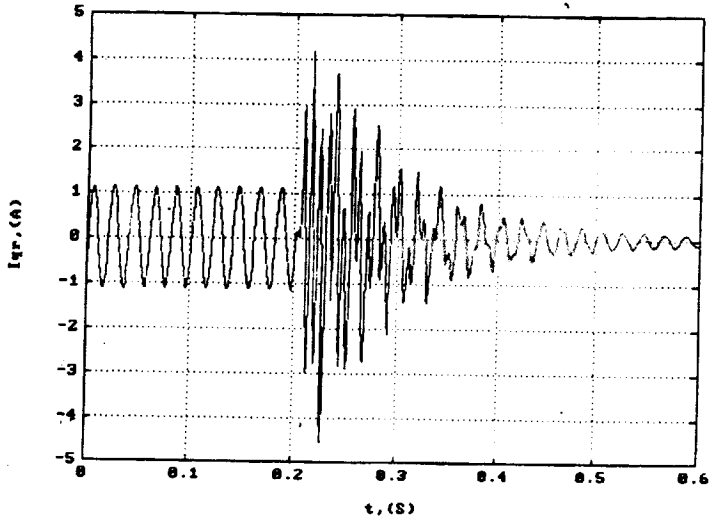
شکل ۶-۹- الف - تغییرات i_{ds} با زمان.



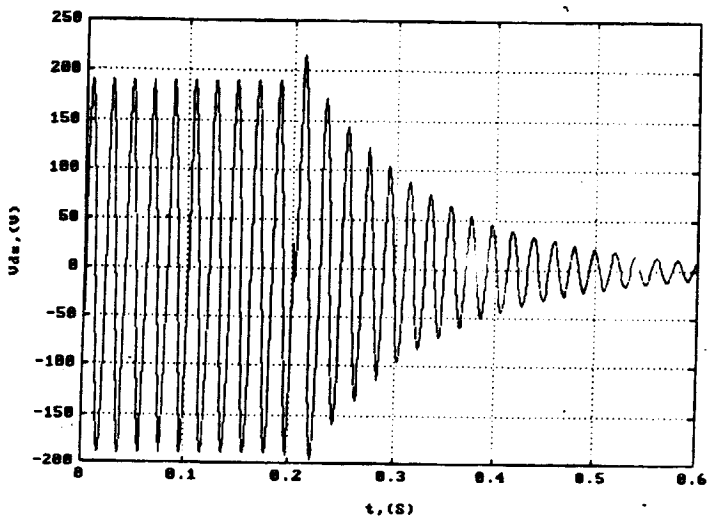
شکل ۶-۹- ب - تغییرات i_{qs} با زمان.



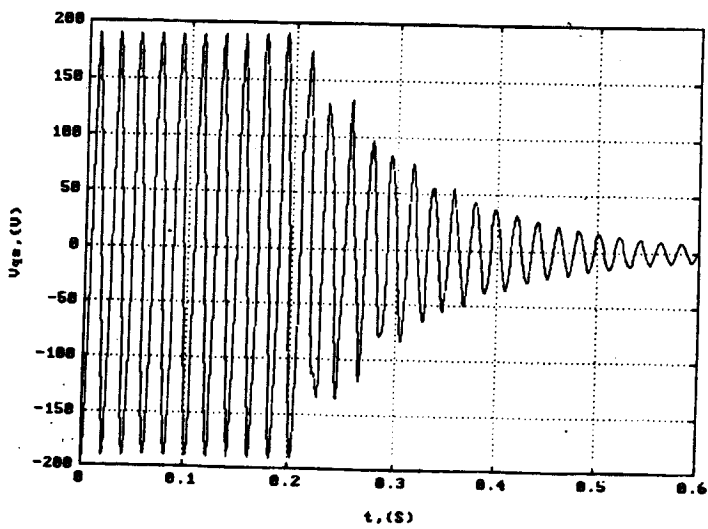
شکل ۶-۹- پ - تغییرات i_{dr} با زمان.



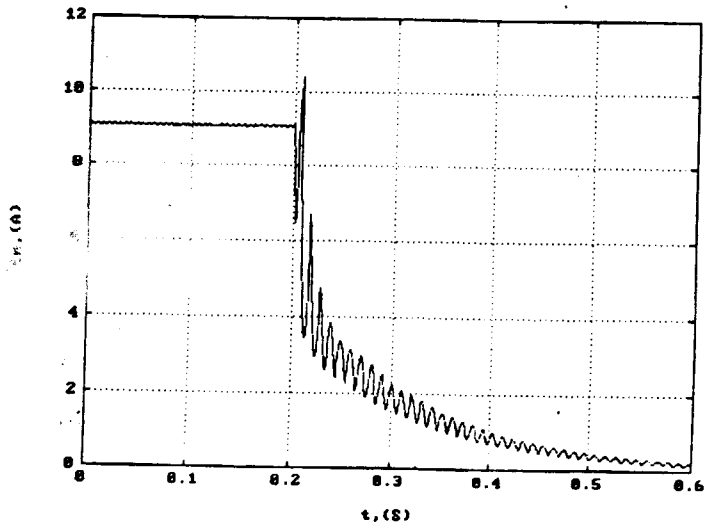
شکل ۶-۹-ت - تغییرات I_{qr} با زمان.



شکل ۶-۹-ث - تغییرات V_{ds} با زمان

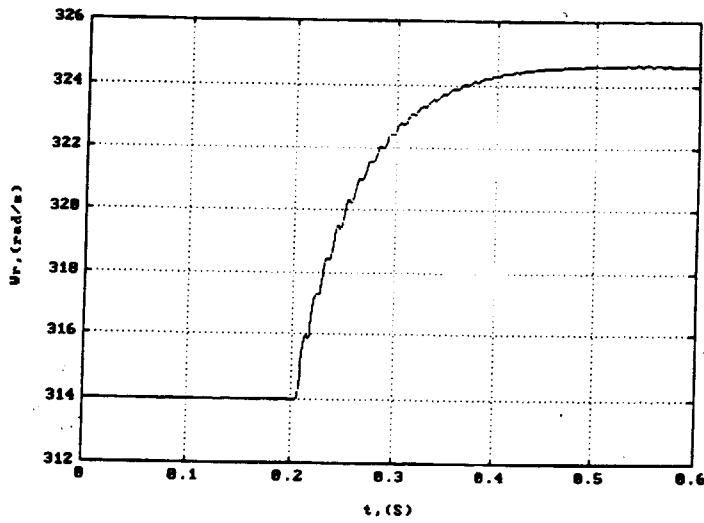


شکل ۶-۹-ج - تغییرات V_{qs} با زمان

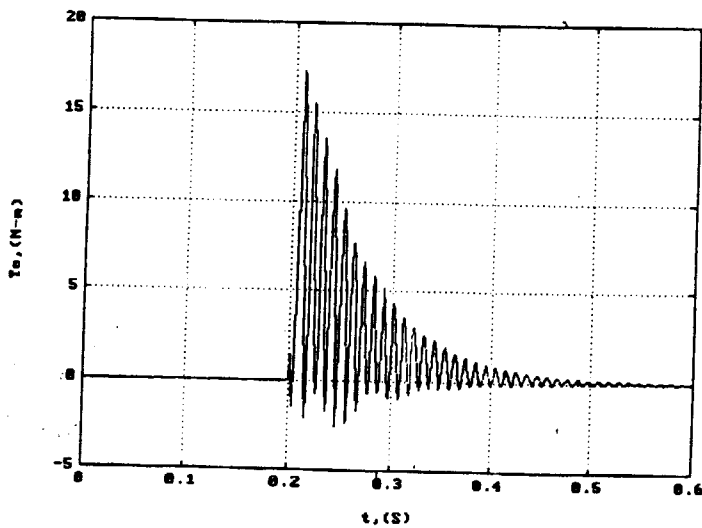


شکل ۱۰-۶- تغییر i_m ، ω_r ، T_e ، جریانها و ولتاژهای استاتور و جریان i_r .

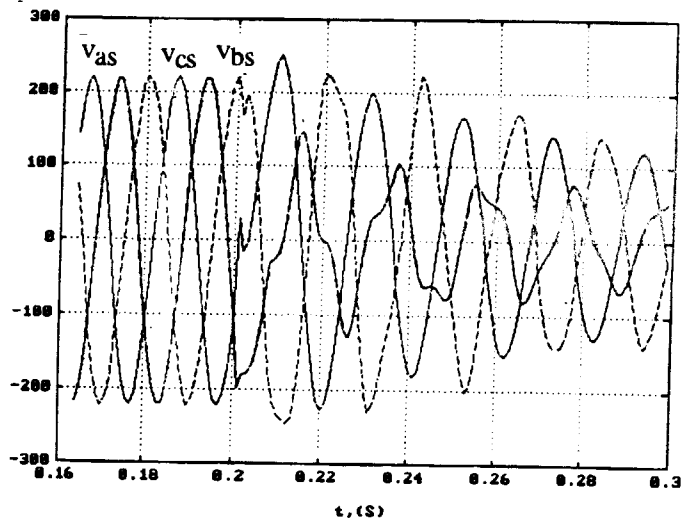
شکل ۱۰-۶- الف - تغییرات i_m با زمان.



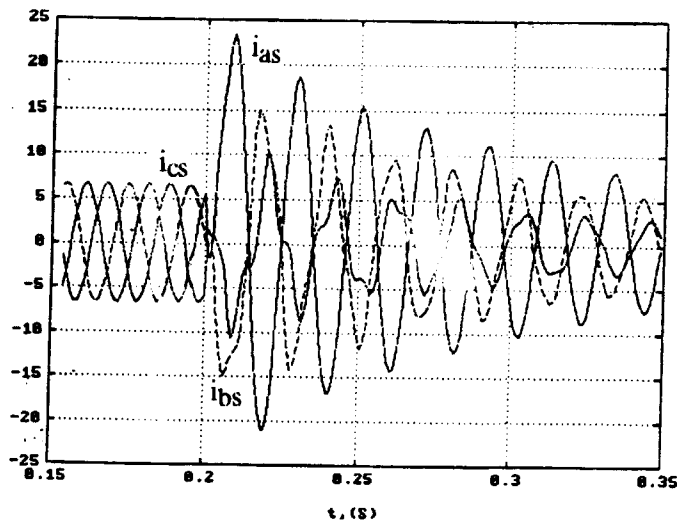
شکل ۱۰-۶- ب - تغییرات ω_r با زمان.



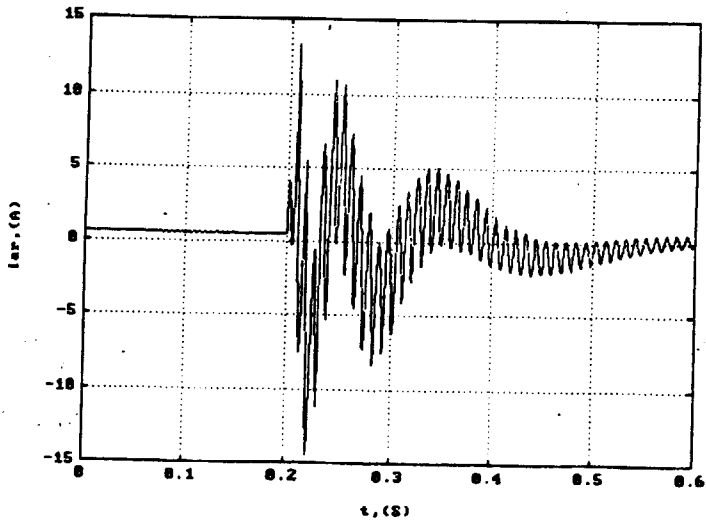
شکل ۱۰-۶- پ - تغییرات T_e با زمان



شکل ۶-۱۰-ت - تغییرات V_{cs} , V_{bs} , V_{as} بازمان.



شکل ۶-۱۰-ث - تغییرات i_{cs} , i_{as} , i_{bs} بازمان.



شکل ۶-۱۰-ج - تغییرات i_{ar} بازمان.

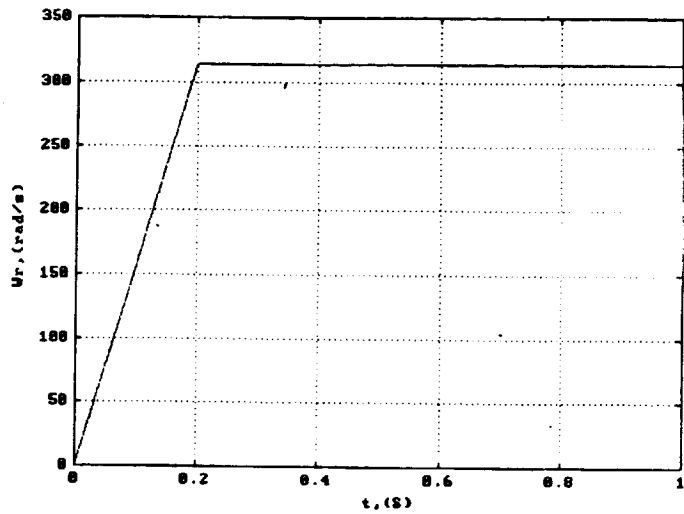
۶-۶ - اثر شتاب روتور بر روی پدیده تحریک خودی

چنانکه در قسمت ۳-۳ توضیح داده شد، شتاب روتور می‌تواند روی تحریک خودی اثر زیادی داشته باشد و منجر به خاصیت ضد مغناطیسی در آن گردد. در اینجا با شبیه‌سازی کامپیوتری به مطالعه این اثر پرداخته‌ایم.

شکل (۶-۱۱) شامل تغییرات سرعت روتور می‌باشد. فرض شده‌است که در مدت 0.2 ثانیه روتور با شتاب یکنواختی به سرعت نهایی 314 rad/s برسد و بعد از آن در این سرعت ثابت بماند. شرایط اولیه اعمالی عیناً شرایط موجود در شبیه‌سازی بخش ۴-۶ می‌باشد تا بتوان زمان راه‌اندازی را مقایسه کرد.

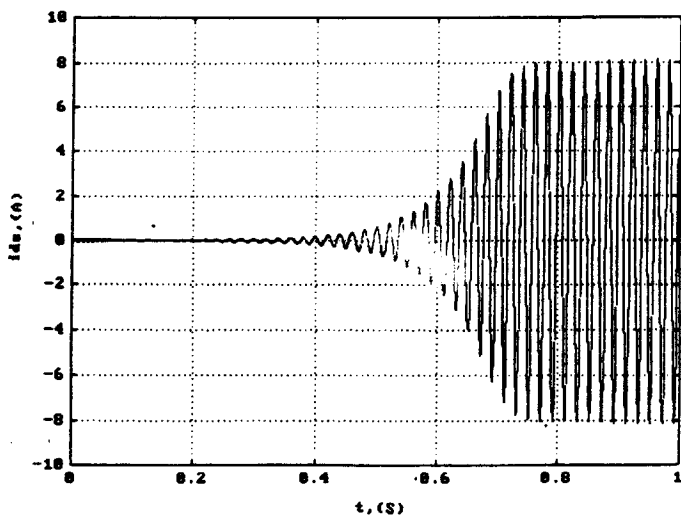
اگر شکل‌های (۶-۱۱ ب) با شکل‌های مشابه در بخش ۴-۶ مقایسه گردد، خواهیم دید که ژنراتور القایی در شرایط اولیه یکسان در زمان بالاتر از 0.6 ثانیه به حالت ماندگار می‌رسد. حال اگر این شکل‌ها را در محدوده زمانی صفر تا 0.4 ثانیه بزرگ‌نماییم، مشاهده می‌شود که شرایط اولیه که حاکی از پسماند مغناطیسی معین است با گذشت زمان کاهش می‌یابد. ولی بعد از رسیدن به سرعت نهایی، ولتاژسازی شروع می‌شود. تغییرات i_m نیز در شکل (۶-۱۱) بطور مستقیم کاهش پسماند را نشان می‌دهد.

بنابراین دوباره نتیجه می‌گیریم که شتاب روتور منجر به کاهش پسماند می‌گردد ولی هرچه قدر هم این پسماند کاهش یابد بالاخره دوباره در سرعت بالاتر یا زمان طولانی ولتاژسازی صورت خواهد گرفت.

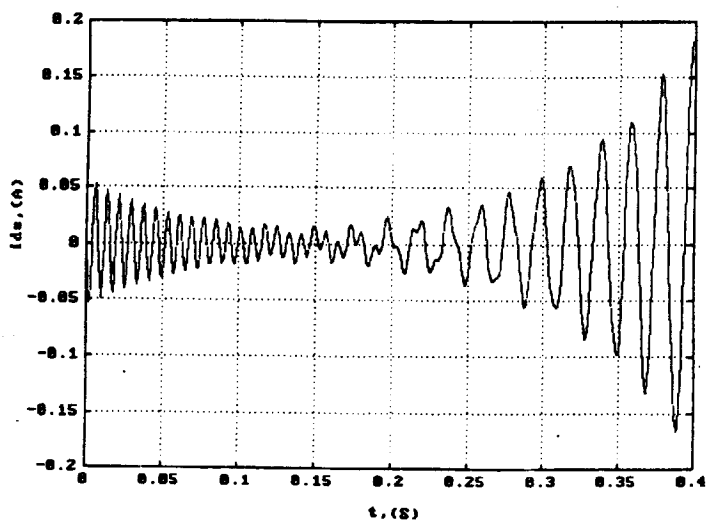


شکل ۱۱-۶- اثر شتاب روتور روی پدیده تحریک خودی.

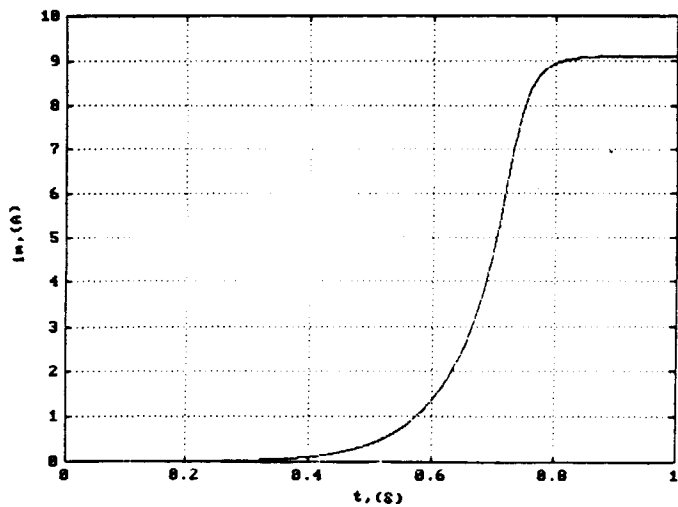
شکل ۱۱-۶- الف - تغییر ω_r با زمان.



شکل ۱۱-۶- ب - تغییر I_{ds} با زمان.

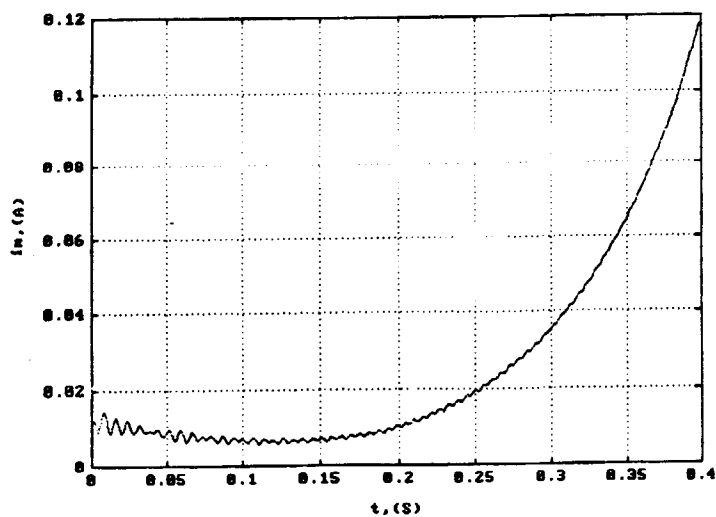


شکل ۱۱-۶- ب - تغییر I_{ds} با زمان (بزرگ شده ب).

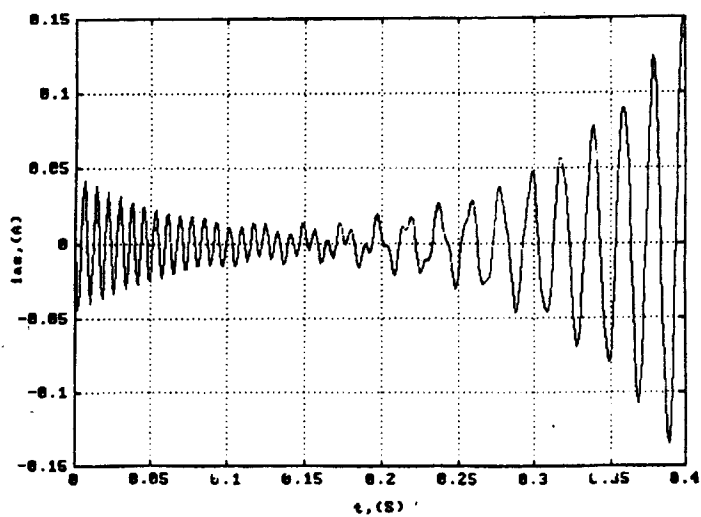


شکل ۶-۱۲- اثر شتاب روتور
بر روی i_m و i_{as}

شکل ۶-۱۲- الف - تغییر i_m با زمان.



شکل ۶-۱۲- ب - تغییر i_m با زمان
(بزرگ شده شکل الف.)



شکل ۶-۱۲- پ - تغییر i_{as} با زمان
(بزرگ شده.)

فصل هفتم

جمع بندی و پیشنهادات

هدف از تحقیق حاضر یافتن روشی مناسب و مطمئن برای مطالعه سیستم غیر خطی ژنراتور القایی سه فاز بود. این نوع ژنراتور در بعضی شرایط جانشین مناسب برای ژنراتور سنکرون می‌باشد. بررسی پژوهشها و مقالات منتشره پیرامون ژنراتور القایی سه فاز معلوم کرد که کاربرد آن بعنوان یک واحد تولیدی بطور روز افزونی در حال گسترش بوده و دائماً حوزه‌های جدیدی برای استفاده آسانتر از آن افزوده می‌شوند. این امر نمایانگر ضرورت انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد. یکی دیگر از انگیزه‌های این بررسی درک عمیقتر پدیده‌هایی که در هنگام راه اندازی ژنراتور و کار دائم آن رخ می‌دهند، بوده است. پس از بررسی سوابق تاریخی و مباحثی از ژنراتور القایی، یک بررسی کلی بر روی حل معادلات دیفرانسیل حاکم و خطوط اساسی راه حل ممکن صورت گرفته و با انجام فرضیاتی روش حل کلی سیستم غیر خطی ماشین - خازن برگزیده شد. کوشش بر این بود که این فرضیات تا حد امکان به مفاهیم واقعی نزدیک بوده و از نظر کاربردی نیز قابل قبول باشند. مهمترین فرض انجام شده این بود که سیم پیچی استاتور دارای توزیع سینوسی بوده و در نتیجه اثر هارمونیک‌های mmf ظاهر نمی‌شود.

در این پروژه ابتدا بررسی پدیده مهم تحریک خودی از دیدگاههای مختلف انجام گرفت. علت این همه تأکید بر این موضوع، اهمیت آن در هر نوع عملکرد (ماندگار و گذرای) ماشین بود. بنابراین نه تنها از دیدگاه سیستمی پدیده تحریک خود بررسی و موشکافی شد بلکه بر اساس وجود پسماند مغناطیسی که دیدگاه کاملاً متفاوتی را مطرح می‌سازد، توضیح داده شد.

سپس بررسی پروسه ولتاژ سازی از دو روش صورت پذیرفت. بعد از دخالت دادن اشباع مغناطیس در مدل ماشین القایی، با استفاده از بردارهای حالت جریان و شار شبیه سازی کامپیوتری یابه عبارت دیگر حل معادلات حالت غیرخطی انجام شد که مزایا و معایب این دو جنبه بررسی بطور کامل در فصل چهارم بیان گردید. نکته دیگری که در رابطه با بردار حالت جریان وجود داشت مشاهده وقوع برجستگی مغناطیسی و امکان کار با کمیت‌های قابل اندازه گیری بود. در ضمن بعلت نزدیکی نتایج عملی به محاسبات بر اساس جریان، بر خلاف ادعاهای انجام شده برای رد این روش، در سایر بررسیها نیز از آن استفاده گردید. در حالت ماندگار با پیشنهاد معادله تعادل و روشهای حل جدید، اولاً از محاسبه ضرایب پیچیده صرفنظر شد. ثانیاً تعداد دفعات تکرار برای اغلب بارها به نصف کاهش یافت. این موضوع در بررسی عملکرد ماندگار بسیار مهم است. لذا نتایج و شکل‌های بدست آمده همگی بر اساس روش پیشنهادی بودند. برای جلوگیری از ایجاد سردرگمی، در انتها تمامی محدودیتهای کاری در قالب یک منحنی به نمایش درآمد. حسن عمده بررسی ماندگار گرفتن ایده اساسی برای طراحی ژنراتور القایی است که در فصل پنجم بطور کامل بحث شد.

در فصل آخر حالت‌های گذرای مهمی که احتمال وقوع دارد بررسی گردید. این تحقیق برای انتخاب مناسب مقادیر نامی بسیار مهم هستند. در زیر ضمن ذکر عوامل مهم خطا و انحراف از شرایط واقعی، پیشنهاداتی جهت ادامه کار در آینده ارائه می‌گردد.

پیشنهادهای

۱ - با کاربرد روشهای عددی دیگری برای حل معادلات دیفرانسیل غیر خطی می‌توان از خطاهای احتمالی بوجود آمده جلوگیری کرد یا آنها را کاهش داد. روشهای بهتری

برای برازش منحنی (اینترپلاسیون) استفاده کرد و بسیار دقت نمود که در حین کار، مقادیر از محدوده تعریف شده تجاوز ننماید.

۲ - در حالت ماندگار برای پیدا کردن نقاط حدی از روشهای گرافیکی استفاده شده که بعلت تقریبی بودن برازش منحنی در مراحل مختلف خطاهای بوجود آمده قابل پیش بینی است. لذا با استفاده از حل عددی دقیق و روشهای سعی و خطا می توان به مقدار واقعی حدود دست یافت. در فصل پنجم هدف نشان دادن رفتار غیر خطی ماشین در حالت ماندگار بودند دستیابی به مقادیر بسیار دقیق محدودیتهای ماشین در شرایط مختلف.

۳ - برای ادامه کار اولین پیشنهاد ارائه مدل کاملی از ژنراتور القایی است. مدل پیشنهادی بر اساس فرض سیم پیچهای متعادل و توزیع سینوسی آنها بود. بنابراین با ارائه مدلی که شامل اثراتی مثل عدم تقارن سیم پیچها، شیارهای عمیق در روتور قفس سنجابی باشد، بطور مسلم به شرایط واقعی نزدیکتر شده و حدود پایداری و سایر محدودیتهای به مقادیر عملی منطبق می گردند.

۴ - طراحی ژنراتور القایی با توجه به مقادیر نامی موردنیاز و نکاتی که در حالتها گذرا و ماندگار باید در نظر گرفته شود.

۵ - کنترل بر روی ولتاژ و فرکانس یا به عبارت دیگر بررسی طراحی گاورنر و AVR.

۶ - شبیه سازی و مطالعه عملکرد ماندگار و گذرای ژنراتور القایی در شبکه قدرت و مقایسه آن با ژنراتور سنکرون.

۷ - بررسی مسائل حفاظتی کاربرد ژنراتور القایی.

۸ - بررسی پایداری ژنراتور القایی، از آنجاییکه سیستم ژنراتور القایی - خازن یک سیستم غیر خطی است بنابراین بررسی پایداری از روشهای معمول در سیستمهای غیر خطی مثل لیاپانوف باید صورت گیرد.

۹ - بررسی عملکرد موازی ژنراتورهای القایی و مسائل حفاظتی مربوطه.

۱۰ - بررسی اقتصادی کاربرد ژنراتور القایی.

ليست مراجع

References :

- 1 - T.S.Jayadev : "Windmills stage a comeback" , IEEE Spectrum , pp.44-49 , Nov. , 1976.
- 2 - Chapman : Electric machinery fundamentals , Mc Graw Hill , pp.616-621.
- 3 - Lahchen Ouazene and George Mcpheerson : "Analysis of the isolated induction generator" , IEEE Trans. on PAS , Vol. PAS-102 , No.8 , pp.2793-2798 , August 1983.
- 4 - J.E.Barkle and R.W.Ferguson : "Induction generator theory and application" , AIEE Transactions , Vol.73 , pp.12-19 , February , 1954.
- 5 - P.C.Krause and F.Nozari and T.L.Skvarenina : "The theory of neglecting stator transients" . IEEE Trans. on PAS , Vol.PAS-98 , No.1 , pp141-146 , Jan/Feb 1979.
- 6 - I.Boldea and S.Anasar : Electric machine dynamic.
- 7 - P.C.Krause : Analysis of electric machinery , Mc Graw Hill , 1987,pp.449-469 .
- 8 - N.N.Hancock : Matrix analysis of electrical machinery , PERGAMON PRESS , 1974,pp.94-114.
- 9 - J.E.Brown and K.P.Kovacs and P.Vas : "A method of including the effects of main flux path saturation in the generalized equations of a.c. machines" , IEEE Trans. On PAS , Vol.PAS-102 , No.1 , pp.96-103 , January 1983.
- 10 - A.V.Kitaev and I.N.Orlov : "On the physical mechanism of asynchronous machine self excitation and self - oscillation" , Electric Technology U.S.S.R, No.2 , pp.19-28 , 1979.
- 11 - J.M.Elder and J.T.Boys and Prof. J.L.Woodward : "The process of self excitation in induction generators" , IEE PROC.,Vol.130 , Pt.B.,No.2 , pp.103-107 , March 1983.
- 12 - C.Grantham and D.Sutanto and B.Mismail : "Steady-state and transient analysis of self-excited induction generators" , IEE PROC.,Vol.136 , Pt.B , No.2 , pp.61-68 , March 1989.
- 13 - M.H.Salama and P.G.Holmes : "Transient and steady-state load performance of a stand-alone self-excited induction generator" , IEE PROC.,Vol.143,Pt.B ,No.1,pp.50-58,

January 1996.

- 14 - J.J.E.Slotine and Weiping Li : Applied nonlinear control , Prentice-Hall 1991, pp.8, 42-43.
- 15 - K.E.Hallenius and P.Vas and J.E.Brown : "The analysis of a saturated self-excited asynchronous generator" , IEEE Trans. On Energy Conversion , Vol.6 , No.2 , pp.336-344 June 1991.
- 16 - Yi-Kang He and T.A.Lipo : "Computer simulation of an induction machine with spatially dependent saturation" , IEEE Trans. On PAS , Vol.103 , No.4 pp.707-714 , April 1984.
- 17 - C.H.Thomas : "Analogue computer representations of synchronous generators in voltage-regulation studies" , AIEE Trans. PAS , Vol.75 , pp1182-1184 , December 1956.
- 18 - S.S.Murthy and O.P.Malik and A.K. Tandon : " Analysis of self-excited induction generators " , IEE PROC. , Vol.129 , Pt.C , No.6 , pp.260-264 , November 1982.
- 19 - N.H.Malik and S.E.Hapue : "Steady state analysis and performance of an isolated self-excited induction generator " , IEEE Trans. On Energy Conversion , Vol.EC-1 , No.3 pp.134-139 , September 1986.
- 20 - T.F.Chan : "Analysis of self-excited induction generators using an iterative method" , IEEE Trans. On Energy Conversion , No.3 , pp.502-507 , September 1995.
- 21 - W.H.Press and S.A.Teukolsky and W.T.Vetterling and B.P.Flannery : Numerical recipes in fortran , CAMBRIDGE University Press 1992 , pp.372-374.
- 22 - A.Kh.Al Jabri and A.I.Alolah : "Limits on the performance of the three-phase self-excited induction generators" , IEEE Trans. on Energy Conversion , Vol.5 , No.2 , pp.350-356 , June 1990.
- 23 - S.D.Conte and C.D.Boor : Elementary numerical analysis , Mc Graw Hill 1986 , pp.223-232 .
- 24 - S.S.Murthy and B.Singh and K.Tandon : "Dynamic models for the transient analysis of induction machines with asymmetrical winding connections" , Electric Machines and Electromechanics , Vol.6 , No.6 , pp.479-492 , November/December 1981.
- 25 - A.K.Tandon and S.S.Murthy and G.J.Berg : "Steady state analysis of capacitor

- self-excited induction generators" , IEEE Trans. On PAS , Vol.PAS-103 , No.3 , pp.612-618 , March 1984.
- 26 - T.F.Chan : "Steady-state analysis of self-excited induction generators" , IEEE Trans. On Energy Conversion , Vol.9 ,No.2, pp.288-296 , June 1996.
- 27 - M.B.Brennen and A.Abbondanti : "Static exciters for induction generators" , IEEE Trans. On Industry Applications , Vol.IA-13 , No.5 , pp.422-428 , September/October 1977.
- 28 - A.K.Al Jabri and A.L.Alolah : "Capacitance requiremant for isolated self-excited induction generator" , IEE PROC.,Vol.137 . Pt.B , No.3 . pp.154-159 , May 1990.
- 29 - N.H.Malik and A.A.Mazi : "Capacitance requiremats for isolated self-excited induction generators" , IEEE Trans. On Energy Conversion , Vol.EC-2 , No.1 , pp.62-68 , March 1987.
- 30 - X.S.Chen and A.J.Flechsig and C.W.Pang and L.M.Zhuang : "Digital modeling of an induction generator" , IEE International Conference on Advances in Power System Control , Operation & Management , November 1991 , Hong Kong , pp.720-726 .
- 31 - F.P.de Mello and J.W.Feltes and L.N.Hannett and J.C.White : "Application of induction generators in power systems" , IEEE Trans. On PAS , Vol.PAS-101 , No.9 , pp.3385-3393 , September 1982.
- 32 - T.Irisa and S.Takata and R.Ueda : "Dynamic performance of self-excited induction generator with voltage controller" , IEEE Trans. On Industry Application , Vol.2 , pp.508-513 , 1980.
- 33 - F.P.Demello and L.N.Hannett : "Large scale induction generators for power systems" ,IEEE Trans. On PAS , Vol.PAS-6 , No.6 , pp.479-492 , Nov./Dec.1981.
- 34 - N.H.Malik and A.H.Al-Bahrani : "Influence of the terminal capacitor on the performance characteristics of a self-excited induction generator" , IEE PROC., Vol.137 Pt.C , No.2 , pp.168-173 , March 1990.
- 35 - S.P.Singh and B.Singh and M.P.Jain : "Performance characteristics and optimum utilization of a cage machine as capacitor excited induction generator" , IEEE Trans. On Energy Conversion , Vol.5 , No.4 , pp.679-685 , December 1990.

- 36 - T.F.Chan : "Self-excited induction generators driven by regulated and unregulated turbines" , IEEE Trans. On Energy Conversion , Vol.11 , No.2 , pp.338-343 , June 1996.
- 37 - A.H.AL-Bahrani and N.H.Malik : "Steady-state analysis of parallel-operated self-excited induction generators" , IEE PROC. Vol.140 , No.1 , Pt.C , pp.49-55 , January 1993.
- 38 - S.Rajakaruna and R.Bonert : "A technique for the steady-state analysis of a self-excited induction generator with variable speed" , IEEE Trans. on Energy conversion , Vol.8 , No.4 , pp.757-761 , December 1993.
- 39 - S.S.Murthy and C.Nagamani and K.V.V.Satyanarayana : "Studies on the use of conventional induction motors as self-excited induction generators" , IEEE Trans. on Energy conversion , Vol.3 , No.4 , pp.842-848 , December 1988.
- 40 - O.Ojo : "The transient and qualitative performance of a self-excited single-phase induction generator" , IEEE Trans. on Energy Conversion , Vol.10 , No.3 , pp.493-501 , September,1995.
- 41 - A.S.Mostafa and A.L.Mohamadein and E.M.Rashed : "Analysis of series-connected wound-rotor self-excited induction generator" , IEE PROC.,Vol.140 , Pt.B , No.5 , pp.329-336 , September 1993.
- 42 - Y.H.A.Rahim : "Excitation of isolated three-phase induction generator by a single Capacitor" , IEE PROC., Vol.140 , Pt.B , No.1 , pp.44-50 , January 1993.
- 43 - S.S.Murthy and C.S.Jha and P.S.Nagendra : "Analysis of grid connected induction generators driven by hydro/wind turbines under realistic system constraints" , IEEE Trans. on Energy Conversion , Vol.5 , No.1 , pp1-7 , March 1990.
- 44 - A.H.Al-Bahrani and N.H.Malik : "Steady state analysis and performance characteristics of a three-phase induction generator self excited with a single capacitor" , IEEE Summer Meeting 1990.
- 45 - Y.Üctug and M.Demirekler : "Modelling , analysis and control of a wind-turbine driven self-excited induction generator" , IEE PROC., Vol.135 , Pt.C , No.4 , pp.268-275 , July 1988.
- 46 - J.M.Elder and J.T.Boys and Prof.J.L.Woodward : "Inteyral cycle control of

- stand-alone generators" , IEE PROC.,Vol.132 , Pt.C , No.2 , pp.57-66 , March 1985.
- 47 - J.M.Elder and J.T.Boys and Prof.J.L.Woodward : "Self-excited induction machine as a small low-cost generator" , IEE PROC.,Vol.131 , Pt.C , No.2 , pp.33-41 , March 1984.
- 48 - S.S.Murthy and G.J.Berg and C.S.Jha and K.Tandon : "A novel method of multistage dynamic braking of three-phase induction motors" , IEEE Trans. on Industry Applications , Vol.IA-20 , No.2 , pp.328-334 , March/April 1984.
- 49 - J.A.A.Melkebeek : "Magnetising-field saturation and dynamic behaviour of induction machines , Part 1 : Improved calculation method for induction-machine dynamics" . IEE PROC.,Vol.130 , Pt.B , No.1 , pp.1-9 , January 1983.
- 50 - J.A.A.Malkebeek : "Magnetising-field saturation and dynamic behaviour of induction machines , Part 2 : Stability limits of a voltage-fed induction motor and of a self-excited induction generator" , IEE PROC.,Vol.130 , Pt.B , No.1 , pp.10-17 , January 1983.
- 51 - J.B.Patton and D.Curtice : "Analysis of utility protection problems associated with small wind turbine interconnections" , IEEE Trans. on PAS , Vol.PAS-101 , No.10 , pp.3957-3966, October 1982.
- 52 - S.I.Kitsis : "Asynchronous self-excited generator transients in sudden three phase short circuits" , Electric Technology U.S.S.R , No.4 , pp.31-47 , 1980.
- 53 - D.W.Novotny and D.J.Gritter and G.H.Studtmann : "Self-excitation in inverter driven induction machines" , IEEE Trans. On PAS , Vol.PAS-96 , No.4 , pp.1117-1195, July/August 1977.
- 54 - D.A.Gorodskii : "On the nature of self-excitation of synchronous machines with capacitive loading" , Electric Technology U.S.S.R , No.1 , pp.65-66 , 1965.
- 55 - Say : Alternating current machines , wiley 1976.

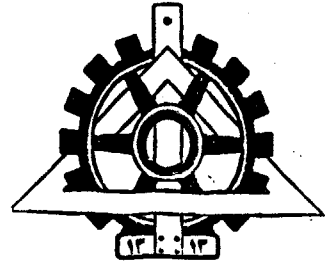
ABSTRACT

The purpose of the research was to survey behaviour of three phase asynchronous (induction) generator (IG). In recent years, application of IG has attracted a lot of interest for producing microhydro & wind electricity. Ease of the maintenance, the increasing rate of depletion of conventional energy resources and the ability of IG to convert mechanical power over a wide range of rotor speeds have given rise to an interest in the possible contribution of wind energy to provide fuel displacement. Numerous articles and papers published on various aspects of this kind of generator indicate its ability in overcoming existing problems. After a brief literature survey and reviewing the related topics from IG, needed means, e.g. mathematical model of machine has been developed to investigate transient & steady state behaviour. Later, by arising the most important problem of starting which include self-excitation, this phenomena has been investigated by three different interpretation and furthermore practical points necessary for starting of the voltage build-up and establishing of self-excitation have been explained.

Knowing main guidelines for study and modification of the mathematical model including magnetizing saturation, the transient voltage build-up process was simulated with two methods (current and flux) using computer and the results of these methods were compared with results reported for a 1.5KW small IG. Relative errors were always in an acceptable range and results were almost coincident. Since speed, load, output power and frequency depend on each other, the steady state analysis is difficult to be undertaken. Therefore in steady state surveying, an efficient method is proposed for calculating generated frequency and magnetizing inductance. By means of the new method, generator performance and its operational restrictions have been studied and very interesting results have been obtained showing excellent coincidence with experiment. Finally, during some very common faults the behaviour of IG and rotor acceleration effect on residual magnetism which is usually studied experimentally, have been simulated theoretically. In the last chapter, suggestions for future research in order to increase the accuracy and to determine operational restrictions in power networks were discussed.



**UNIVERSITY OF TEHRAN
FACULTY OF ENGINEERING**



M.Sc. THESIS

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT

**TITLE : INVESTIGATION OF BEHAVIOUR OF A 3 PHASE
INDUCTION GENERATOR INCLUDING TRANSIENT- AND
STEADY-STATE**

BY : DAVOOD AMINI

ADVISOR : MOHAMAD TAGHI NABAVI

1997

۹۲۱۴