

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به پدر و مادر عزیزمان که در تمام مراحل زندگی یار و
یاورمان هستند.

فهرست

صفحه	عنوان
6.....	مقدمه
	فصل اول
8.....	ژنراتور القایی
12.....	۱-۱- مزایای ژنراتور القایی
14.....	۱-۲- معایب ژنراتور القایی

فصل دوم

- 15 مدلسازی عددی یک ژنراتور القایی
- 16-۱-۲- تاریخچه مدل دو محوری ماشین القایی
- 22-۱-۲-۲: معادلات تبدیل یافته ولتاژ
- 25-۲-۲-۲ معادلات تبدیل یافته فلوی پیوندی
- 28-۳-۲-۲- معادله تبدیل یافته گشتاور مغناطیسی
- 30-۲-۴- معادلات حالت
- 30-۵-۲- مدل ژنراتور القایی در حالت ماندگار
- 34-۶-۲- تئوری فضای برداری

فصل سوم

- 39 راه اندازی ژنراتور القایی
- 40-۱-۳- پدیده تحریک خودی
- 41-۱-۱-۳- تعبیر پروسه تحریک خودی براساس مدار معادل RLC
- 43-۲-۱-۳- تعبیر پروسه تحریک خودی براساس سیستمهای خودنوسانی
- 43-۱-۲-۱-۳- توصیف سیستم خودنوسانی

46.....سیستم ماشین القایی ۲-۲-۱-۳

54.....تغییر پروسه تحریک خودی براساس پسماند مغناطیسی ۳-۱-۳

56.....بررسی های تئوریکی ۱-۳-۱-۳

61.....نکات عملی در راه اندازی ژنراتور القایی ۲-۳

فصل چهارم

65.....مثالهایی از حالت های گذرا در ژنراتور القایی

65.....۱-۴ اتصال بار اهمی به ژنراتور القایی

71.....۲-۴ اتصال کوتاه سه فاز متقارن

78.....۳-۴ اتصال کوتاه دوفاز

88.....۴-۴ اتصال کوتاه دو فاز به زمین

96.....۵-۴ اتصال کوتاه یک فاز به زمین

103.....۶-۴ اثر شتاب روتور برروی پدیده تحریک خودی

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 چنین تحریکی شرایط خاصی مورد نیاز بود. محققان بعد از پژوهش و تحقیق در یافتند 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 و سرعت روتور و بار بستگی دارد. این نوع تولید تا سالهای ۱۹۶۰-۱۹۷۰ به فراموشی سپرده شد و مطالب کمی در مورد آن نوشته شد.

علت این بی توجهی در اهمیت عملی کم چنین تولیدی مستتر بود. چرا که ژنراتور القایی به تنهایی توانایی کنترل ولتاژ و فرکانس تولیدی را ندارد. از این رو ژنراتورهای سنکرون در واحدهای تولیدی بکار گرفته و هرساله مقدار زیادی سوخت

صرف تولید برق ac می شود. طبیعی است با استفاده روزافزون از آلترناتورهای سنکرون، آنها از نظر مقادیر نامی، روشهای خنک سازی، تکنولوژی ساخت و مدلسازی این ژنراتورها دستخوش رشد و تحول شدند، اما ساختار اساسی آنها بدون تغییر ماند ولی بدلیل نگرانی از نرخ کاهش شدید منابع انرژی تجدیدناپذیر و به طبع آن صعود چشمگیر قیمت نفت از یک طرف و ظهور و رشد قطعات نیمه هادی قدرت و پیشرفت کنترل صنعتی از طرف دیگر ژنراتور القایی بازگشت مجددی یافت. از این رو علاقمندی زیادی برای استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، مثل باد جهت جایگزینی سوخت و کاهش نرخ مصرف سوخت ایجاد شد و توجه به ژنراتور القایی به خاطر مزایای زیادی که دارد بیشتر شد.

در سالهای اخیر کاربرد ژنراتور القایی در تولید برق از توربینهای بادی و آبی کوچک مورد توجه زیادی قرار گرفته است. چرا که سادگی نگهداری و کاهش منابع انرژی فسیلی و توانایی ژنراتور القایی برای تبدیل توان مکانیکی از فاصله وسیعی از سرعت روتور موجب شده تا به فکر جایگزینی انرژی باد به جای سوختهای فسیلی بیافتند و انبوه تحقیقات در این زمینه نشانگر توانایی آن در رفع مشکلات حاضر است.

فصل اول

ژنراتور القایی (آسنکرون):

ژنراتور القایی، یک موتور القایی از نوع روتور قفس سنجابی است که با یک محرک اولیه در ما فوق سرعت سنکرون، گردانده شده و برای تولید نیروی برق استفاده می شود و ساختار و مشخصه های آن مثل موتور القایی است. ساختارهای روتور ویاتاقانهای آن نیز برای تحمل سرعت فرار توربین طراحی شده است.

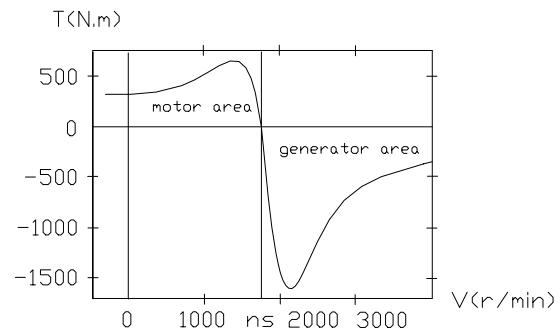
وقتی یک موتور القایی با ولتاژ نامی و در حالت بی باری، مورد بهره برداری قرار گیرد، با سرعتی می چرخد که فقط برای تولید گشتاور لازم برای غلبه بر افت ناشی از اصطکاک و مقاومت هوا کافی باشد. اگر یک نیروی مکانیکی خارجی برابر با این افتها به موتور القایی در همان جهت چرخش اعمال شود، روتور آن به سرعت سنکرون خواهد رسید.

هنگامیکه روتور به سرعت سنکرون می رسد، با همان سرعت میدان مغناطیسی ناشی از ولتاژ تغذیه می چرخد و ولتاژ ثانویه ای القا نمی شود زیرا فلوی مغناطیسی هیچیک از هادیهای ثانویه را قطع نمی کند، هیچ جریانی از سیم پیچهای روتور نمی گذرد و فقط جریان تحریک در سیم پیچهای اولیه جریان می یابد.

در صورتی که روتور بواسطه یک نیروی خارجی در سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون خود، چرخش کند، جهت ولتاژ القایی ثانویه، خلاف موقعی خواهد بود که به عنوان موتور القایی، چرخش می کرد، زیرا سرعت چرخش هادی روتور فراتر از سرعت چرخش میدان مغناطیسی می شود و گشتاوری که سرعت روتور را کند می کند بین جریان ثانویه ناشی از این ولتاژ القایی و میدان مغناطیسی ایجاد شده و واحد مثل یک ژنراتور، کار می کند.

یعنی، توان مکانیکی خارجی اعمال شده، به توان الکتریکی تبدیل می شود که در سیم پیچهای اولیه تولید شده اند.

ماشین القایی دارای منحنی 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 می شود و بعنوان ژنراتور عمل خواهد کرد. با افزایش گشتاور اعمالی به شفت مقدار توان تولیدی افزایش می یابد.



شکل ۱-۱ مشخصه گشتاور-سرعت ماشین القایی

همانطوری که از شکل (۱-۱) معلوم است. درمد ژنراتوری یک گشتاور القایی \max دارد که با افزایش توان ورودی گشتاور القایی به حد \max رسیده و بعد از آن ژنراتور به ناحیه ناپایدار وارد می شود. در این حالت فلوی پیوندی بین روتور و استاتور می شکند و به طور ناگهانی روتور آزادانه می چرخد و هیچ توانی تولید نمی شود.

ماشین های القایی درمد ژنراتوری دارای محدودیت های جدی است و بعلت عدم وجود مدار تحریک جداگانه نمی تواند توان راکتیو تولید کند. بنابراین مصرف کننده توان راکتیو است 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 نمی تواند به کنترل V_0 کمک کند، چرا که 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 کند.

در راه اندازی ژنراتور القایی پدیده ای بنام تحریک خودی مطرح می شود که براساس 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 به کار برد.

با افزایش توان راکتیو ناشی از خازنهای سری، مقداری از توان راکتیو مورد نیاز بار جبران شده و از افت ولتاژ جلوگیری می کند. طبق مشخصه گشتاور- سرعت با تغییر بار، فرکانس ژنراتور القایی تغییر می کند، لذا از آنجاییکه این مخنی در محدوده نرمال کاری شیب تندی دارد، تغییر فرکانس تا لغزش معمولاً کمتر از ۵ درصد می باشد. چنین تغییری در فرکانس ژنراتورهای ایزوله و متصل به شبکه قابل قبول است.

در کاربردهای متصل به شبکه قدرت با استفاده از خازن تصحیح ضریب توان صورت گرفته و ولتاژ را می توان به کمک بار یا خود شبکه قدرت کنترل کرد.

اصولاً سیستمهای مبدل انرژی باد به الکترونیته را می توان به سه گروه تقسیم کرد:

۱- سیستم سرعت متغیر و فرکانس ثابت (VSCF)

۲- سیستم سرعت و فرکانس ثابت (CSCF)

۳- سیستم سرعت متغیر و فرکانس متغیر (VSVF)

برای اینکه از کلیت موضوع کاسته نشود و بحث منحصر به نیروگاههای بادی نگردد، سیستم VSVF فرض می شود.

۱-۱- مزایای ژنراتور القایی:

- ۱- به سیستم تحریک احتیاج نداشته و ساختمان ساده ای دارد و در نتیجه تعمیر و نگهداری آن آسان است.
- ۲- راه اندازی و بهره برداری از آن آسان است، زیرا نیازی به سنکرونیزاسیون یا تنظیم تحریک ندارد.
- ۳- جریان اتصال کوتاه آن کم و زمان کاهش آن در مقایسه با ماشینهای سنکرون کوتاه تر است، زیرا در هنگام اتصال کوتاه، تحریک قطع می شود و جریان اتصال کوتاه فقط در یک مدت زمان فوق العاده کوتاه، جریان می یابد تا اینکه فلوی مغناطیسی ناپدید شود.
- ۴- چون همیشه بطور موازی با ژنراتور سنکرون کار می کند و هرگز مستقلاً مورد بهره برداری قرار نمی گیرد، به ژنراتور سرعت نیازی ندارد.
- ۵- وقتی بار پس زده شود، جریان تحریک، قطع و ولتاژ ناپدید می شود لذا هیچگونه صدمه و خسارتی به بخشهای عایقی دستگاه از جانب ولتاژ اضافی، صرف نظر از میزان افزایش سرعت، رخ نمی دهد.
- ۶- وقتی ولتاژ سیستم افت میکند، جریان تحریک خود به خود کاهش می یابد.
- ۷- چون گاورنر سرعت استفاده نمی شود تا حدی که سرعت آن از سرعت مجاز توربین هیدرولیکی بیشتر نشود به تولید انرژی ادامه می دهد.
- ۸- در مواقعی که سیستم دچار اختلال می شود، این دستگاه می تواند به صورت پایدار و بدون قطع شدن به کار خود ادامه دهد.

علاوه بر مزایای فوق، یک ژنراتور القایی دارای 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 می باشد و در ضمن لازم نیست روتور به طور مداوم با سرعت ثابتی بچرخد.

بخاطر مزایای فوق و سادگی کنترل نسبت به ژنراتور سنکرون و قابلیت اطمینان بالا باعث شده این ژنراتور، انتخاب بسیار مناسبی برای نیروگاه های بادی و آبی کوچک یا کاربرد در ژنراتورهای اضطراری برای شبکه قدرت موجود می باشد.

۲-۱ معایب ژنراتور القایی:

۱- فقط وقتی مثل یک ژنراتور کار می کند که با ماشین سنکرون موازی شده باشد و نمی تواند مستقلاً برق تولید کند. (در کاربرد متصل به شبکه)

۲- چون جریان اولیه ژنراتور در ارتباط با ولتاژ خروجی در پیش فاز است لذا فقط می تواند برای بارهای قدرتی تامین کند که نیاز به جریان پیش فاز دارند.

۳- ضریب قدرت جریان بار بوسیله ضریب قدرت بار تعیین نمی شود، بلکه بوسیله ضریب قدرت ذاتی خود ژنراتور تعیین می شود. به این معنی که ضریب قدرت بوسیله ظرفیت تعیین می شود و قابل کنترل نیست. ژنراتور سنکرونی که به طور موازی به ژنراتور القایی وصل شده، باید علاوه بر جریان تاخیر فاز مورد نیاز بار، جریان تحریک مورد نیاز ژنراتور القایی را نیز تولید کند. بنابراین ضریب قدرت ژنراتور سنکرون بدتر شده و ظرفیت قابل حصول آن نیز کاهش می یابد. این امر همچنین باعث افزایش تلفات در خطوط انتقال می شود. برای جبران این تلفات باید از خازنها استفاده شود.

۴- در بهره برداری موازی، جریان هجومی بالایی جریان می یابد و روی ولتاژ سیستم اثر می گذارد.

۵- ماشینهای القایی با سرعتهای پایین و قطبهای زیاد، نسبت به ماشینهای سنکرون از لحاظ ضریب قدرت و ابعاد ماشین نا مرغوبترند.

مدلسازی 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.

تبدیلها ممکن است حقیقی یا مختلط باشند. یعنی تمام درایه های ماتریس تبدیل از کمیت‌های حقیقی یا مختلط تشکیل شوند. در ضمن تبدیلها همیشه دارای معنی فیزیکی نیستند، بلکه امکان دارد صرفاً یک مفهوم ریاضی باشند. 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 تبدیلها حاکی از کاربرد روش دوم است، در اینجا نیز از 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 برحسب کمیت‌های فازی از معادلات دیفرانسیل خطی تشکیل یافته است که با فرض سرعت ثابت روتور ضرایب آنها اندوکتانس‌های پریودیک متغیر با زمان می باشد.

درک طبیعت رفتار ماشین در رابطه با اندوکتانس‌های متغیر بسیار مشکل است. در اواخر سال ۱۹۲۰، پارک 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 انقلابی بزرگ در آنالیز ماشین الکتریکی بوجود آورد و دارای خاصیت منحصر به فردی است که باعث حذف اندوکتانس‌های متغیر با زمان در معادلات ولتاژ ماشین سنکرون می شود که این تغییرات از حرکت نسبی و تغییر رلوکتانس مغناطیسی بوجود می آیند. بنابراین از آن زمان یک ساده سازی بزرگی در توضیح ریاضی ماشین سنکرون بدست آمد.

بعدها استانلی، کران و بررتن کارپارک را برای آنالیز ماشین القایی توسعه دادند. آنها سه دستگاه مرجع متفاوت را به کار بردند:

۱- دستگاه مرجع ساکن: دستگاه مرجعی که ساکن است.

۲- دستگاه مرجع سنکرون: دستگاه مرجعی که با سرعت سنکرون می چرخد.

۳- دستگاه مرجع روتور: دستگاه مرجعی که روی روتور قرار دارد و با سرعت

آن می چرخد.

در سال ۱۹۶۵، کران متوجه شد که تمامی تبدیل های حقیقی بکار رفته در آنالیز ماشین القایی (آسنکرون) توسط یک تبدیل عمومی قابل بیان است، بطوریکه با انتقال متغیرهای روتور و استاتور به دستگاه مرجعی که با سرعت زاویه ای دلخواهی می چرخد یا ساکن است، اندوکتانس های متغیر با زمان حذف می گردند. بنابراین تمام تبدیل های حقیقی شناخته شده با نسبت دادن سرعت گردش مناسب به دستگاه مرجع دلخواه (اختیاری) بدست خواهد آمد.

معنی فیزیکی تبدیل پارک و سایر تبدیلهای ماتریسی حقیقی، تعریف یک مجموعه جدیدی از متغیرهای استاتور و روتور (odq) برحسب متغیرهای سیم بندی واقعی (abc) است. کمیت های جدید از تصویر متغیرهای واقعی روی مجموعه دو محوری جدید یعنی q,d بدست می آیند و مولفه صفر توزیع نیروی محرکه مغناطیسی برآیند را در سرتاسر فاصله هوایی یکسان نگه می دارد.

از نظر ریاضی، تبدیل پارک فقط یک تبدیل خطی است که ماتریس اندوکتانس استاتور و روتور را قطری می سازد و همه اندوکتانسها را ثابت و بدون تغییر می کند. بنابراین در آنالیز گذرای ماشینهای سنکرون و القایی اغلب از معادلات تبدیل یافته استفاده می شود. 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 می باشد.

ذکر این نکته ضروری به نظر می رسد که در موارد زیادی اندوکتانس ها تغییرات سینوسی ایده آل ندارند یا ضرایب اندوکتانس ها یک تقارن معین را نشان نمی دهند. در چنین حالتی با بکار بستن تبدیلهای فوق به علت عدم حذف جملات وابسته به مکان، جوابی برای معادلات حاصل نمی شود. ولی فرمول سازی در دامنه زمان روشی برای حل معادلات پیشنهاد می کند که ما را به پارامترهای ماشین محدود نمی سازد. بعلاوه مدل دامنه زمان جواب گذرا را حتی در صورت وجود عدم تقارن و غیرخطی بودن، مستقیماً می دهد. ساده ترین روش دستیابی به مدل دامنه زمان، نوشتن معادلات دینامیکی حرکت به فرم معادلات حالت است.

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

مدل دو محوری ماشین القایی با صرف نظر کردن از اثر اشباع ماشین القایی عموماً تحریک استاتوری داشته و در روتور فقط جریانهایی القا می شود. روتور ممکن است از نوع قفسی یا از نوع روتور سیم پیچی شده باشد.

در این جا ماشین القایی معمولی با روتور استاتور سیلندری شکل و متقارن با سیم پیچی های سه فاز و متعادل در نظر گرفته شده.

(شکل ۲-۱) چنین ماشینی را بطور شماتیک نمایش می دهد.

ابتدا سیم بندی استاتور به دو سیم پیچ در دستگاه dq تبدیل می شود، سپس سیم بندیهای روتور به دستگاه فوق منتقل می شود. برای این منظور از تبدیل پارک استفاده می شود.

همانطور که بعداً خواهیم دید این تبدیل دارای خاصیت پایایی توان است. این تبدیل را در دستگاه مرجع دلخواه که دارای سرعت ω می باشد در نظر بگیرید. بنابراین برای تبدیل متغیرهای استاتور و روتور در دستگاه مرجع دلخواه تبدیلهای عمومی زیر تعریف می شود:

$$f_{odqs} = K_s f_{abcs} \quad (2-1)$$

$$f_{odqr} = K_r f_{abcs} \quad (2-2)$$

ماتریسهای تبدیل نیز به شرح زیر است:

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

$$k_r = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} & \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} & \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \\ \cos \beta & \cos \beta - & \cos \beta + \\ \sin \beta & \sin \beta - & \sin \beta + \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

که در این روابط داریم:

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0), \theta^- = \theta - \frac{2\pi}{3}, \theta^+ = \theta + \frac{2\pi}{3} \quad (2-5)$$

$$\theta_r = \int_0^{\xi} \omega_r(\xi) d\xi + \theta_r(0), \beta = \theta - \theta_r, \bar{\beta} = \beta - \frac{2\pi}{3}, \beta^+ = \beta + \frac{2\pi}{3} \quad (2-6)$$

در روابط فوق f بیانگر ولتاژ، جریان یا فلوی پیوندی است و زیر اندیس های r, s به ترتیب استاتور و روتور را نشان می دهند.

β, θ جابجایی زاویه ای محور فاز a استاتور و روتور نسبت به محور d دستگاه مرجع دلخواه می باشد. شکل (2-1).

ω_r, ω به ترتیب سرعت زاویه ای روتور و دستگاه مرجع دلخواه است.

براساس اصول یکایی کردن، اگر مقادیر پایه در مدار استاتور واحد گرفته شود.

$$(2-7) \quad V_{asB}=1, \quad I_{asB}=1, \quad T_B=1$$

در این صورت مقادیر پایه در مدار روتور برابر خواهد شد با:

$$v_{arB} = \frac{Nr}{Ns}, \quad I_{arB} = \frac{Ns}{Nr}, \quad La_{arB} = Ra_{rB} = \left(\frac{Nr}{Ns}\right)^2$$

$$Lab_{rB} = \frac{Nra.Nrb}{Ns^2} \quad (2-8)$$

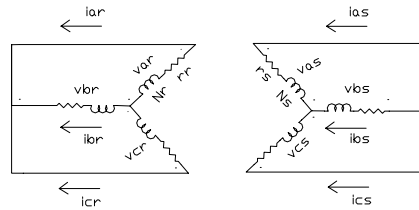
در اینجا V_a, I_a کمیت های جریان و ولتاژ، R_a, Lab, Laa به ترتیب اندوکتانس های خودی و متقابل و مقاومت اهمی می باشند.

با این عمل کمیت های مدار روتور نسبت به کمیت های واقعی مدار استاتور یکایی می شوند و با توجه به مقادیر پایه (2-7) و (2-8) این یکایی کردن مشابه انتقال کمیت های ثانویه یک ترانسفورماتور به اولیه آن است.

۱-۲-۲: معادلات تبدیل یافته ولتاژ:

شکل (۲-۲) دیاگرام شماتیکی سیم بندیهای روتور و استاتور را نشان می دهد. معادلات ولتاژ، فلوی پیوندی و گشتاور الکترومغناطیسی برحسب متغیرهای ماشین که به طرف استاتور انتقال یافته است به شرح زیر می باشد.

شکل (۲-۲): دیاگرام شماتیکی سیم بندی استاتور و روتور



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

که در آن:

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} v_{abc} \\ v'_{abc} \end{bmatrix}, \quad i_{abc} = \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i'_{abc} \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} r_s I_3 & 0 \\ 0 & r_r I_3 \end{bmatrix}, \quad \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda'_{abc} \end{bmatrix}$$

در ماتریس های فوق I_3 ماتریس واحد و $f_{abcs} = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}]^T$ و $f_{abcr} = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}]^T$ که f , f' بیانگر کمیت های ولتاژ یا جریان یا شار پیوندی بوده و همچنین f' کمیت انتقال

یافته به سمت استاتور است. برای فلوی پیوندی و گشتاور مغناطیسی نیز به ترتیب خواهیم داشت:

$$(۲-۱۱) \quad \lambda_{abc} = Li_{abc} = \begin{bmatrix} Ls & L'sr \\ (Lsr)^T & Lr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix}$$

$$(۲-۱۲) \quad Te = -\left(\frac{P}{2}\right) \cdot (i_{abc})^T \cdot \left(\frac{\partial L'sr}{\partial \theta_r}\right) \cdot i'_{abcr}$$

به کمک روابط (۲-۱) و (۲-۲) معادل روابط فوق در دستگاه مرجع دلخواه بدست می آید. ماتریس تبدیل کمیت‌های استاتور و روتور را T نامیده و ابتدا از معادله ولتاژ شروع می کنیم. بنابراین خواهیم داشت:

$$T^{-1} \underline{\Delta} \begin{bmatrix} ks & 0 \\ 0 & kr^{-1} \end{bmatrix}, \quad T \underline{\Delta} \begin{bmatrix} ks & 0 \\ 0 & kr \end{bmatrix} \quad (۲-۱۳)$$

$$TV_{abc} = TR(T^{-1} i_{odq}) + T \frac{d}{dt} (T^{-1} \lambda_{odq}) \quad (۲-۱۴)$$

$$V_{odq} = Ri_{odq} + \frac{d}{dt} \lambda_{odq} + T \frac{d}{dt} (T^{-1} \lambda_{odq}) \quad (۲-۱۴)$$

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

$$V_{odq} = Ri_{odq} + \frac{d}{dt} \lambda_{odq} + W\lambda_{odq} \quad (۲-۱۵)$$

که در آن:

$$V_{odq} = \begin{bmatrix} Vodqs \\ Vodqr \end{bmatrix}, \quad i_{odq} = \begin{bmatrix} iodqs \\ iodqr \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{odq} = \begin{bmatrix} \lambda_{odqs} \\ \lambda_{odqr} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} \omega k & 0 \\ 0 & (\omega - \omega r)k \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

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

:

$$f_{odqs} = [f_{os} \quad f_{ds} \quad f_{qs}]^T$$

$$f_{odqr} = [f_{or} \quad f_{dr} \quad f_{qr}]^T$$

که f بیانگر کمیت های ولتاژ، جریان و شار پیوندی است.

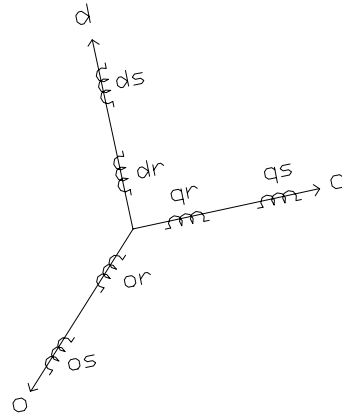
از مقایسه (2-9) و تبدیل یافته اش یعنی رابطه (2-15) می توان نتیجه گرفت که با اعمال تبدیل T جمله اضافی $W\lambda_{odq}$ بوجود آمده است که معمولاً ولتاژ چرخشی نامیده می شود.

2-2-2 معادلات تبدیل یافته فلوی پیوندی:

برای فلوی پیوندی از روابط (2-11) و (2-13) معادلات تبدیل یافته را بدست می آوریم:

$$\lambda_{odq} = \begin{bmatrix} ksLsks^{-1} & ksLsrkr^{-1} \\ kr(L'sr)ks^{-1} & krLrkr^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{odqs} \\ i_{odqr} \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

اگر به سیم پیچی های معادل مطابق شکل (۳-۲) توجه شود، بدون هیچگونه محاسبه ای در مورد ماتریس اندوکتانس تبدیل یافته می توان نتیجه گرفت. ماتریس $k^r L^r k^r$ $K_s L_s K_s^{-1}$ قطری هستند. چرا که در اثر دگردیسی مشابه سیم بندی های استاتور و روتور به سیم پیچی های متعامد تبدیل شده اند. بطوریکه اولاً مقادیر اندوکتانس ثابت هستند، ثانیاً اندوکتانس متقابل بین سیم بندی های معادل استاتور یا روتور روی هر دو محور q, d صفر می باشند. این در واقع ناشی از خاصیت مهم اینگونه تبدیلهای است که قبلاً اشاره شد.



شکل (۳-۲) سیم پیچی های معادل

همانطوریکه در ابتدا گفتیم وجود محور 0 جنبه ریاضی دارد و در حقیقت مطرح نمی باشد.

بدلیل احکام یکایی کردن اندوکتانس های مغناطیسی باهم برابر می باشند. پس روی محورهای q, d داریم:

$$L_{qs} = L_{dr} = L_{dsr} = Lm \quad , \quad L_{qs} = L_{qr} = L_{qsr} = Lm \quad (2-18)$$

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

$$KsLsKs^{-1} = \begin{bmatrix} L_{1s} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1s} + Lm & 0 \\ 0 & 0 & L_{1r} + Lm \end{bmatrix}; KsL'srKr^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Lm & 0 \\ 0 & 0 & Lm \end{bmatrix}$$

$$KrLrKr^{-1} = \begin{bmatrix} L_{1r} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1r} + Lm & 0 \\ 0 & 0 & L_{1r} + Lm \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

از روابط (2-17) و (2-19) براحتمی فلوی پیوندی محورهای q,d برای استاتور و روتور بدست می آید:

$$\begin{bmatrix} \lambda os \\ \lambda or \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1s} & 0 \\ 0 & L_{1r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ios \\ ior \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \lambda ds \\ \lambda dr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1s} + Lm & Lm \\ Lm & L_{1r} + Lm \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ids \\ idr \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda qs \\ \lambda qr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1s} + Lm & Lm \\ Lm & L_{1r} + Lm \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iqs \\ iqr \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

نکته ای که بایستی دقت شود:

از آنجائیکه تحریکی برای روتور وجود ندارد، جریانهای مولفه 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:

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

۲-۲-۳- 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:

$$T_e = -(P/2)(ks^{-1}iodqs)^T \cdot \left[\frac{\partial}{\partial \theta r} (ks^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Lm & 0 \\ 0 & 0 & Lm \end{bmatrix} kr) \right] kr^{-1}iodq$$

$$\Rightarrow T_e = 3/2 (P/2) \cdot (iqs\lambda ds - ids\lambda qs) \quad \Rightarrow$$

بنابراین معادلات مکانیکی حاکم بر ماشین القایی عبارتند از:

$$T_e = 3/2 (P/2) \cdot (iqs\lambda ds - ids\lambda qs) \quad (2-22)$$

$$(2/p) J d/dt \omega r = T_e - T_m \quad (2-23)$$

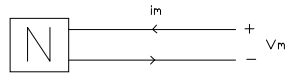
در این روابط p تعداد قطبها، J ممان اینرسی روتور و T_m گشتاور مکانیکی (بار) می باشند. در آخرین قسمت بهتر است توان حقیقی برحسب متغیرهای تبدیل یافته بدست آورد. از آنجاییکه k_s و k_r ماتریس های متعامد هستند، در نتیجه خاصیت پایایی توان برقرار خواهد بود.

$$P(t) = V(\text{obcs})^T i \text{abcs} = (k_s^{-1} V \text{odqs})^T (k_s^{-1} i \text{odqs}) =$$

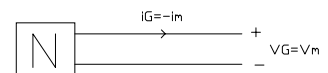
$$(\text{vodqs})^T [(k_s^{-1}) (k_s^{-1})^T] i \text{odqs}$$

$$p(t) = V_{\text{osios}} + V_{\text{dsids}} + V_{\text{qsids}} \quad (2-24)$$

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 تولیدکننده نتیجه گرفت.



(الف)



(ب)



(ج)

طبق شکل (۴-۲) بایستی پلاریته جریان یا ولتاژ را در معادلات موتوری عوض کرد. بنابراین اگر تغییر پلاریته ولتاژ را اعمال نمائیم معادلات ژنراتوری زیر بدست می آید:

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

$$\left(\frac{2}{p}\right) j \frac{d\omega r}{dt} = T_m - T_e \quad (۲-۲۶)$$

سایر معادلات بدست آمده در بخش ۳-۲ بدون تغییر در حالت ژنراتوری نیز به قوت خود برقرار می باشند.

۴-۲ معادلات حالت

با توضیحاتی که در بخشهای ۲-۲ و ۳-۲ داده شده، می توان معادلات حالت را از روابط (۲-۱۵) و (۲-۱۷) و (۲-۲۰) و (۲-۲۳) برحسب 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 صرفنظر کردن از تمامی هارمونیک های فضایی و زمانی mmf شکل موجهای

ولتاژ و جریان القایی سینوسی خواهند بود. ضمناً از تلفات هسته نیز صرفنظر می شود. پس برای ماشین متقارن جریانها و ولتاژها سه فاز متعادل با فرکانس ωe می باشند.

$$fabcs = fs [\cos\theta e \quad \cos\theta^- e \quad \cos\theta^+ e]^T$$

$$\theta e = \int_0^t \omega e(\xi) d\xi + \theta e(0) \quad (2-27)$$

$$\theta^- e = \theta e - 2\pi/3, \quad \theta^+ e = \theta e + 2\pi/3$$

با اعمال تبدیل ks داریم:

$$fodqs = ks fabcs = kfs [0 \quad \cos(\theta e - \theta) \quad -\sin(\theta e - \theta)]^T$$

$$K = (3/2)^{1/2} \quad (2-28)$$

حال روابط فیزوری بین کمیت های تبدیل یافته و اصلی را پیدا می کنیم.

$$fds = kfs \cos(\theta e - \theta) = \text{Re} [kfs \exp(j(\omega e - \omega)t + \theta e(0) - \theta e(0))]]$$

$$fds = \text{Re} [Fds \exp(j(\omega e - \omega)t)] \quad (2-29)$$

$$fqs = -kfs \sin(\theta e - \theta) = \text{Re} [jkfs \exp(j(\omega e - \omega)t + \theta e(0) - \theta e(0))]]$$

$$fqs = \text{Re} [Fqs \exp(j(\omega e - \omega)t)] \quad (2-30)$$

$$fas = fs \cos\theta e = \text{Re} [fs \exp(j(\omega e t + \theta e(0)))] = \text{Re} [Fas \exp(j\omega e t)]$$

Fas, Fqs, Fds به ترتیب نیروهای محوری d, q, و فاز a نظیر کمیت f هستند.

اگر دستگاه مرجع دلخواه طوری گرفته شود که $\theta e(0)=0$ گردد، از عمومیت مسئله کاسته نمی شود. با اعمال این شرط در سه رابطه فوق خواهیم داشت:

$$F_{ds} = kF_{as} \quad , \quad F_{qs} = jF_{ds} = jkF_{as} \quad (2-32)$$

از روابط (2-29) و (2-30) مشهود است که کمیت های تبدیل یافته در حالت ماندگار با فرکانس $(\omega e - \omega)$ نوسان می کند. اگر معادلات محور d از (2-15) برای مد ژنراتوری نوشته شود:

$$V_{ds} = -r_s i_{ds} - \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs}$$

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

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

$$V_{ds} = -r_s i_{ds} - j(\omega e - \omega) \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs}$$

$$V_{dr} = r_r i_{dr} - j(\omega e - \omega) \lambda_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr}$$

و یا

$$V_{ds} = -r_s i_{ds} - j \omega e \lambda_{ds}$$

$$V_{dr} = -r_r i_{dr} - j(\omega e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (2-35)$$

توجه شود که تمامی کمیت های روابط فوق فیزور هستند. حال اگر به جای λ_{dr} , λ_{ds}

برحسب فیزور جریانها در رابطه (2-35) جایگذاری شود:

$$V_{ds} = -r_s I_{ds} - j\omega e | (L_{1s} + L_m) I_{ds} + L_m I_{dr}$$

$$V_{dr} = -r_r I_{dr} - j(\omega e - \omega r) L_m I_{ds} + (I_{dr} + L_m) I_{dr}$$

از رابطه (۲-۳۲) کمتهای محور d را بر حسب فاز α_s, α_r جای‌گذاری می‌کنیم:

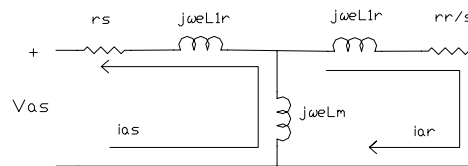
$$V_{as} = (r_s + j\omega e L_{1s}) I_{ds} - (j\omega e L_m) (I_{as} + I_{ar}) \quad (۲-۳۶)$$

$$V_{ar} = -[r_r + j(\omega e - \omega r) L_{1r}] I_{ar} - [j(\omega e - \omega r) L_m] (I_{as} + I_{ar}) \quad (۲-۳۷)$$

با تقسیم طرفین رابطه (۲-۳۷) بر $S \Delta \frac{\omega e - \omega r}{\omega e}$ خواهیم داشت:

$$V_{as/s} = -(r_r/s + j\omega e L_{1r}) I_{ar} - j\omega e L_m (I_{as} + I_{ar}) \quad (۲-۳۸)$$

از معادلات (۲-۳۶) و (۲-۳۸) می‌توان مدار معادل حالت ماندگار را رسم کرد:



شکل (۲-۵) مدار معادل ژنراتور القایی در حالت ماندگار

لازم به یادآوری است که $\text{Var} = 0$ می باشد. برای در نظر گرفتن تلفات هسته کافی است مقاومت اهمی معادل این تلفات را بطور موازی با راکتانس مغناطیس کننده قرار دارد.

۲-۶ تئوری فضای برداری

تئوری فضای برداری خیلی نزدیک به تئوری ماتریسی جامع ماشین های الکتریکی است و همچنانکه نشان داده می شود به راحتی می توان از معادلات فضای برداری به معادلاتی که قبلاً بدست آمده رسید.

اساس این تئوری استفاده از مولفه های متقارن در مورد کمیت های لحظه ای می باشد یعنی کمیت هایی مثل جریان و ولتاژ و شار به مؤلفه های متقارن مثبت و منفی تبدیل می شوند.

برای مطابقت با تبدیل های (۲-۱) و (۲-۲) ماتریس تبدیل، در دستگاه مرجع ساکن در چنین فضایی بصورت زیر تعریف می گردد:

$$\begin{bmatrix} f^0 \\ f^+ \\ f^- \end{bmatrix} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} fa \\ fb \\ fc \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

در رابطه فوق، fa , fb , fc کمیت های لحظه ای و f^0 , f^+ , f^- به ترتیب بردارهای مولفه صفر، مثبت و منفی هستند. با تبدیل فوق کمیت های متغیر با زمان به بردارهای فضایی تبدیل می شوند. مثلاً بردارهای مؤلفه مثبت جریان، ولتاژ و شار عبارتند از:

$$\bar{V} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} (Va(t) + aVb(t) + a^2Vc(t))$$

$$\bar{i} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} (ia(t) + aib(t) + a^2ic(t)) \quad (2-40)$$

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} (\lambda a(t) + a\lambda b(t) + a^2\lambda c(t))$$

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

$$\begin{bmatrix} fa \\ fb \\ fc \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{6}\right)^{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f^0 \\ f^+ \\ f^- \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

از آنجاییکه $a^* = a^2$ ، $f^0 = 0$ می باشد، پس به راحتی می توان از (2-4) نتیجه گرفت

که fa ، fb ، fc حقیقی هستند، هرگاه f^+ ، f^- مزدوج مختلط باشند.

حال اگر معادلات دیفرانسیل (2-9) ماشین القایی را در نظر بگیرید.

با جایگذاری کمیت‌های زمانی در روابط (2-40) معادلات فضای برداری در دستگاه

مرجع ساکن بدست خواهد آمد:

$$\bar{V} s = r s \bar{i} s + p \bar{\lambda} s \quad (2-42)$$

$$\bar{V} r = r r \bar{i} r + p \bar{\lambda} r \quad (2-43)$$

در روابط فوق :

$$\bar{\lambda}s = Ls\bar{i}s + Lm\bar{i}r", \bar{i}r" = \bar{i}r \cdot \exp(j\omega t) \quad (2-44)$$

$$\bar{\lambda}r = Lr\bar{i}r + Lm\bar{i}s", \bar{i}s" = \bar{i}s \cdot \exp(-j\omega t) \quad (2-45)$$

" $\bar{i}s$ ", " $\bar{i}r$ " به ترتیب بردارهای منتقل شده به دستگاه های مرجع استاتور و روتور می باشد. از آنجایی که رابطه بین بردارهای دستگاههای مرجع دلخواه و بردارهای دستگاههای مرجع استاتور و روتور بشرح زیر است:

$$\bar{\lambda}s' = \bar{\lambda}s \cdot \exp(-j\omega t)$$

$$\bar{V}s' = \bar{V}s \cdot \exp(-j\omega t) \quad (2-46)$$

$$\bar{i}s' = \bar{i}s \cdot \exp(-j\omega t)$$

در اینصورت معادلات فضای برداری (2-42) و (3-43) در دستگاه مرجع دلخواه به

شکل زیر در می آیند:

$$\bar{V}s' = rs\bar{i}s' + p\bar{\lambda}s' + j\omega \bar{\lambda}s' \quad (2-47)$$

$$\bar{V}r' = rr\bar{i}r' + p\bar{\lambda}r' + j(\omega - \omega r) \bar{\lambda}r' \quad (2-48)$$

که:

$$\bar{\lambda}r' = Lr\bar{i}r' + Lm\bar{i}s' \quad , \quad \bar{\lambda}s' = Ls\bar{i}s' + Lm\bar{i}r'$$

حال اگر در معادلات فوق هر بردار را بصورت دو مولفه

حقیقی و مجازی نشان دهیم. مثلاً برای استاتور داشته

باشیم:

$$\bar{i}s' = iqs + jids \quad , \quad \bar{\lambda}s' = \lambda qs + j\lambda ds \quad , \quad \bar{v}s' = Vqs + jVds$$

(۲-۴۹)

پس اگر این بردارها در (۲-۴۷) و (۲-۴۸) جایگذاری و قسمت‌های حقیقی و مجازی به

طور جداگانه نوشته شود، می توان به رابطه زیر رسید:

$$Vds = r_s s di + p \lambda ds + \omega \lambda qs$$

$$Vqs = r_s q si + p \lambda qs - \omega \lambda ds \quad (۲-۵۰)$$

$$Vdr = r_r r di + p \lambda dr + (\omega - \omega_r) \lambda qr$$

$$Vqr = r_r i qr + p \lambda qr + (\omega - \omega_r) \lambda dr$$

این روابط دقیقاً با روابط (۲-۱۵) یکی هستند. بنابراین بعد از حل معادلات فوق در

دستگاه مرجع ساکن ($\omega=0$) بردارهای مؤلفه مثبت به دست 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:

$$V_{as} = (2/3)^{1/2} \cdot V_{qs}$$

$$V_{bs} = -\frac{1}{(6)^{1/2}} V_{qs} + \frac{1}{(2)^{1/2}} V_{ds}, \quad (2-51)$$

$$V_{cs} = -\frac{1}{(6)^{1/2}} V_{qs} - \frac{1}{(2)^{1/2}} V_{ds},$$

بهمین ترتیب می توان روابطی را برای سایر کمیت ها بدست آورد.

قابل ذکر است که به علت ایجاد پیچیدگی، مؤلفه های متقارن لحظه ای را بهتری باشد که فقط در حل مسائل خاص مورد استفاده قرار داد. ولی از مهمترین مزایای این روش این است که در صورت متقارن بودن ولتاژها و جریانها (یا شارها) 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 ماشین الکتریکی مدار مغناطیسی بعنوان واسطه تبدیل انرژی الکتریکی عمل می کند و وظیفه مهم انرژی دارکردن آن توسط مدار تحریک ایفا می شود. 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 محکم و ساده می باشد. بنابراین واقعیت فقدان سیم بندی تحریک در ماشین القایی این سوال را پیش می آورد که عامل تحریک مدار مغناطیسی از کجا تأمین می شود؟

مسلماً راهی جز استفاده از یک سیستم کمکی خارجی وجود ندارد. پس جریانی که ماشین را مغناطیس می کند از سیستمی که ماشین به آن وصل است تأمین می شود. با توجه به مدار معادل ژنراتور القایی شکل (۲-۵)، برقراری جریان مغناطیس کننده (i_m) در راکتانس معادل (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 راه تولید می شود.

۱- ماشین های سنکرون با تحریک اضافی

۲- بانکهای خازنی موازی

در اثر این نوع تحریک ایجادشده یک نیروی محرکه مغناطیسی، در سیم بندی های ماشین القا می شود و بنا به دلایلی که بعداً روشن خواهد شد این پدیده به تحریک خودی 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 ولتاژسازی است.

۳-۱- پدیده تحریک خودی:

تحریک خودی ماشین های القایی یک پدیده فیزیکی شناخته شده ای می باشد که کاربرد عملی وسیعی پیدا کرده است. در مواردی مثل طراحی ژنراتورهای خود کنترل و ترمز موتورهای محرک تلاشهای زیادی صورت می گیرد تا شرایط گسترش و توسعه بیشتر این پدیده بوجود آید ولی در برخی موارد دیگر تمامی جوانب احتیاط برای جلوگیری از تحریک خودی به منظور پایدار کردن یک شبکه به کار بسته می شود، چرا که وقوع آن منجر به افزایش جدی ولتاژ و به مخاطره افتادن عایق ماشین و یا سبب نوساناتی در گشتاور و سرعت ماشین و در نتیجه کاهش مزایای آن و احتمالاً از دیاد حرارت قابل ملاحظه می گردد، ولی بهرحال 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 می باشد.

در اینجا ابتدا یک تعبیر از پدیده تحریک خودی و ولتاژ سازی را توضیح می دهیم سپس با تشریح این پروسه براساس دو دید کلی بحث ادامه خواهد یافت.

۳-۱-۱- تعبیر پروسه تحریک خودی براساس 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 ریشه های چند جمله ای مشخصه یا چند جمله ای نظیر معادله دیفرانسیل مدار 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 است. در اکثر پاسخ های گذرا قسمت حقیقی p_1 منفی است، یعنی با گذشت زمان افزایش یافته و در تئوری به بینهایت میل خواهد کرد.

پاسخهای گذرای که دامنه شان به روش فوق زیاد می شوند، بسیار نادرند چرا که با جاری شدن جریان در مقاومت مدار تلف خواهد شد و با یستی منبع انرژی وجود داشته باشد که توان لازم را تولید کند.

مثال 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 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 و ولتاژ سازی ادامه می یابد تا مدار مغناطیسی ماشین اشباع گردد. سپس در حالت گذرا 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 می گردد. بنابراین شرایط شروع و حفظ نوسان این است که:

۱- برای شروع $\text{Re}(p_1) > 0$, $k_1 \neq 0$ می باشد. برای یک ژنراتور القایی وجود فلوی پسماند مغناطیسی کافی در فاصله هوایی ماشین و یا به طور معادل بار پسماند خازن تحریک شرط $k_1 \neq 0$ را تأمین می کند و انتخاب خازن تحریک مناسب برای سرعت معین روتور $\text{Re}(p_1) > 0$ را برآورده می سازد.

۲- برای حفظ نوسان یک منبع انرژی لازم است که همان انرژی جنبشی روتور است. اگر روتور توسط محرکی از بیرون به حرکت درنیاید، انرژی جنبشی آن به سرعت جذب شده و این می تواند برای ایجاد ترمز دینامیکی به کار 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 ولتاژ کل لحظه ای رفتار آن بهتر درک می شود.

۳-۱-۲- تعبیر پروسه تحریک خودی براساس سیستمهای خودنوسانی:

در این قسمت بدون در نظر گرفتن پسماند مغناطیسی، از دید کلی تری پدیده تحریک خودی بررسی می شود. بررسی براساس 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 موردنظر شامل ژنراتور القایی، بانک خازنی و محرک می باشد که بعلت وجود پدیده اشباع مغناطیسی کاملاً غیرخطی است.

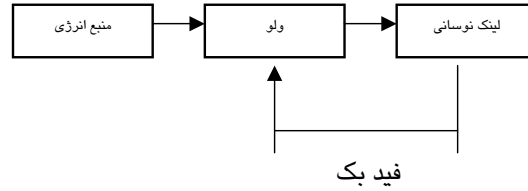
سیستم های غیرخطی می توانند بدون تحریک بیرونی نوسانی با دامنه و فرکانس ثابت ایجاد کنند این نوسانات، نوسانات تحریک خودی نامیده می شوند.

در این قسمت نشان داده می شود که سیستم تحت بررسی یک سیستم خودنوسانی است. برای این منظور باید ثابت گردد که شروع نوسان در آن با مشخصه سیستمهای خودنوسانی مطابقت دارد.

۳-۲-۱- توصیف سیستم خودنوسانی:

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 می باشد که سیستمی با بلوک دیاگرام اساسی شکل (۳-۱) را تشکیل می دهد. این سیستم خود نوسانی نامیده می شود. در واقع به کمک ولو و فیدبک، سیستم می تواند نوسانات غیرمیرا بوجود آورد، بدون اینکه عوامل پریودیک از خارج اعمال گردد.

توجه به این نکته مهم است که برای حفظ دامنه نوسان در یک سطح معین سیستم باید غیرخطی باشد.



شکل ۱-۳ شمای ساختاری سیستم خود نوسانی

اصولاً تحریک خودی براساس میزان نیروی لازم برای شروع نوسان خودی به دو نوع تقسیم می شود:

۱- تحریک خودی سخت

۲- تحریک خودی نرم

اگر شروع نوسان خودی در سیستم نیاز به نیروی محرک بیرونی معین داشته باشد آنرا تحریک خودی سخت می نامند ولی سایر سیستمهایی که نیاز به چنین محرکی ندارد، تحریک خودی نرم می گویند.

از گروه سیستمهای خودنوسانی، سیستمهای الکتریکی را انتخاب می کنیم که برای تولید نوسان سینوسی ماندگار در نظر گرفته می شوند. در این صورت عملکرد بلوکهای شکل (۱-۳) آشکار می شود.

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 کافی داشته باشند، در این صورت پس از اثر یک نیروی محرکه الکتریکی بیرونی مثل بار پسماند خازن یا در اثر تغییرات داخلی مدار و ایجاد نوساناتی در فرکانس تشدید با دامنه میرا خواهد بود. میرایی نوسانات در این مدار بدلیل تلفات اهمی در عناصر مختلف آن می باشد.

واضح است که اگر در هر نوسان 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 در 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 بماند.

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

۱- با تغییر پریودیک اندوکتانس و جریان

۲- با اعمال انرژی اضافی تولیدشده توسط خود سیستم

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

$$\frac{Li^2}{2} > \frac{1}{4} ri^2 T$$

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 خودنوسانی بعد از توضیح اصول اساسی در قسمت قبل و معرفی سیستم خودنوسانی ثابت می شود. سپس مکانیزم توسط نوسانات در آن بررسی می گردد. برای قراردادن این سیستم در زمره سیستم های خودنوسانی اولاً بایستی حضور تمامی بلوکهای شکل (۱-۳) 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 بگیرید. فرض کنید که ماشین توسط موتور محرک دیگری در چرخش است و یک بانک خازنی به ترمینالهای سیم پیچی استاتور وصل می باشد. همچنین فرض می شود 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 کارکرده و توان P_g را در حالت ماندگار تولید می کند:

$$P_g = \frac{1-s}{s} P_r$$

pr در رابطه فوق تلفات مسی در مدار روتور و S لغزش می باشد. با دقت در سیستم ماشین- خازن می توان بلوکهای موجود در ساختار سیستم خودنوسانی را نتیجه گرفت:

أ- موتور محرک بعنوان منبع انرژی

ب- حلقه شامل خازن و اندوکتانسها به عنوان سیستم نوسانی (لینک نوسانی)

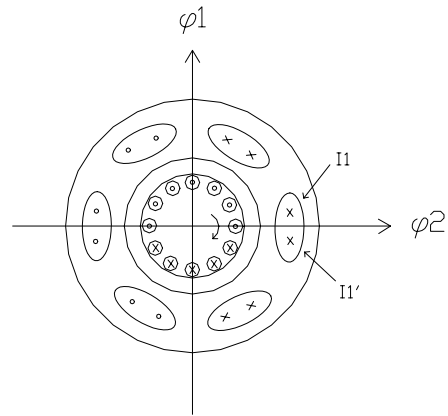
ت- کوپلاژ الکترومغناطیسی بین مدارهای استاتور و روتور از طریق فلوی

مغناطیسی ماشین بعنوان فیدبک

ث- مدار روتور بعنوان ولو

برپایه مطالب گفته شده و کمی تأمل بر روی مدار معادل ژنراتور القایی به راحتی می توان به این موضوع پی برد که نقش ولو توسط مدار روتور ایفا می گردد و کوپلاژ مغناطیسی بین مدارهای استاتور و روتور اثر فیدبک را ظاهر می سازد. ولی برای تفهیم بیشتر توضیح داده می شود که چگونه با عملکرد مدار روتور، انرژی در اندازه های معین در طول مدت نوسان توسط مدار استاتور دریافت می گردد.

برای توضیح بهتر و درک فیزیکی پدیده دو حالت حدی در نظر گرفته می شود. فرض کنید لغزش یک مقدار منفی کوچک ($S \sim 0$) دارد و جریان I_1 در سیم پیچی استاتور برقرار است.



(۲-۳) الف- میدان مغناطیسی استاتور و روتور در لغزش کوچک و منفی

(شکل الف) لغزش منفی و کوچک بهنگام بی باری ماشین اتفاق می افتد. در اثر I_1 فلوی φ_1 بوجود می آید و چون روتور سریعتر از میدان مغناطیسی استاتور می چرخد، یک نیروی محرکه الکتریکی E_2 ($-d\varphi_1/dt$) در میل های روتور القامی گردد، که زاویه ۹۰ درجه نسبت به فاز استاتور می سازد.

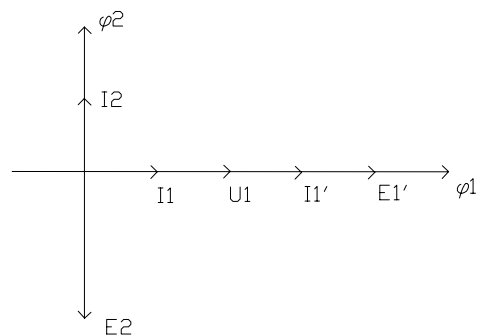
ولتاژ E_2 جریان I_2 می سازد که به علت اهمی بودن امپدانس مدار روتور ($r_r/s \gg x_r$) و مقدار منفی جریان r_r/s ، بردار جریان ۱۸۰ درجه با E_2 اختلاف فاز دارد. I_2 نیز فلوی مغناطیسی φ_2 را در روتور برقرار می سازد که این هم سیم بندی ثابت استاتور را قطع و ولتاژ E_1' و جریان I_1' را در آن القا می کند.

همانطور که گفته شد امپدانس مدار روتور اهمی است. بنابراین هیچ شیفت زمانی بین I_2, E_2 وجود ندارد، در نتیجه فلوهای φ_1, φ_2 بطور همزمان عمل کرده و علیرغم

اختلاف فاز ۹۰ درجه در فضا در فاز زمانی برهم منطبقند. جریان I_1 , I_1' نیز همزمان در سیم بندی استاتور عمل کرده و جریان می یابند، بنابراین در لحظه ذخیره انرژی الکترومغناطیسی ماکزیمم در سیم بندی استاتور فیدبک به گونه ای عمل می کند که مدار روتور را وادار به تزریق انرژی اضافی به مدار استاتور می سازد. چرا که طبق مطالب گفته شده برای حفظ نوسان باید انرژی الکترومغناطیسی بطریقی افزایش یابد (هدایت ولو) و برعکس با صفرشدن 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 می سازد که اعمال انرژی به استاتور را کاهش دهد. (عدم هدایت ولو)

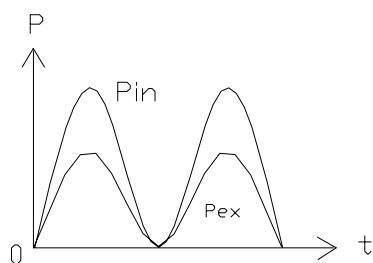
با دقت در مکانیزم ولو متوجه می شویم که مدار روتور طوری رفتار می کند که اثر امپدانس منفی در لینک نوسانی بوجود می آید. در مدار معادل نیز بازویی که جایگزین روتور می شود همواره یک مقاومت منفی $(\frac{r}{s})$ دارد.

منظور فوق را می توان با دیاگرام برداری شکل (۳-۲ ب) نیز توضیح داد. در رسم این دیاگرام I_1 بعنوان مبنا انتخاب شده و موقعیت سایر بردارها را با مطالبی که قبلاً گفته شد می توان بدست آورد.



(۲-۲) ب- د یاگرام برداری کمیت‌های الکتریکی برای لغزش کوچک و منفی

ارزش دیگر این دیاگرام استفاده از آن برای معین نمودن مقادیر لحظه ای توان اعمالی به مدار نوسانی ($P_{in} = E_1' I_1'$) و توان تولیدی در آن مدار ($P_{ex} = U_1 I_1$) می باشد. با نمایش موجی این توانها یک توضیح تصویری از رسیدن به شرایط تعادل فاز و دامنه بدست می آید.



(۲-۲) ج- د یاگرام موجی توان ورودی و خروجی به ازای لغزش کوچک و منفی

شرط $P_{in} > P_{ex}$ به ازای بعضی مقادیر لغزش برقرار می شود. بنابراین مفهوم حد پائین برای سرعت ممکن است مطرح گردد. با افزایش مقدار خازن حد پائین سرعت

کاهش می یابد و شرایط برای تولید انرژی در قسمت روتور بدتر می گردد. بنابراین یک مقدار حدی برای خازن وجود دارد که در مقادیر بیش از آن تحریک خودی باعث کاهش سرعت قطع می شود.

حال به توضیح خاصیت غیرخطی در محدود سازی دامنه نوسان بهنگام ولتاژسازی ناشی از تحریک خودی پرداخته می شود. اگر جریان I_1 در مدار نوسانی برقرار گردد توان کل تولیدشده توسط ماشین $E \cdot I_1^*$ 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 می گردد که:

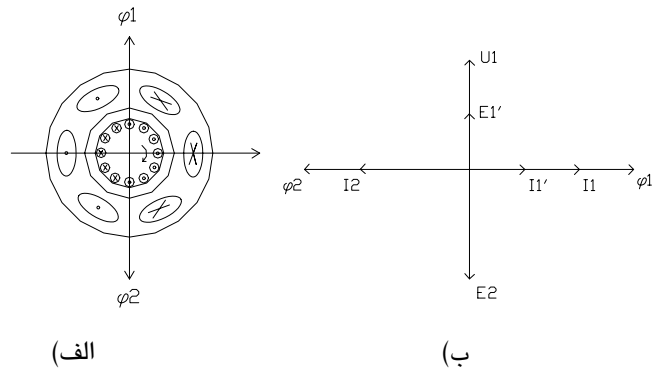
$$|E I_1^*| > |U_c I_1^*| \quad (3-3)$$

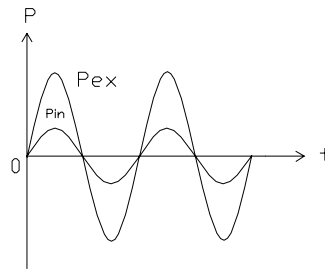
هرکدام از حاصلضرب های طرفین رابطه فوق را می توان با یک مستطیل با پایه مساوی I_1 بطور گرافیکی نمایش داد. رابطه مقدار E_1 , I_1 توسط منحنی مشخصه بی باری داده می شود که به علت اشباع غیرخطی است ولی رابطه مقدار U_c , I_1 همیشه خطی بوده و توسط مشخصه ولت آمپر خازن معین می شود. مسلماً برای برقراری رابطه (3-3) باید مشخصه بی باری بالای مشخصه ولت آمپر خازن قرار گیرد و به علت غیرخطی بودن مشخصه بی باری این دو منحنی همدیگر را در یک جریان قطع می کنند.

این نقطه تلاقی محدوده کار وسیله را معین می کند که در آن مقادیر توانهای موردنظر قابل مقایسه است.

در این نقطه ماشین نمی تواند به عنوان تقویت کننده توان عمل کند و امکان افزایش دامنه نوسان از بین می رود و به علت شارژ و دشارژ متوالی بین خازن و سلف در مدار نوسانی، نوسانات ادامه می یابد. بطور مشابه برای حالتی که لغزش مقدار بزرگی دارد می توان روش آنالیز یکسانی را با فرض سرعت ωr ثابت و مقدار C متغیر به کار برد.

در این حالت نیز با بررسی نتیجه می شود که با افزایش خازن C برقراری رابطه دامنه و فاز مشکل می گردد چرا که فلوی روتور نسبت به فاز اولیه استاتور جابجا شده و مقدار توان قابل انتقال به استاتور کاهش می یابد. شکل (۳-۳)





(ج)

با افزایش C از یک مقدار معین ولو می تواند انرژی کافی برای مدار استاتور تأمین کند، در نتیجه نوسان متوقف شده و تحریک خودی ماشین از بین می رود. وقتی C ثابت و سرعت ωI متغیر باشد، بازهم 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 پائین و بالای سرعت به ترتیب کوچک و بزرگ شده و محدوده کاری بیشتر می گردد.

۳-۱-۳- تغییر پروسه تحریک خودی براساس پسماند مغناطیسی:

در این قسمت مکانیزم وقوع تحریک خودی براساس 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.

در پروسه تحریک خودی و ولتاژ سازی رفتار دومرحله 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 مدسنکرون می نامند.

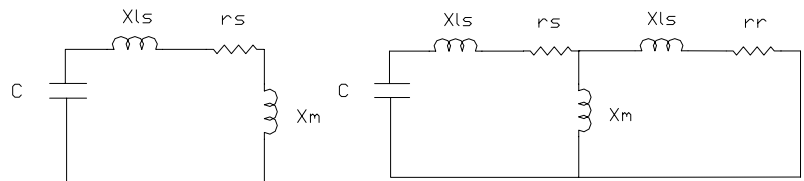
۲- سپس با برقراری جریان در روتور و استاتور، بصورت ماشین آسنکرون عمل کرده و ولتاژ ترمینال به مقدار قابل ملاحظه و معینی افزایش می یابد، این مرحله را مد آسنکرون می نامند.

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 به نظر 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 آسنکرونی جریان روتور صفر است یا به عبارت دیگر لغزش خیلی کوچک و نزدیک صفر بوده و به عبارت دیگر لحظه شروع راه اندازی مشابه لحظه بی باری ماشین القایی است.

با توجه به توضیحات فوق به طور خلاصه می توان گفت ماشین به صورت آلترناتور مغناطیس دائم شروع به کار می کند. شکل (۳-۴الف) سپس به ماشین آسنکرون

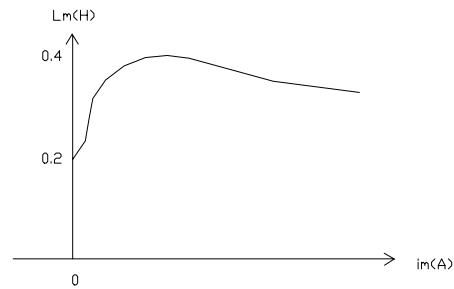
شکل (۳-۴) ب) سوئیچ می‌کند. حالت گذرا به پارامترهای ماشین، سرعت روتور و اندازه خازن تحریک بستگی دارد. فرض می‌شود تمام پارامترهای مدار به جز اندوکتانس مغناطیس کننده ثابت هستند.



(۳-۴) الف

(۳-۴) ب

تغییرات این اندوکتانس در شکل (۳-۵) نشان داده شده است. افت در اندوکتانس L_m به ازای جریانهای مغناطیس کننده بیشتر به خوبی معلوم بوده و تعیین کننده ولتاژ حالت پایدار نهایی است. کوچک بودن L_m در جریانهای بسیار پایین مهم است. چرا که روی مشخصات تحریک خودی اولیه بسیار تعیین کننده می‌باشد.



شکل (۳-۵) تغییرات اندوکتانس مغناطیس کننده با جریان

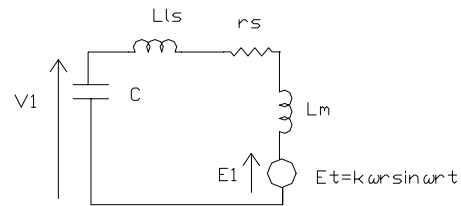
۱-۳-۱-۳ بررسی های تئوریک

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

۱- مد سنکرون: مدار معادل شکل (۳-۴الف) فرم یک مدار رزونانسی را دارد که تابع محرک 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 برحسب 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 توزیع فلوی

پسماند در روتور، مقدار نسبتاً بالای ضریب نفوذ مغناطیسی آهن نرم و انحراف از عملکرد خطی می باشد.



شکل (۶-۳)

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 اگرچه تفاوت سطح اشباع در جهت عمود و موازی با محور پسماند مغناطیسی، برجستگی مغناطیسی بوجود می آورد، ولی این اثر فقط در سرعتهای پایین روتور که منجر به گذرای سنکرون می گردد، مهم است.

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

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

که ω_r فرکانس سنکرون متناسب با سرعت روتور، $k = \frac{V_{oc}}{\omega_0}$ متناسب با دانسیته فلوی

پسماند مغناطیسی در روتور و V_{oc} ولتاژ مدار باز در فرکانس نامی ω_0 می باشد. با

توجه به رابطه (۳-۴) در این مدار پاسخ نرمال مدار رزنانس به تابع محرک ورودی توسط اندوکتانس مغناطیسی غیرخطی Lm و تغییر در دامنه تابع محرک با سرعت روتور (ωr) تحت تأثیر قرار می گیرد. یعنی براساس رابطه (۳-۴) با استفاده از مقدار Lm از شکل (۳-۵) و پارامترهای ماشین مجموعه ای از نقاط کار سنکرون بدست می آید.

باید توجه کرد که منحنی های فوق به همراه منحنی های مد آسنکرون می تواند نسبت به سرعت ماشین با تغییر مقدار خازن متصله جابجا شوند محدوده ۱ تا ۱/۴ برابر سرعت پایه مناسب برای موتور محرک ماشین القایی می باشد. این محدوده سرعت با افزایش خازن براحتی کاهش می یابد.

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

$$i_s = \text{Re}(I_s \exp(mt))$$

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

$$i_r = \text{Re}(I_r \exp(m-jv)t)$$

که I_r جریان روتور (کمیت مختلط) و v سرعت الکتریکی روتور است. توجه شود که به دلیل یکسان بودن میرایی فقط قسمت موهومی فرکانس مختلط به اندازه jv تغییر می کند. با استفاده از قوانین کیرشهف برای کمیت های ضروری می توان نوشت:

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

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

با حل معادلات 3-7 و 3-8 می توان I_r را بدست آورد.

$$[\{m^2 c (L_s + L_m) + mcr_s + 1\} \{-r_s - (m-jv)(L_r + L_m)\} m^2(m-jv) cLm^2] I_r = 0$$

(3-9)

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

$$\left(\frac{m}{\omega}\right)^3 [(X_r + X_m)(X_s + X_m) - X_m^2] + \left(\frac{m}{\omega}\right)^2 [(X_s + X_m)r_r + (X_r + X_m)r_s -$$

$$-jv \{(X_r + X_m)(X_s + X_m) - X_m^2\}] + \left(\frac{m}{\omega}\right) [r_s r_r + X_c(X_r + X_m) -$$

$$-jp(X_r + X_m)r_s] + X_c[r_r - jp(X_r + X_m)] = 0 \quad (3-10)$$

ریشه های معادله درجه سه شرایطی را تعریف می کند که تحت آن کارکرد ماشین

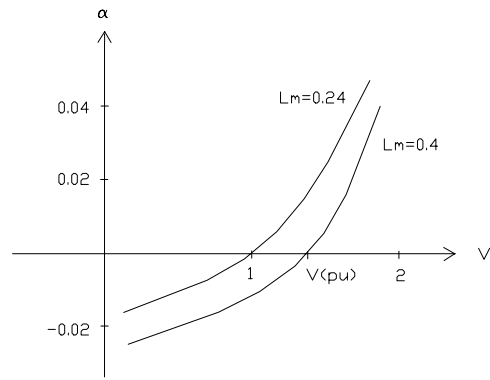
آسنکرون ممکن گردد. با حل این معادله همیشه دو ریشه با قسمت حقیقی منفی

بدست می آید که در اینجا مورد توجه نیست.

ولی ریشه سوم قسمت حقیقی (α) دارد که می توان + یا - یا صفر باشد و در واقع

این ریشه تعیین می کند که جریان روتور جریان ولتاژ استاتور کم یا زیاد می شود یا

ثابت می ماند.

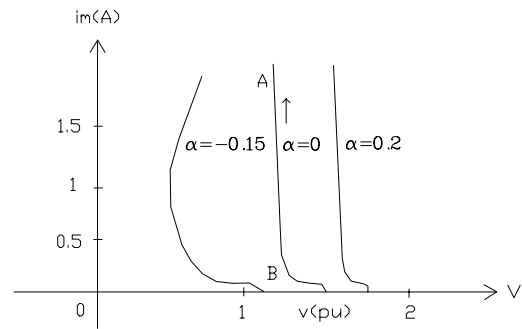


شکل (۸-۳) منحنی تغییرات α برحسب سرعت به ازای دو مقدار اندوکتانس مغناطیسی L_m

شکل (۸-۳) منحنی تغییرات قسمت حقیقی α برحسب سرعت ماشین را به ازای L_m های مختلف نشان می دهد. سرعت رزنانس در $\alpha=0$ اتفاق می افتد. 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 خازن ترمینال کاهش می یابد.

حال براساس مقدار L_m از منحنی (۵-۳) می توان منحنی های پارامتری جریان و سرعت ماشین را برحسب α بدست آورد.

با توجه به توضیحاتی که دادیم کار دائمی ماشین آسنکرون در یک نقطه رزنانس یعنی $\alpha=0$ باید باشد. به عبارت دیگر با صفر شدن α به حالت کار دائمی می رسد.



شکل (۹-۳) نقاط کار ممکن ژنراتور القایی در مد آسنکرون به ازای پارامتر α

همانطور که از شکل (۹-۳) مشهود است در یک سرعت خاص دو نقطه کار (A,B) که در این معیار صدق می کند وجود دارد. نقطه A بیانگر حالتی است که ماشین به طور کامل تحریک شده است ولی B نقطه کار ناپایدار است، بطوریکه تغییر در سرعت باعث خروج از رزونانس می گردد. افزایش سرعت باعث تحریک خودی شده به نحوی که رزونانس دوباره در A بدست می آید. درحالیکه کاهش آن منجر به برگشت ماشین به مد سنکرون خواهد شد.

۲-۳ نکات عملی در راه اندازی ژنراتور القایی:

بهنگام راه اندازی ژنراتور القایی ایزوله، مهمترین مشکل تضمین تحریک خودی است، چرا که ماشین در موقع شتاب روتور از سکون پسماند نامعلومی دارد. پسماند مغناطیسی را می توان با یک منبع ولتاژ مدل کرد که تابع سرعت روتور است. بنابراین می توان حدس زد که شتاب روتور نیز در پدیده تحریک خودی اثر دارد. از

آنجا یکه نرخ تغییر پسماند روتور توسط هدایت بالای روتور محدود می گردد، پس هنگام تغییر موقعیت روتور، باید پسماند مغناطیسی یک مدت زمان کافی دوام داشته باشد تا تحریک خودی تضمین شود. بنابراین می توان گفت اگر سرعت روتور به آهستگی تغییر کند احتمال عدم تحریک زیادتر می شود.

از طرف دیگر در مد آسنکرون با برقراری جریان بیشتر، پسماند در اثر تغییر زیاد زاویه δ کاهش می یابد. بنابراین نوسان آهسته زاویه بار متناسب با شتاب پایین روتور خواهد بود. از این رو با آزمایش عملی می توان به بررسی اثر شتاب روتور پرداخت.

این آزمایش شامل به حرکت درآوردن روتور از حال سکون با شتاب ثابت و مختلف a می باشد.

پسماند مغناطیسی القایی با دو مکانیزم زیر قابل تغییر است:

۱- در شتاب بالا a جریانهای آسنکرون ظاهر می شود اما ممکن است با جریان های سنکرون تداخل داشته باشد.

۲- در شتابهای ثابت a کم، اثر عکس العمل آرمیچر ایجاد شده توسط زاویه بار خاصیت مغناطیسی را کاهش می دهد و تا سرعت های پایین، ماشین را زیر ناحیه مد آسنکرون نگه می دارد.

برای راه اندازی مطمئن باید به توصیه های زیر توجه کرد:

از آنجاییکه وجود خازن می تواند باعث کاهش پسماند مغناطیسی شود و هربار متصل به ماشین نیز قطعاً پسماند مغناطیسی را از بین می برد پس برای بهبود راه اندازی توصیه می شود که بعد از رسیدن روتور به سرعت نهایی خازنها باز شود و تا قبل از تحریک کامل ماشین وصل نشود. علاوه بر این، کاربرد یکی از چهار روش زیر می تواند ضریب اطمینان راه اندازی را افزایش دهد.

الف - قبل از به حرکت درآوردن ماشین جریان مستقیمی (DC) از استاتور عبور داده شود. در این حالت پس ماند مغناطیسی کافی تضمین می شود.

ب - خازنهای باردار به ترمینالهای ماشین وصل شود. اگر خازنها دارای ولتاژ اولیه 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 کند و بنابراین تحریک خودی شروع می شود.

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. به همین دلیل در ماشینهایی که نسبت اندوکتانس مغناطیس کننده خطی به اندوکتانس مغناطیسی در جریان های کوچک عددی بزرگ باشد (در حدود ۵:۱) این دو روش را عملاً نمی توان

به کار برد. بنابراین دو روش فوق را فقط در ماشینهای کوچک که نسبت فوق در حدود ۲:۱ است می توان استفاده کرد.

فصل چهارم

مثالهایی از حالت های گذرا در ژنراتور القایی:

در آخرین فصل، نمونه هایی از حالت های گذرا بررسی می شود که در اثر اتصال بار به ژنراتور و وقوع اتصال کوتاه در ترمینال های آن بوجود می آید. ماشین بکاررفته در تمام بررسیهای زیر همان ماشین بخش قبلی می باشد.

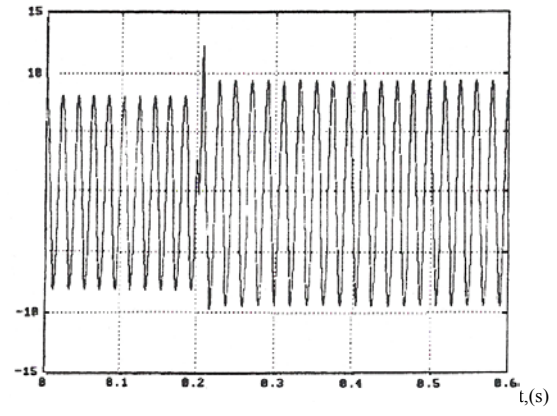
۱-۴ اتصال بار اهمی به ژنراتور القایی

فرض می کنیم ماشین القایی با سرعت سنکرون بهمراه بانک خازنی متصل به ترمینالهای استاتور، چرخانده شده و تحریک خودی ماندگار بدست آمده است. در این حالت به طور ناگهانی در زمان 2. $t=0$ ثانیه یک بار ستاره ۲۷ اهمی به ترمینالهای ژنراتور وصل می گردد. تغییرات کمیت‌های الکتریکی در شکل های (۱-۴) و (۲-۴) نشان داده شده است. شکل (۱-۴) شامل متغیرهای محور d ، جریان و اندوکتانس مغناطیس کننده می باشد.

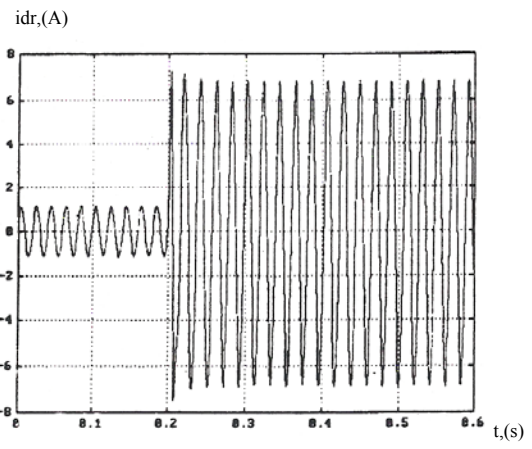
همانطوریکه از این شکل مشاهده می شود با اتصال بار اهمی جریانهای d استاتور و روتور به جهت تزریق توان افزایش می یابد. ولی ولتاژ V_{ds} افت پیدا می کند. نکته قابل توجه این است که وجود بار باعث می شود میزان تغییرات جریان روتور بیشتر از استاتور باشد. براساس توضیحات قبلی می توان پیش بینی کرد که \dot{I}_m در اثر خاصیت ضد مغناطیسی بار کاهش خواهد یافت. شکل (۱-۴) تغییرات \dot{I}_m را در پیوند گذرا نشان می دهد. نحوه تغییرات L_m نیز در همین شکل آورده شده است.

شکل ۱-۴ تغییر کمیات $i_m, L_m, i_{ds}, i_{dr}, v_{ds}$ بهنگام اضافه شدن بار $R=27 \Omega$

$i_{ds}(A)$

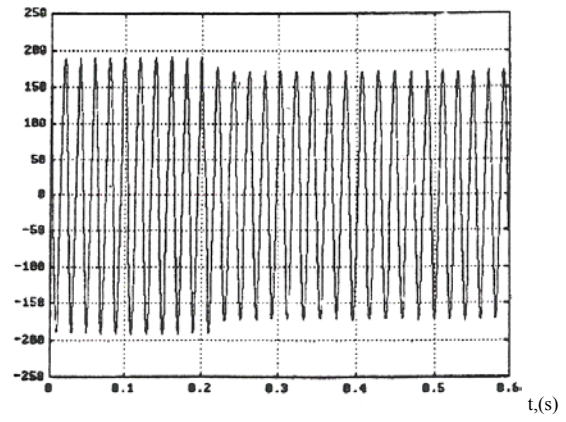


شکل ۴-۱-الف- تغییرات i_{ds} با زمان



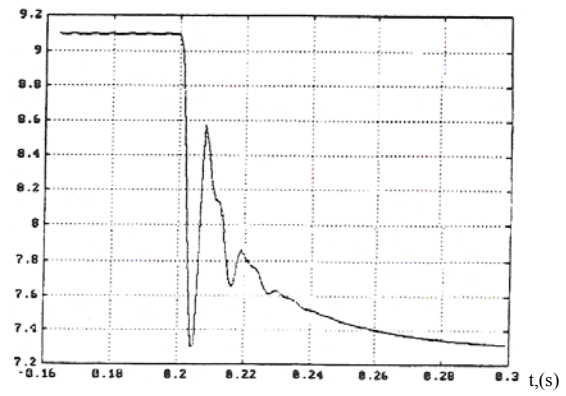
شکل ۴-۱-ب- تغییرات i_{dr} با زمان

$V_{ds}(V)$



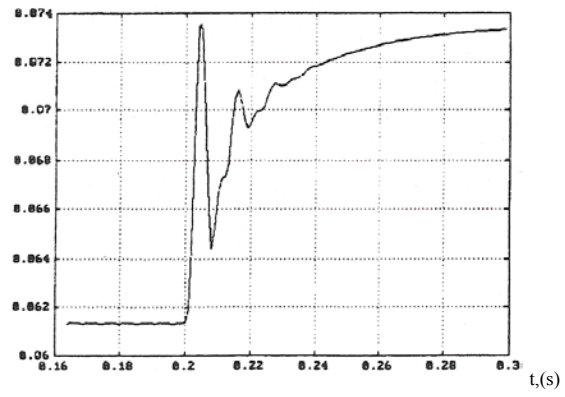
شکل ۴-۱-پ- تغییرات vds با زمان

im(A)



شکل ۴-۱-ت- تغییرات im با زمان

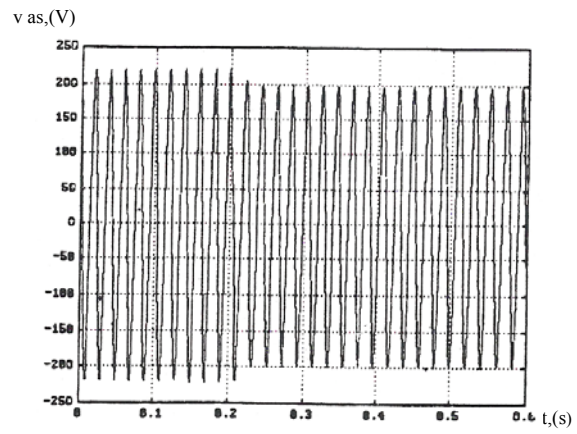
Lm(H)



شکل ۴-۱-ث- تغییرات L_m با زمان

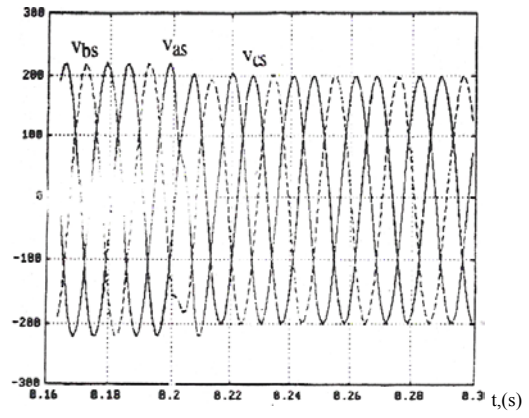
شکل ۴-۲- تغییر جریانها و ولتاژهای استاتور و جریان روتور بهنگام اضافه شدن ناگهانی بار

$$R=27 \Omega$$



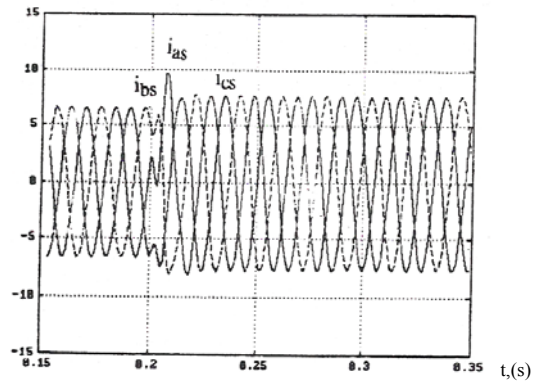
شکل ۴-۲- الف- تغییرات v_{as} با زمان

v_{as}, v_{bs}, v_{cs}



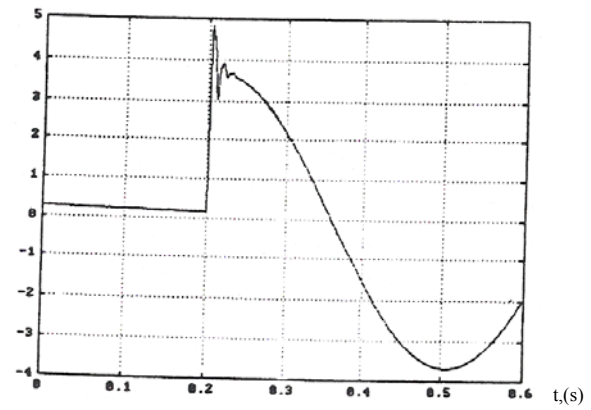
شکل ۴-۲-ب- تغییرات v_{as} , v_{bs} , v_{cs} با زمان

i_{as} , i_{bs} , i_{cs}



شکل ۴-۲-پ- تغییرات i_{as} , i_{bs} , i_{cs} با زمان

i_{ar}



شکل ۲-۴-ت- تغییرات i_{ar} با زمان

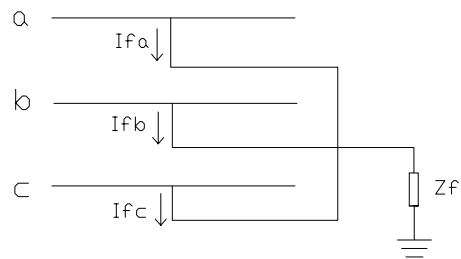
شکل (۲-۴) حالت های گذرای بوجود آمده در i_{ar} , i_{as} , i_{ar} را نشان می دهد. در اینجا بد نیست به این موضوع اشاره شود که اختلاف نتایج عملی با نتایج کامپیوتری بطور عمده ناشی از دو عامل خواهد بود.

۱- وجود جریانهای گردابی در هسته آهن

۲- عدم اتصال همزمان بار ستاره به سه فاز ژنراتور

بنابراین بخاطر عوامل فوق تفاوتی در نتایج عملی و تئوری وجود خواهد داشت.

۲-۴ اتصال کوتاه سه فاز متقارن



برای اتصال کوتاه سه فاز متقارن در لحظه وقوع خطا و بعد از آن داریم:

$$V_{as} = V_{bs} = V_{cs} = 0 \rightarrow V_{ds} = 0, V_{qs} = 0$$

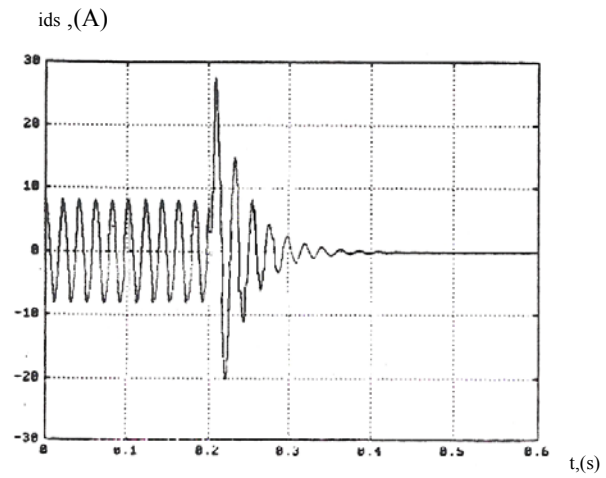
شکلهای (۳-۴) و (۴-۴) نتایج شبیه سازی جریانها و ولتاژها، سرعت روتور، گشتاور مغناطیسی و توان حقیقی ژنراتور القایی را نشان می دهد.

از شکل (۳-۵) مشاهده می شود که بعد از وقوع اتصال کوتاه دامنه جریانهای i_{dr} , i_{ds} شدیداً افزایش یافته و در طی 0.2 ثانیه به صفر میل می کند. ولتاژ V_{ds} نیز بعد از افزایش کمی در همان مدت زمان صفر می گردد. 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 $T_m = 0.0348 \text{ N.m}$ باقی بماند. بنابراین باید معادله مکانیکی گشتاور در نظر گرفته شود و در هر فاصله زمانی Δt سرعت ωr مربوطه محاسبه گردد.

همانطوریکه از شکل (۳-۴) ملاحظه می شود سرعت ابتدا تغییر زیادی پیدا می کند ولی بتدریج با گذشت زمان نرخ رشد آن کمتر می گردد. گشتاور T_e به جهت تغییرات سریع جریانها، نوسانات گذرای بزرگی تولید می کند و بعلت مثبت بودن، با

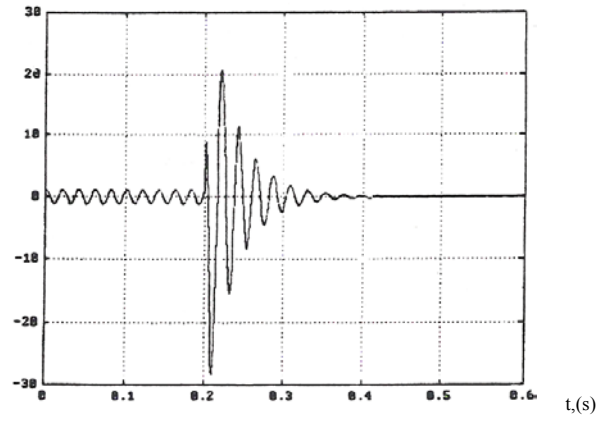
جهت گردش روتور مخالفت می کند. پس در لحظات بعد از اتصال کوتاه ماشین قبل از شتاب گرفتن، آهسته می شود. این مسئله را در ژنراتور سنکرون نوسان برگشتی می نامند.

شکل ۳-۴- تغییر کمیات i_{ds} , v_{ds} , i_{dr} , ω_r , i_m , T_e بهنگام اتصال کوتاه سه فاز متقارن



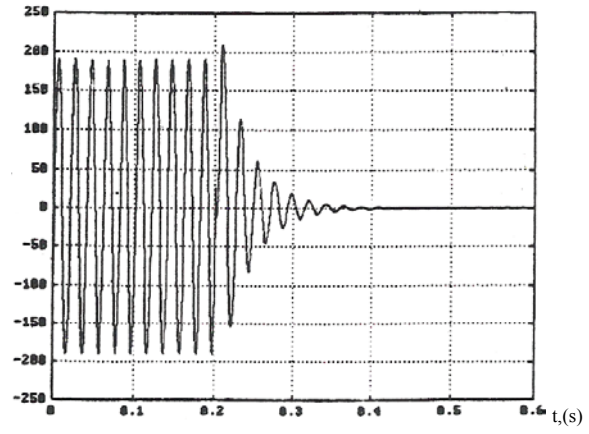
شکل ۳-۴- الف- تغییرات i_{ds} با زمان

$i_{dr}(A)$



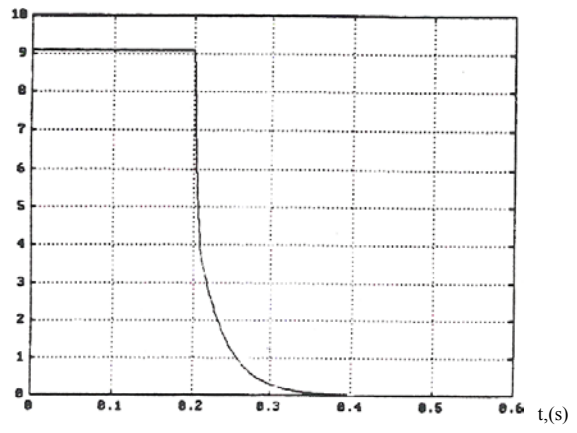
شکل ۴-۳-ب- تغییرات i_{dr} با زمان

v_{ds} , (V)



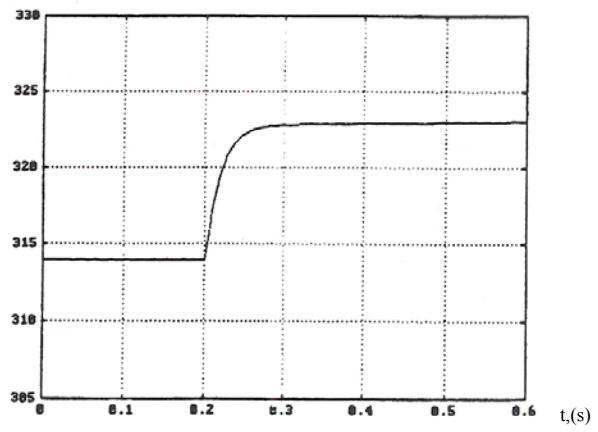
شکل ۴-۳-پ- تغییرات v_{ds} با زمان

i_m , (A)



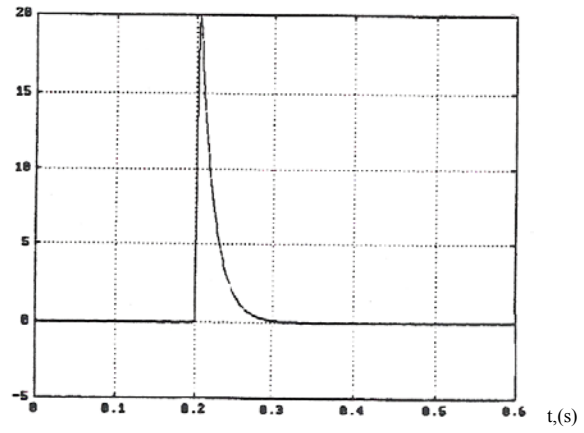
شکل ۳-۴-ت- تغییرات i_m با زمان

ω_r (rad/s)



شکل ۳-۴-ث- تغییرات ω_r با زمان

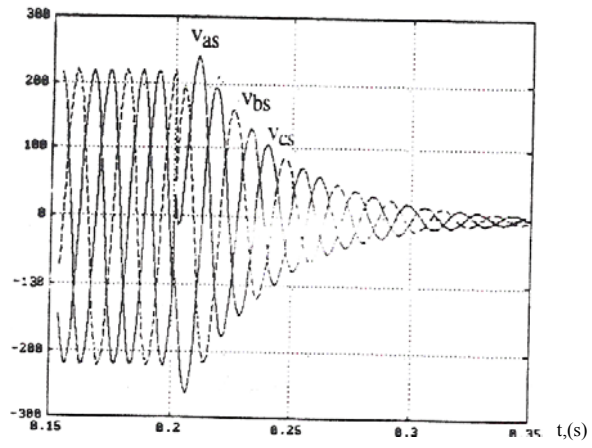
T_e (n.m)



شکل ۴-۳-ج- تغییرات T_e با زمان

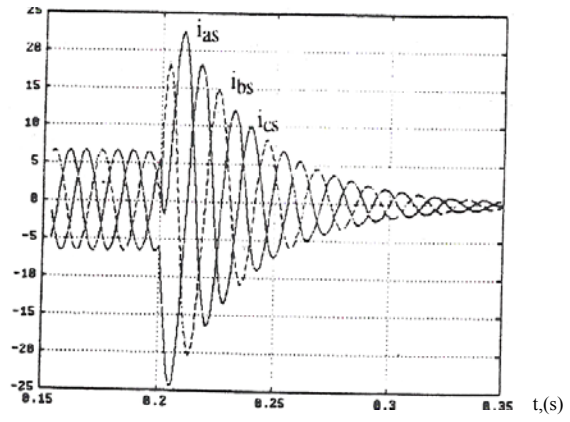
شکل ۴-۴- تغییر جریانها و ولتاژهای استاتور و جریان روتور بهنگام اتصال کوتاه سه فاز متقارن

v_{cs}, v_{bs}, v_{as}

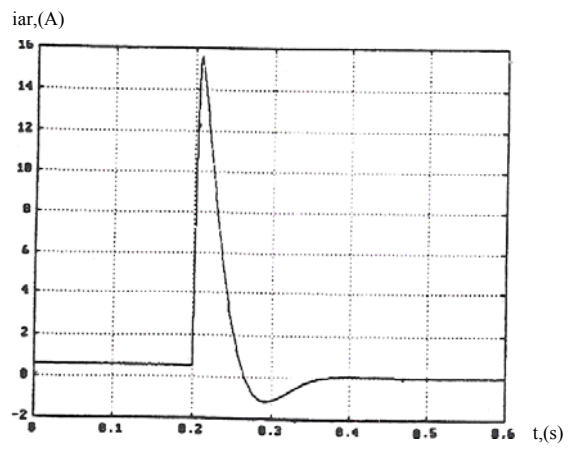


شکل ۴-۴- الف- تغییرات v_{cs}, v_{bs}, v_{as} با زمان

i_{cs}, i_{bs}, i_{as}



شکل ۴-۴ ب- تغییرات i_{cs} , i_{bs} , i_{as} با زمان

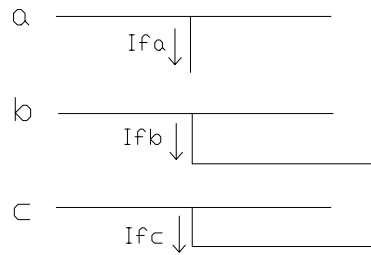


شکل ۴-۴ پ- تغییرات i_{ar} با زمان

شکل (۴-۴) تغییرات جریانها و ولتاژ سه فاز استاتور و i_{ar} را نشان می دهد.

همانطوریکه ملاحظه می شود جریانهای استاتور در حالت گذرا به دو تا سه برابر مقدار نامی می رسند که می تواند از نظر حرارتی مشکلاتی را بوجود آورد. جریان روتور نیز بهنگام اتصال کوتاه فوق العاده زیاد شده ولی در مدت زمان کوتاهی به مقادیر پائین نیز کاهش می یابد. توان حقیقی P نیز بعد از اتصال کوتاه صفر می گردد درحالیکه T_e دارای نوساناتی است.

از شکل های فوق نتیجه می شود که بعد از پریود کوتاه گذرا، جریانها و گشتاور به صفر میل کرده و ژنراتور تحریک خود را از دست می دهد. به عبارت دیگر می توان گفت ژنراتور القایی دارای اتصال کوتاه سه فاز، پایداری خودش را از دست خواهد داد.



برای اتصال کوتاه بوجود آمده روی دو فاز b,c داریم:

$$V_{bs} = V_{cs} \quad (4-2)$$

و چون

$$V_{as} + V_{bs} + V_{cs} = 0 \quad ; \quad i_{os} = 0 \quad , \quad V_{os} = 0$$

پس می توان نتیجه گرفت:

$$V_{bs} = V_{cs} = -\frac{1}{2}v_{as} \Rightarrow V_{abcs} = [V_{as} - \frac{1}{2}v_{as} - \frac{1}{2}V_{as}]^T \quad (4-3)$$

با تبدیل بردار ولتاژ V_{abcs} خواهیم داشت:

$$V_{odqs} = [0 \quad (\frac{3}{2})^{\frac{1}{2}}V_{as} \quad 0]^T$$

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 (۴-۵) و (۴-۶) نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. بعلت عدم تقارن در شرایط اتصال کوتاه، شکل موجهای جریانها و ولتاژهای محور d, q متفاوت بوده و همه آنها در شکل (۴-۵) آورده شده است.

همانطوریکه مشاهده می‌شود تغییرات در محور d شدیدتر از محور q می‌باشد. شکل (۴-۶) شامل تغییرات T_e, ω_r, i_m , جریانها و ولتاژهای سه فاز استاتور و i_{ar} می‌باشد. جریان مغناطیس‌کننده i_m در حالت گذرا نوساناتی داشته و نهایتاً به صفر می‌رسد، ولی درست بعد از وقوع اتصال کوتاه مقدار بیشتری از حالت ماندگار پیدا می‌کند.

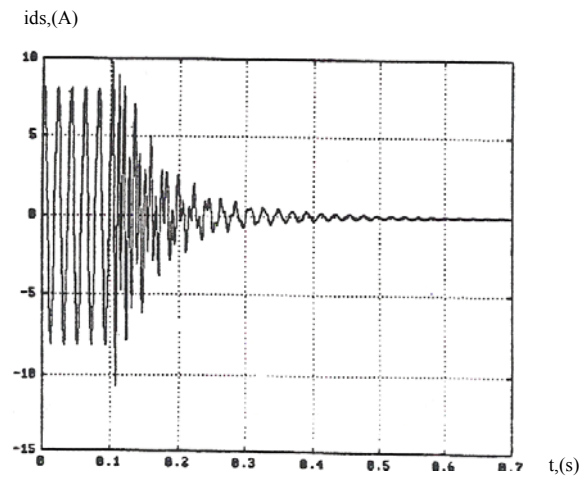
در اینجا نیز گشتاور مغناطیسی در طول اغتشاش در مقدار حالت ماندگار ثابت نگه داشته می‌شود.

اگر به تغییرات سرعت در این شکل توجه شود می‌بینیم که سرعت با نرخ کمتری نسبت به اتصال کوتاه سه فاز افزایش می‌یابد.

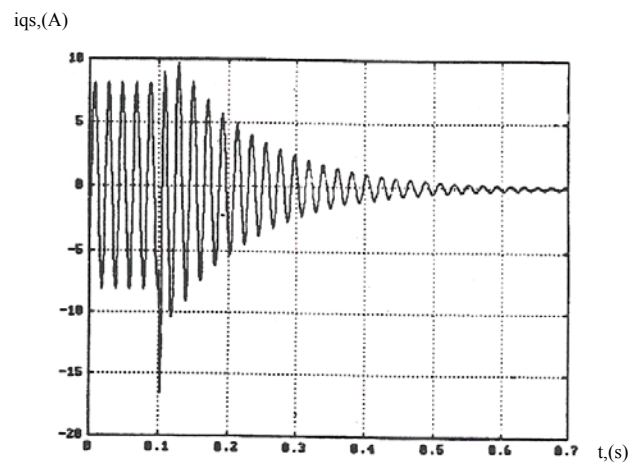
در رابطه با جریانها نیز توجه شود که جریان اتصال کوتاه i_{bs} سریعاً به صفر نرسیده و برای چند سیکل با i_{cs} مخالفت می‌کند. جریان روتور هم دارای نوساناتی

است که نسبت به حالت اتصال کوتاه سه فاز نیز متفاوت می‌باشد. ولی در کل، دامنه جریانها در پریود گذرا کمتر از حالت سه فاز است. گشتاور الکترومغناطیسی و توان حقیقی نیز دارای نوساناتی هستند که بتدریج به صفر میل می‌کند.

شکل ۴-۵ - تغییر کمیات i_{ds} , v_{ds} , i_{qr} , i_{dr} , v_{qs} , i_{qs} بهنگام اتصال کوتاه دو فاز

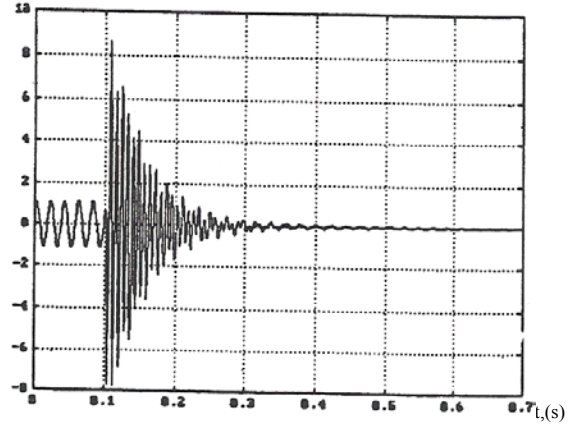


شکل ۴-۵ - الف - تغییرات i_{ds} با زمان



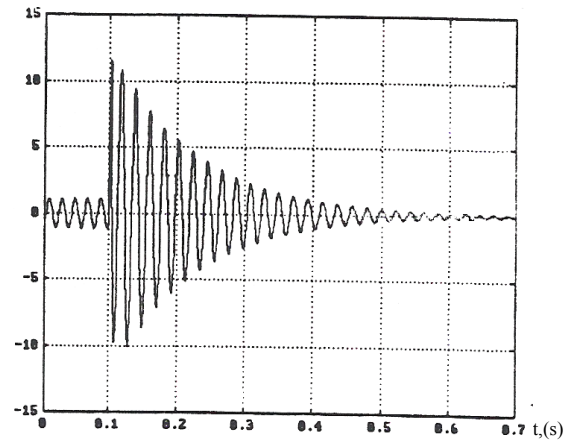
شکل ۴-۵ - ب - تغییرات i_{qs} با زمان

$i_{dr}(A)$



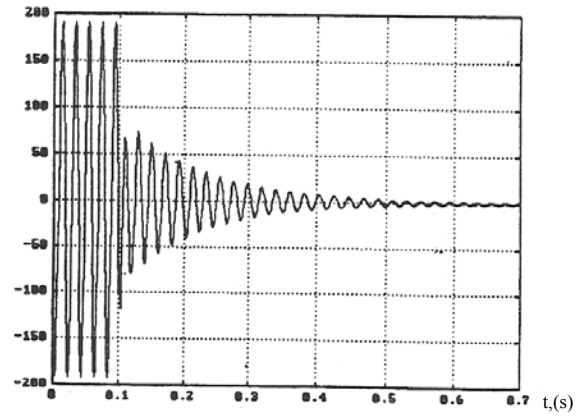
شکل ۴-۵ - پ- تغییرات i_{dr} با زمان

$i_{qr}(A)$

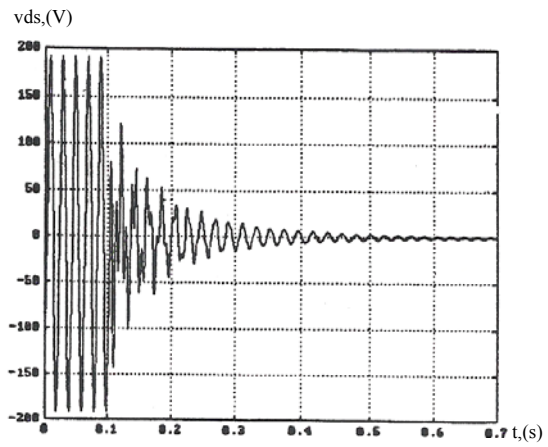


شکل ۴-۵ - ت- تغییرات i_{qr} با زمان

$v_{qs}(V)$



شکل ۴-۵ - ث- تغییرات v_{qs} با زمان

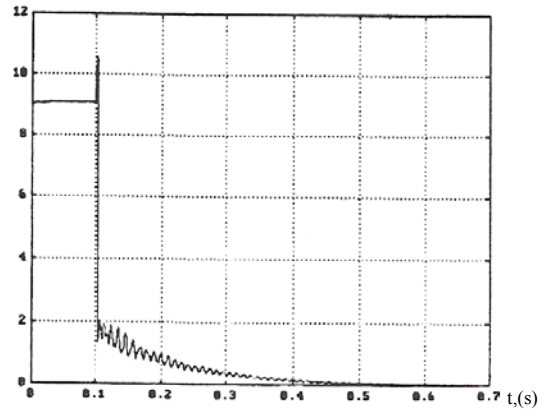


شکل ۴-۵ - ج- تغییرات v_{ds} با زمان

شکل ۴-۶ - تغییرات کمیات ω_r , i_m , T_e جریانهاو ولتاژهای استاتور و i_{ar} بهنگام اتصال کوتاه

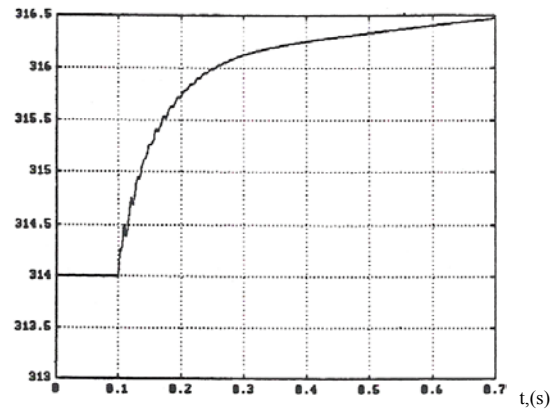
i_m , (A)

دو فاز



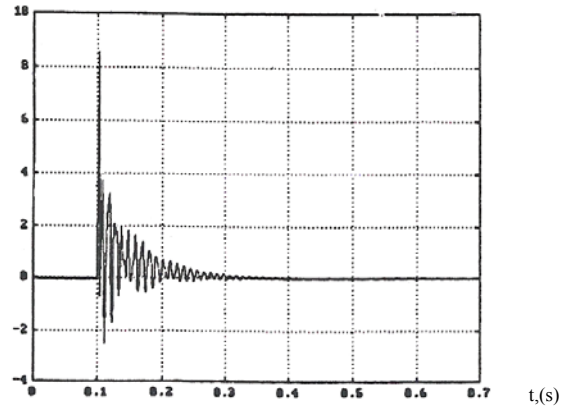
شکل ۴-۶ - الف - تغییرات i_m با زمان

ω_r (rad/s)

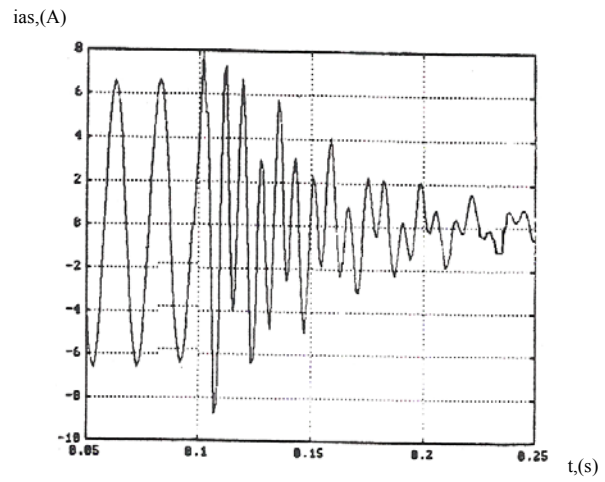


شکل ۴-۶ - ب - تغییرات ω_r با زمان

T_e (n.m)

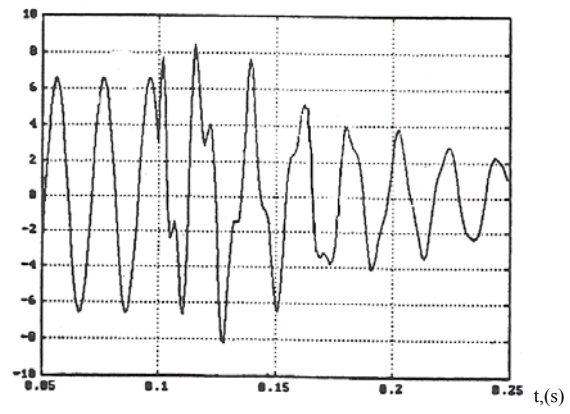


شکل ۴-۶ - پ- تغییرات T_e با زمان



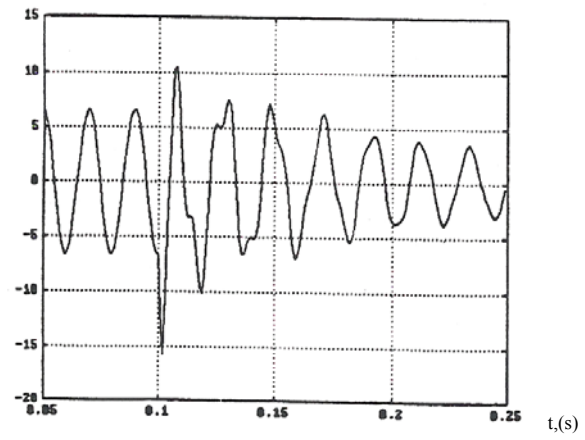
شکل ۴-۶ - ت- تغییرات i_{as} با زمان

i_{bs} (A)



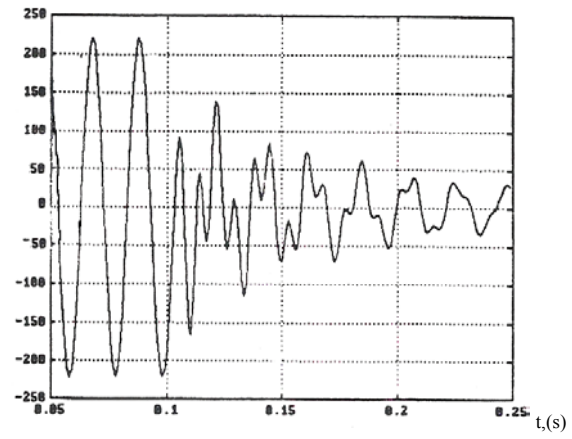
شکل ۴-۶ - ث - تغییرات i_{BS} با زمان

$i_{CS}(A)$



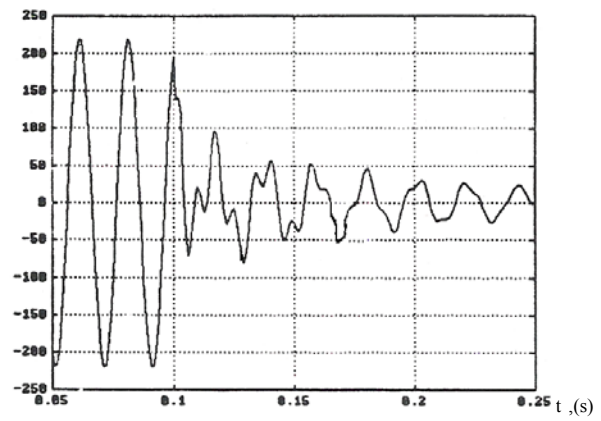
شکل ۴-۶ - ج - تغییرات i_{CS} با زمان

$v_{as}(V)$



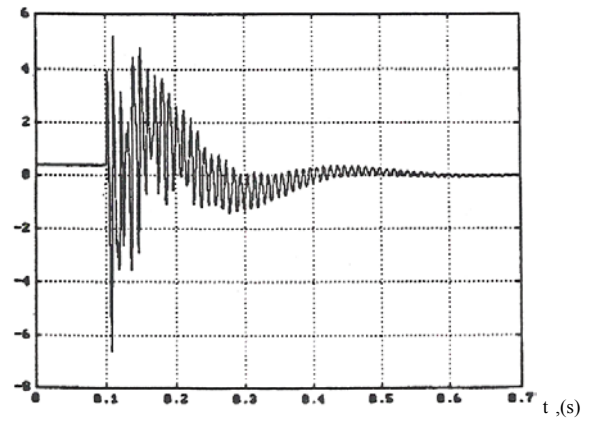
شکل ۴-۶ - ج - تغییرات v_{bs} با زمان

$v_{bs}(V)$



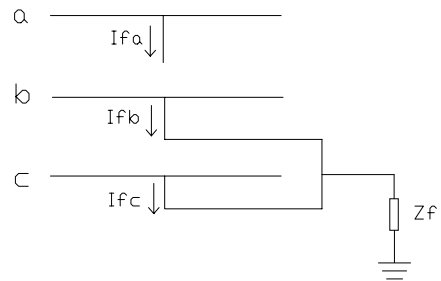
شکل ۴-۶ - خ - تغییرات v_{bs} با زمان

$i_{ar}(A)$



شکل ۴-۶-ح- تغییرات i_{ar} با زمان

۴-۴- اتصال کوتاه دو فاز به زمین



برای اتصال کوتاه دوفاز c و b به زمین داریم:

$$V_{bs} = V_{cs} = 0 \Rightarrow v_{abcs} = [V_{as} \quad 0 \quad 0]^T \quad (4-4)$$

با تبدیل بردار ولتاژ V_{abcs} خواهیم داشت:

$$V_{odqs} = \left[\frac{V_{as}}{(3)^{\frac{1}{2}}} \quad \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} V_{as} \quad 0 \right]^T$$

بنابراین در اعمال شرایط فوق نسبت به حالت ماندگار کافی است در زمان اتصال

کوتاه و بعد از آن $V_{qs}=0$, $V_{ds}=\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} V_{as}$, قرار داده شود. نتایج این شبیه سازی

بسیار نزدیک به حالت قبل است.

شکل‌های (4-7) و (4-8) این نتایج را نشان می دهند. در اینجا نیز بعلت عدم تقارن در

شرایط اتصال کوتاه شکل موجهای جریان ها و ولتاژهای محور d, q, در شکل (4-7)

آورده شده است. با توجه به این شکل می توان گفت که تغییرات گذرا در محور d

شدیدتر از محور q است.

شکل (4-8) شامل تغییرات i , ωr , T_e جریانه‌ها و ولتاژهای سه فاز استاتور و i_{ar} می

باشد. جریان مغناطیس کننده i_m در پیوند گذرا نوساناتی داشته ولی دامنه نوسانات

کمتر از حالت قبل است و مقدار ماکزیمم بعد از اتصال کوتاه نیز کمتر می باشد. در

اینجا نیز گشتاور مکانیکی در مقدار $T_m = 0.348 \text{ N. m}$ در طول اغتشاش نگه

داشته می شود.

بنابراین تغییرات ωT را می توان بدست آورد. همانطوریکه از شکل (۸-۴) معلوم است نرخ تغییرات ωT در این حالت بیشتر از حالت قبلی می باشد.

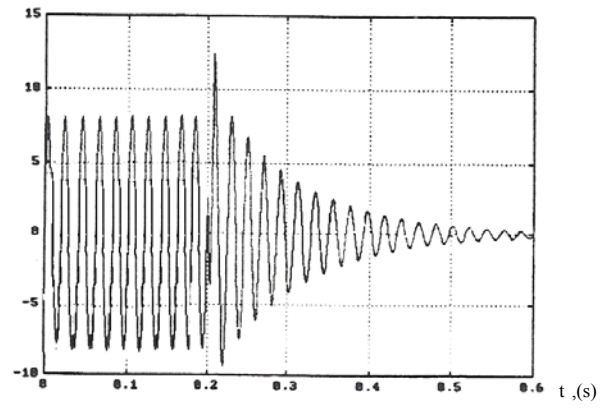
گشتاور الکترومغناطیسی نیز در مدت گذرا دارای نوساناتی است که شدیدتر از حالت قبل می باشد.

تغییرات جریانهای سه فاز استاتور نشان می دهد که دامنه \dot{I}_{cs} بعد از اتصال کوتاه بیشتر از سایر فازها است. ولی توجه نمائید که جریان لحظه ای بستگی به زاویه اتصال کوتاه دارد. بنابراین ماکزیمم مقدار جریانهای اتصال کوتاه مشاهده شده کاملاً قطعی نیست.

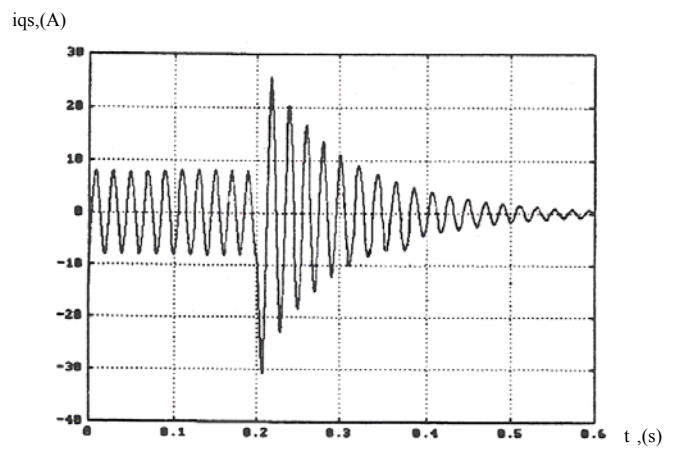
همچنین این شکل نوسانات T_e , i_{ar} برحسب ωT جهت مطالعه بیشتر آورده شده است.

شکل ۷-۴- تغییر کمیات i_{qs} , v_{qs} , i_{qr} , i_{dr} , v_{ds} , i_{ds} بهنگام اتصال کوتاه دو فاز به زمین

$i_{ds}(A)$

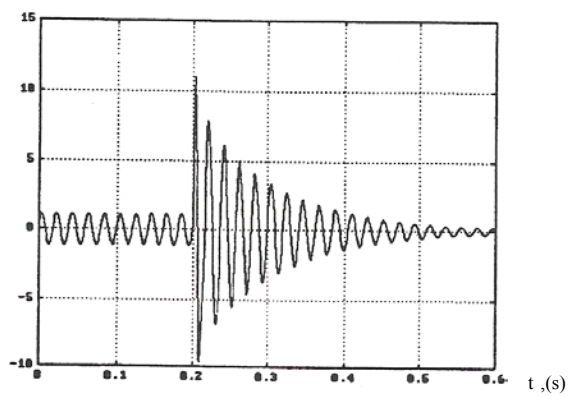


شکل ۴-۷ - الف - تغییرات i_{ds} با زمان

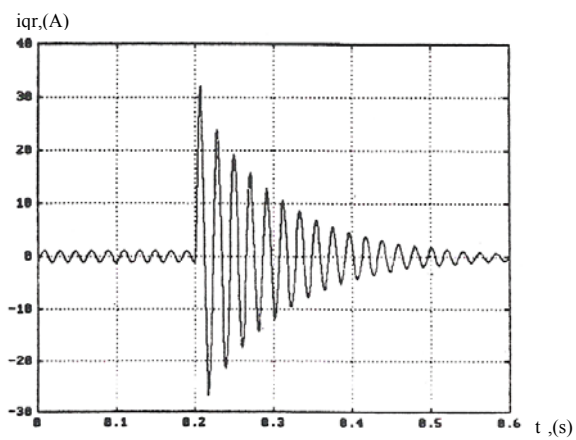


شکل ۴-۷ - ب - تغییرات i_{qs} با زمان

i_{dr} (A)

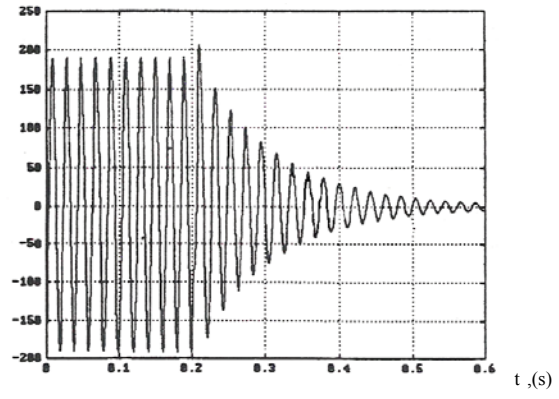


شکل ۷-۴ - پ- تغییرات i_{Dr} با زمان

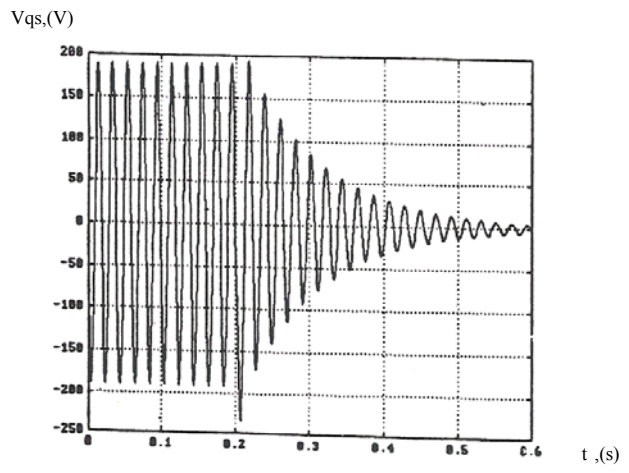


شکل ۷-۴ - ت- تغییرات i_{qr} با زمان

$V_{ds}(V)$



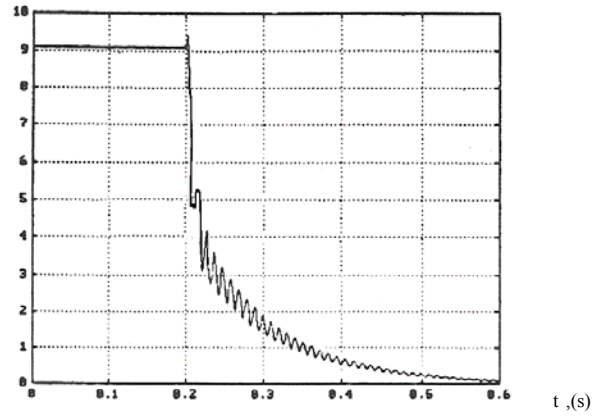
شکل ۷-۴ - ث- تغییرات v_{ds} با زمان



شکل ۷-۴ - ج- تغییرات v_{qs} با زمان

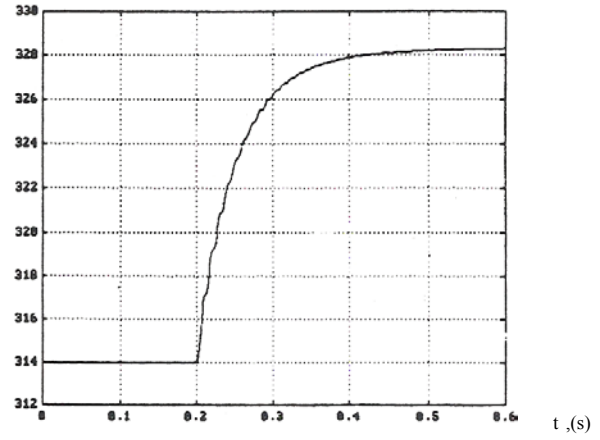
شکل ۸-۴ - تغییرات کمیات ω_r , i_m , T_e جریانهاو ولتاژهای استاتورو جریان i_{ar}

$i_m(A)$



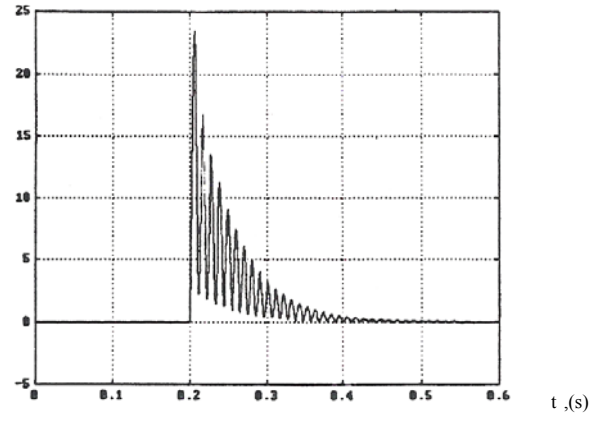
شکل ۴-۸ - الف - تغییرات i_m با زمان

$\omega_r(\text{rad/s})$



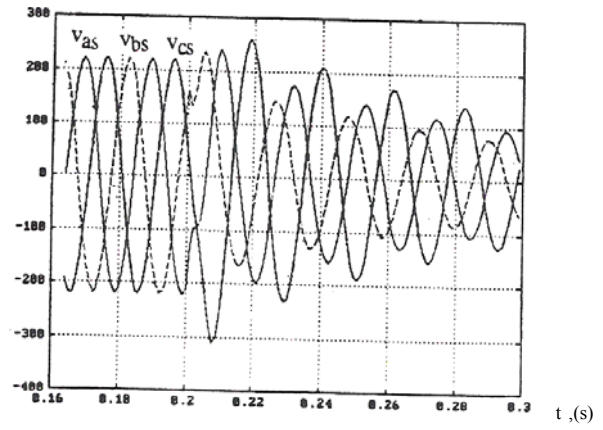
شکل ۴-۸ - ب - تغییرات ω_r با زمان

$T_e(\text{n.m})$



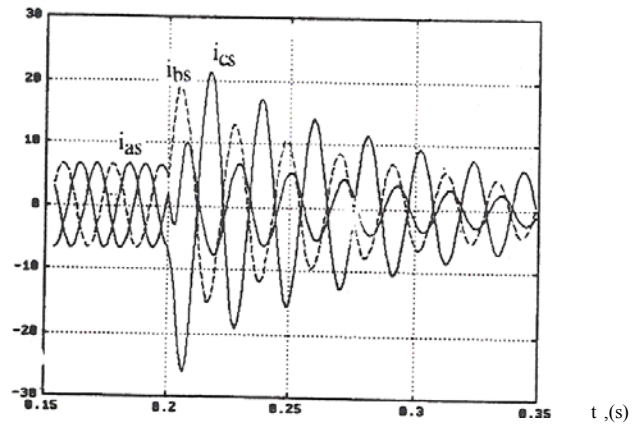
شکل ۴-۸ - پ- تغییرات T_e با زمان

V_{cs}, v_{bs}, v_{as}

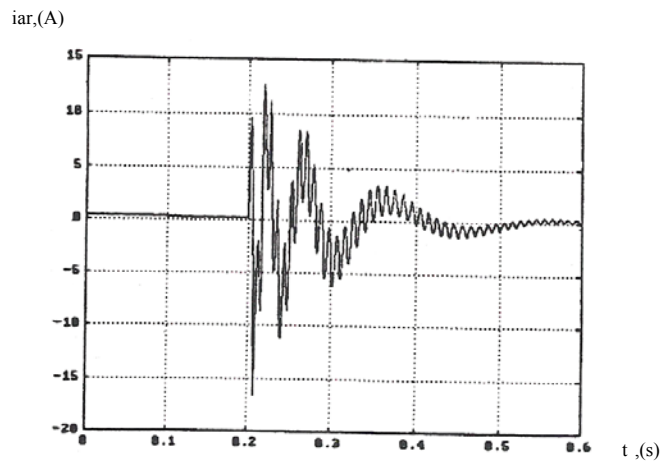


شکل ۴-۸ - ت- تغییرات V_{cs}, v_{bs}, v_{as} با زمان

i_{cs}, i_{bs}, i_{as}

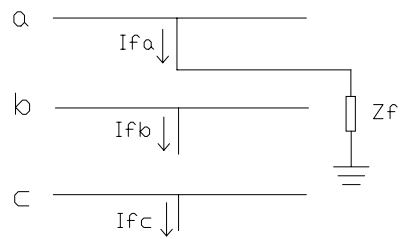


شکل ۴-۸ - ث- تغییرات i_{cs}, i_{bs}, i_{as} با زمان



شکل ۴-۸ - ج- تغییرات i_{ar} با زمان

۴-۵ اتصال کوتاه یک فاز به زمین



برای اتصال کوتاه تک فاز a داریم:

$$V_{as} = 0$$

$$V_{bs} = -V_{cs} \Rightarrow V_{abcs} = [0 \quad v_{bs} \quad -v_{bs}]^T$$

با تبدیل بردار ولتاژ V_{abcs} خواهیم داشت:

$$V_{odqs} = [0 \quad 0 \quad -(2)^{1/2} V_{bs}]^T$$

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 (۹-۴) و (۱۰-۴) نتایج شبیه سازی را نشان می دهد.

در اینجا نیز مثل بخش ۳-۶ بعلت عدم تقارن در شرایط اتصال کوتاه شکل موجهای

محوری d , q متفاوتند. از این رو تمامی آنها در شکل (۹-۴) آورده شده است. درست

برخلاف اتصال کوتاه دوفاز در اینجا تغییرات در محور q شدیدتر است.

شکل (۱۰-۴) شامل شکل موجهای گذرای i_m , T_e , ω_r , جریانها و ولتاژهای سه فاز

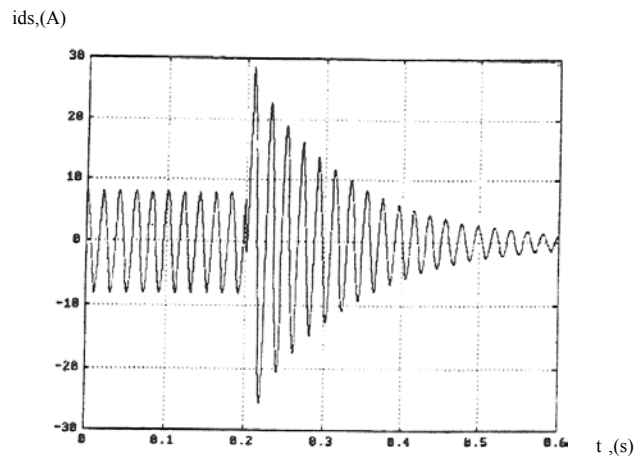
استاتور و i_{ar} می باشد. همانطوریکه ملاحظه می شود i_m دارای نوساناتی است که

شدیدتر از حالت اتصال کوتاه سه فاز متقارن و دو فاز می باشد. گشتاور

الکترومغناطیسی نیز دارای نوساناتی است. با مقایسه نتایج T_e در چند حالت فوق می توان نتیجه گرفت که هرچه عدم تقارن در شرایط بیشتر شود تغییرات و نوسانات در T_e افزایش می یابد.

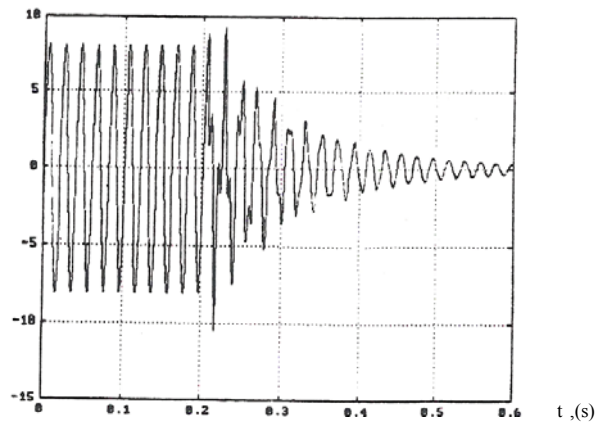
نحوه تغییرات جریانها و ولتاژهای سه فاز استاتور و جریان i_{ar} را نیز می توان در (۱۰-۴) مشاهده نمود.

شکل ۹-۴- تغییر کمیات i_{ds} , v_{ds} , i_{qr} , i_{dr} , v_{qs} , i_{qs} بهنگام اتصال کوتاه تک فاز به زمین



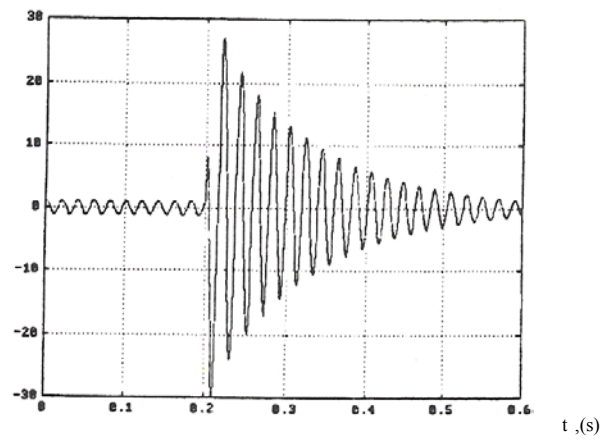
شکل ۹-۴ - الف - تغییرات i_{ds} با زمان

$i_{qs}(A)$



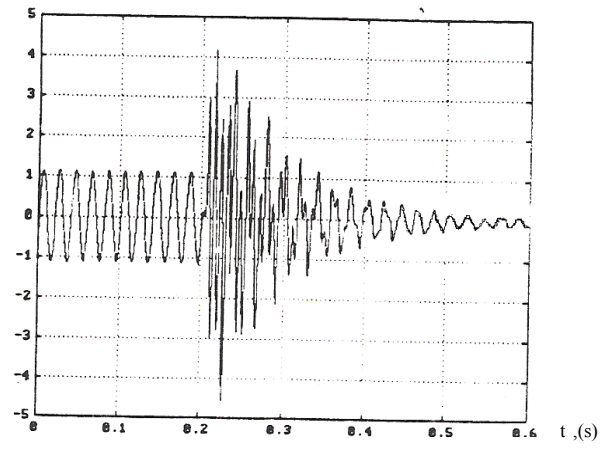
شکل ۹-۴ - ب- تغییرات i_{qs} با زمان

i_{dr} (A)

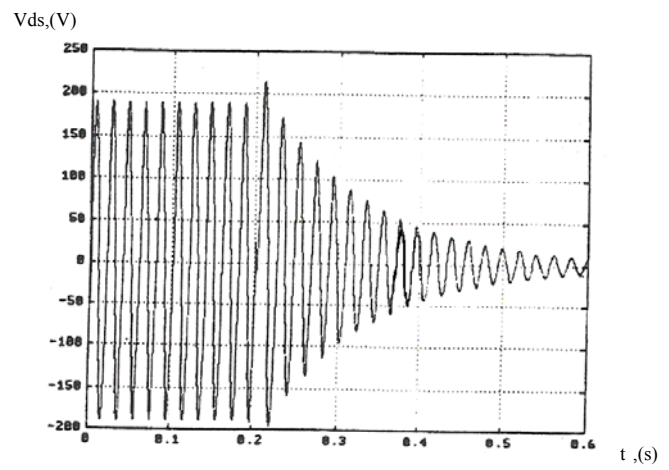


شکل ۹-۴ - پ- تغییرات i_{dr} با زمان

i_{qr} (A)

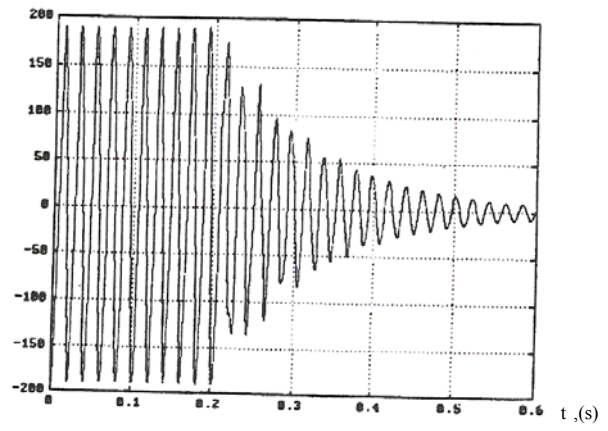


شکل ۹-۴ - ت- تغییرات i_{qr} با زمان



شکل ۹-۴ - ت- تغییرات v_{ds} با زمان

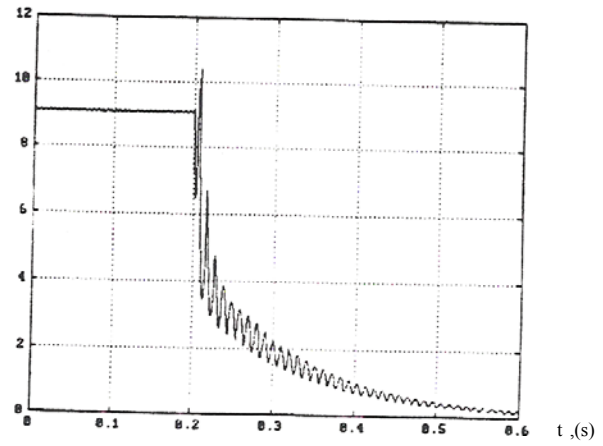
$V_{qs}(V)$



شکل ۹-۴ - ج - تغییرات vqs با زمان

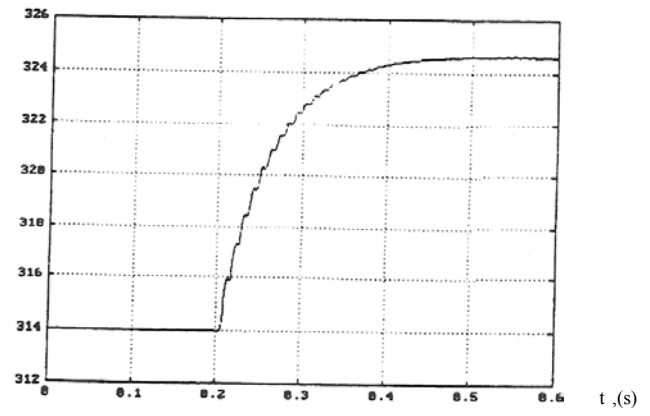
شکل ۱۰-۴ - تغییرات کمیت ω_r , i_m , T_e جریانها و ولتاژهای استاتور و جریان i_a

i_m (H)

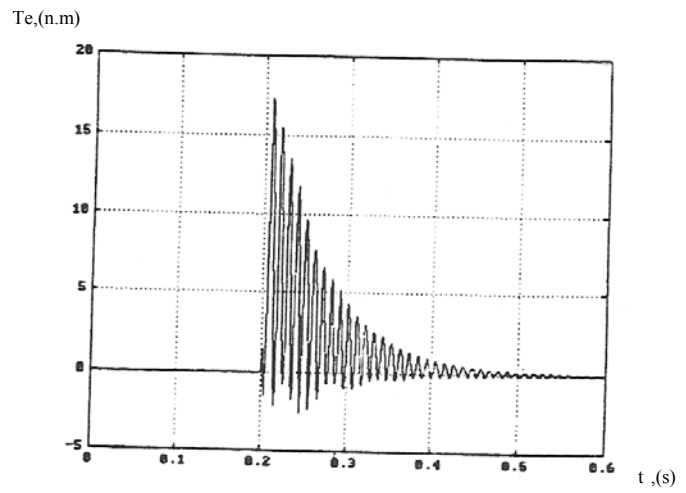


شکل ۱۰-۴ - الف - تغییرات i_m با زمان

ω_r (rad/s)

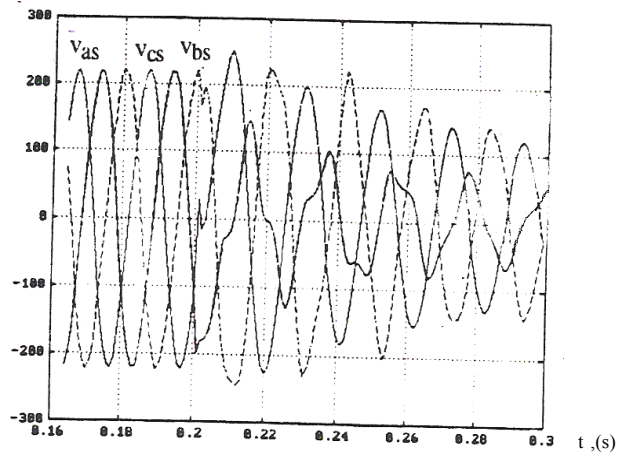


شکل ۴-۱۰ - پ- تغییرات ω_r با زمان

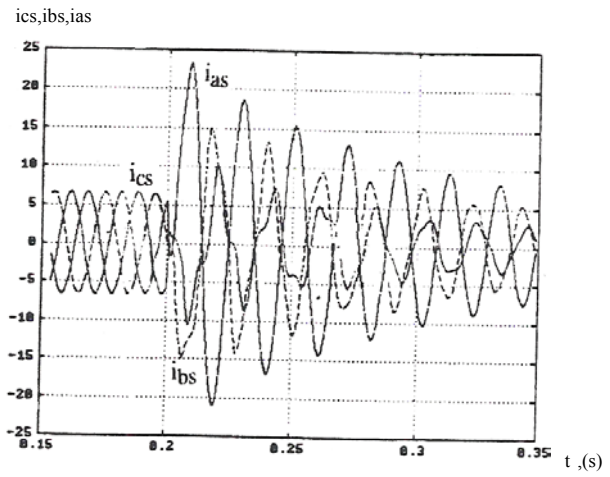


شکل ۴-۱۰ - پ- تغییرات T_e با زمان

Vcs,vbs,vas

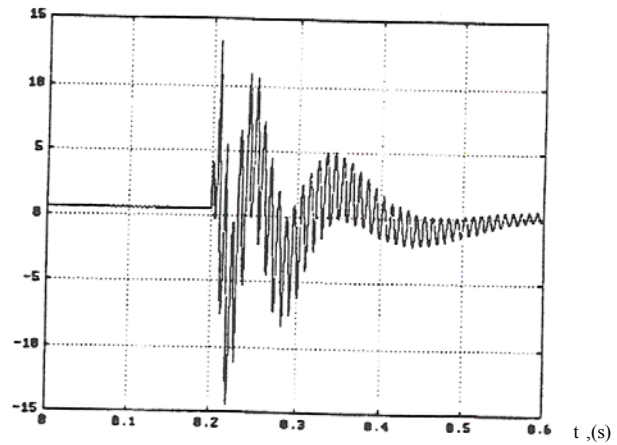


شکل ۱۰-۴-ت- تغییرات v_{cs}, v_{bs}, v_{as} با زمان



شکل ۱۰-۴-ث- تغییرات i_{cs}, i_{bs}, i_{as} با زمان

$i_{ar}, (A)$



شکل ۴-۱۰ - ج- تغییرات iar با زمان

۴-۶ اثر شتاب روتور بر روی پدیده تحریک خودی

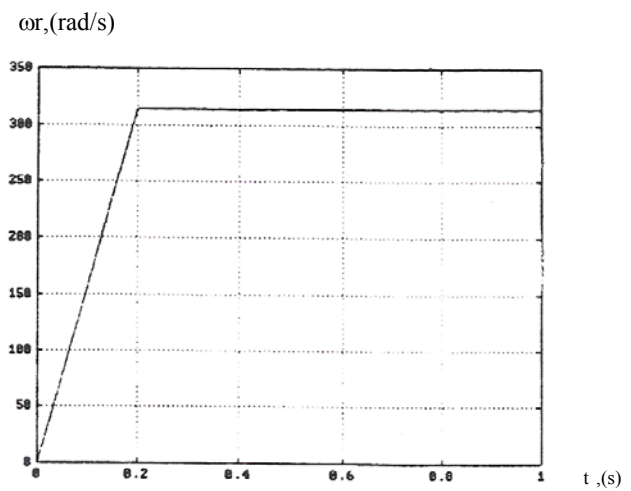
چنانکه در قسمت ۳-۳ توضیح داده شد شتاب روتور می تواند روی تحریک خودی اثر زیادی داشته باشد و منجر به خاصیت ضدمغناطیسی در آن گردد و در اینجا با شبیه سازی کامپیوتری به مطالعه این اثر پرداخته ایم.

شکل (۴-۱۱) شامل تغییرات سرعت روتور می باشد. فرض شده است که در مدت ۲/۰ ثانیه روتور با شتاب یکنواختی به سرعت نهایی 314 rad/s برسد و بعد از آن در این سرعت ثابت بماند. خواهیم دید که ژنراتور القایی در شرایط اولیه یکسان در زمان بالاتر از ۰/۶ ثانیه به حالت ماندگار می رسد. حال اگر این شکلها را در محدوده زمانی صفر تا ۰/۴ ثانیه بزرگ نماییم، مشاهده می شود که شرایط اولیه که حاکی از

پسماند مغناطیسی معین است با گذشت زمان کاهش می یابد ولی بعد از رسیدن به سرعت نهایی ولتاژسازی شروع می شود.

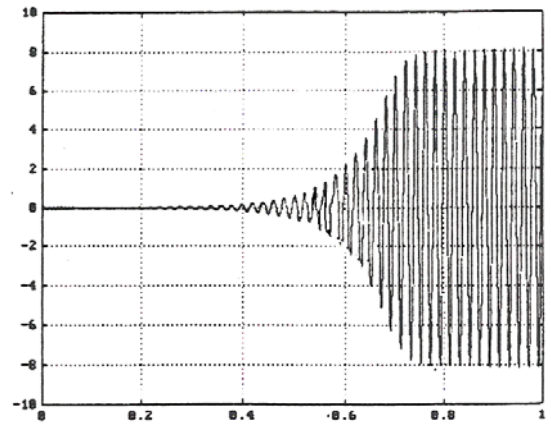
تغییرات i_m نیز در شکل (۱۱-۴) بطور مستقیم کاهش پسماند را نشان می دهد. بنابراین دوباره نتیجه می گیریم که شتاب روتور منجر به کاهش پسماندمی شود ولی هرچه قدر این پسماند کاهش یابد بالاخره دوباره در سرعت بالاتر با زمان طولانی ولتاژ سازی صورت خواهد گرفت.

شکل ۱۱-۴- اثر شتاب روتور روی پدیده تحریک خودی



شکل ۱۱-۴ - الف - تغییرات ω_r با زمان

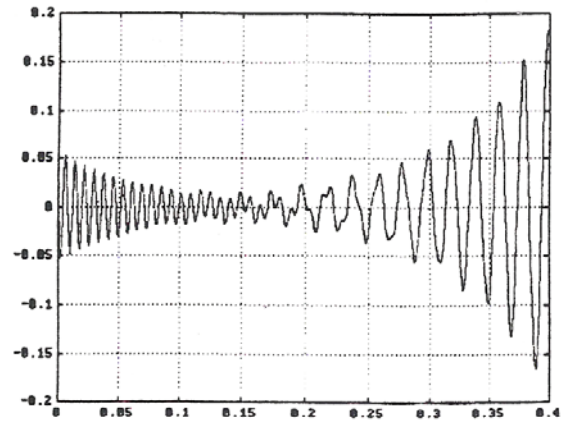
i_{ds} (A)



t,(s)

شکل ۴-۱۱ - ب- تغییرات i_{ds} با زمان

$i_{ds}(A)$

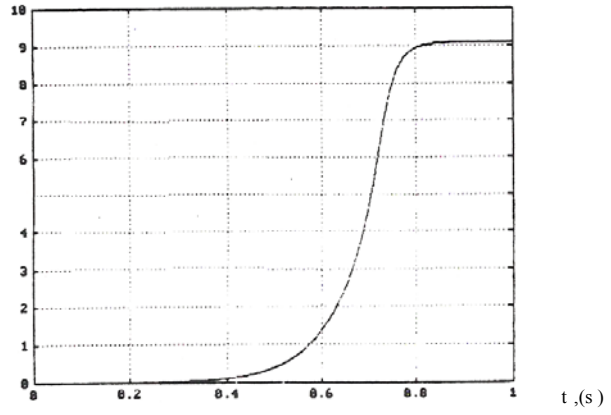


t,(s)

شکل ۴-۱۱ - پ- تغییرات i_{ds} با زمان (بزرگ شده ب)

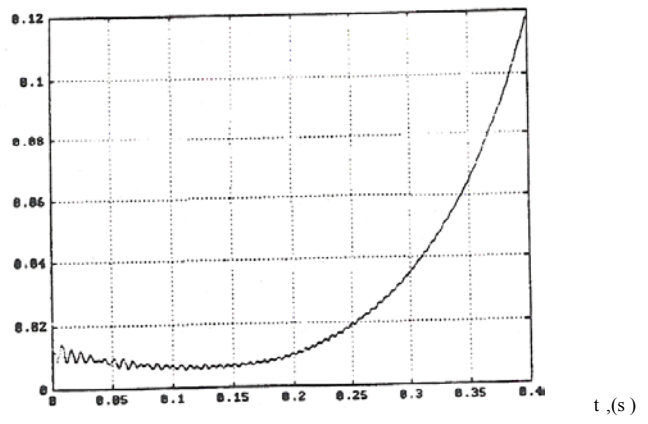
شکل ۴-۱۲ - اثر شتاب روتوربروی i_m و i_{as}

$i_m(A)$



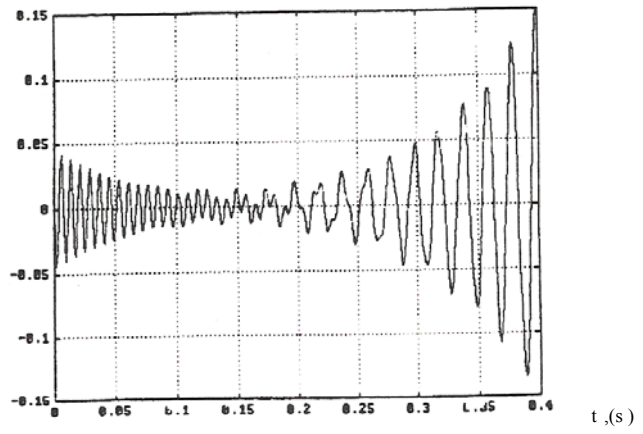
شکل ۴-۱۲ - الف - تغییرات i_m با زمان

i_m (A)



شکل ۴-۱۲ - ب - تغییرات i_m با زمان (بزرگ شده الف)

i_{as} (A)



شکل ۴-۱۲ - پ- تغییرات i_{as} با زمان (بزرگ شده)

منابع

اینترنت

مقالات مجله صنعت برق

کتاب چاپمن

پروژه های کار شناسی ارشد