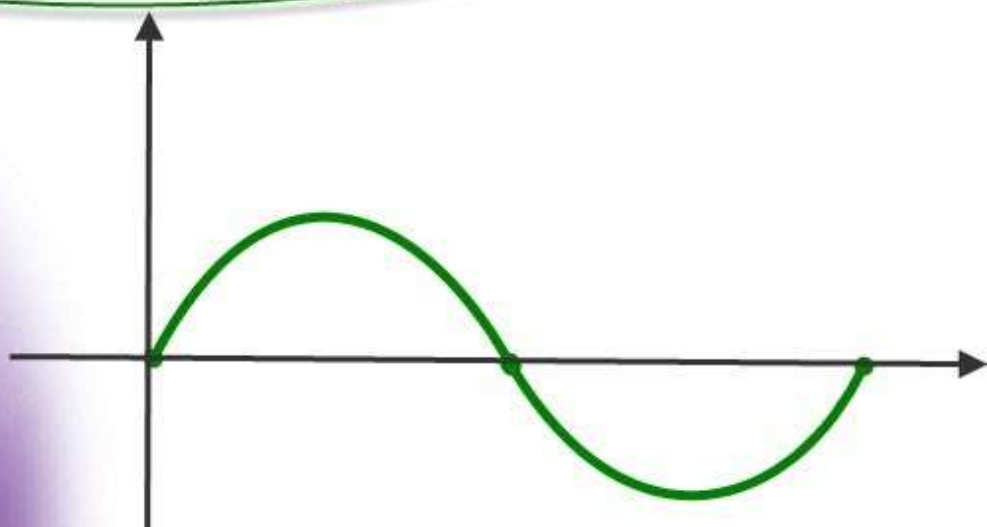


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

چکیده

ماشین دوتحریکه بدون جاروبک، ماشینی است که ویژگی مقاوم بودن ماشین القایی قفس سنجابی را به همراه قابلیت کنترل سرعت و ضریب توان ماشین سنکرون داراست. استاتور این ماشین دارای دو دسته سیم پیچی سه فاز است که همواره دارای تعداد قطب های نابرابر هستند تا هیچگونه کوپلاژ مغناطیسی مستقیمی با یکدیگر نداشته باشند و معمولاً در فرکانس های متفاوتی تحریک می شوند. موتور دوتحریکه بدون جاروبک دارای سه حالت عملکرد است، شامل: القایی ساده، القایی آبشاری و سنکرون، که با تحریک مناسب سیم پیچ های استاتور حاصل می شود. عملکرد مطلوب ماشین مستلزم آنست که کوپلاژ میدان های مغناطیسی سیم پیچ های استاتور آن تنها از طریق روتور صورت گیرد. روتور این ماشین دارای ساختار ویژه ای است که عمل تبدیل قطب ها را با تولید هارمونیک های مکانی مناسب در شار تولیدی خود انجام می دهد. در این پایان نامه به جنبه های مدلسازی و تحلیل موتور دوتحریکه بدون جاروبک پرداخته شده است. در قسمت مدلسازی، مدل دینامیکی ماشین که قادر به توصیف رفتار آن با وجود خطاهای سیم پیچی استاتور و عدم تعادل در تحریک است، استخراج گردیده و نتایج شبیه سازی برای چند مورد از خطاهای استاتور آورده شده است. استخراج این مدل بر پایه مبانی و مفاهیم تئوری جامع هارمونیک برای تحلیل ماشین های الکتریکی و همچنین معادلات دینامیکی اصلاح شده مدل کوپلاژ مداری استوار است. برای اثبات صحت مدل پیشنهادی، روابط و معادلات مدل اجزا محدود مغناطیسی-دینامیکی که امکان شبیه سازی عملکرد دینامیکی ماشین را فراهم می آورد، استخراج گردیده و شبیه سازی های لازم انجام شده است. نتایج شبیه سازی نشان دهنده هماهنگی خوبی بین پاسخ های بدست آمده از دو روش شبیه سازی است که درستی مدل پیشنهادی را اثبات می کند. در این مدل، آرایش خاص هادی های روتور لحاظ گردیده و چرخش با استفاده از تکنیک لایه متحرک، تانسور تنش ماکسول و معادله نوسان مکانیکی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصله از شبیه سازی های مدل اجزا محدود و مشاهدات تجربی حاکی از وجود نوسانات و ریپل هایی در گشتاور تولیدی ماشین و تاثیر نامطلوب آن بر عملکرد موتوری بویژه در هنگام راه اندازی می باشد. در این تحقیق، تاثیر مورب کردن شیارهای استاتور یا روتور بر کاهش ریپل های گشتاور با بررسی گشتاور دندانان ای و اغتشاش شکل موج نیرو محرکه الکتریکی برگشتی، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

واژه های کلیدی

ماشین دوتحریکه بدون جاروبک (BDFM)، روتور nested loop، تئوری جامع هارمونیک، مدل اجزای محدود، گشتاور دندانان ای

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه	۶
۱-۱- پیشگفتار	۶
۲-۱- ماشین های AC با تغذیه دو گانه : طبقه بندی و مقایسه	۶
۱-۲-۱- ماشین القایی با روتور سیم پیچی شده	۹
۲-۲-۱- ماشین دو تحریکه آبشاری	۱۱
۳-۲-۱- ماشین با تغذیه دو گانه آبشاری تک قابه	۱۳
۴-۲-۱- ماشین دوتحریکه بدون جاروبک	۱۴
۵-۲-۱- ماشین دوتحریکه رلوکتانسی	۱۵
۶-۲-۱- ماشین القایی تاندم	۱۶
۳-۱- پیدایش ماشین دوتحریکه بدون جاروبک	۱۶
۴-۱- توصیف ماشین دوتحریکه بدون جاروبک	۱۹
۱-۴-۱- حالت عملکرد سنکرون	۲۰
۵-۱- پتانسیل های کاربرد موتور دوتحریکه بدون جاروبک	۲۴
۶-۱- هدف رساله	۲۵
۷-۱- ساختار کلی پروژه	۲۶
فصل ۲- تحلیل وضعیت پایدار هارمونیکی حالت های مختلف عملکرد	۲۷
۱-۲- مقدمه	۲۷
۲-۲- تحلیل عملکرد در حالت القایی ساده	۲۷
۱-۲-۲- تحلیل جامع هارمونیکی	۲۸
۲-۲-۲- انتقال توان و تلفات در عملکرد القایی ساده	۴۳
۳-۲- تحلیل عملکرد در حالت القایی آبشاری	۴۴
۱-۳-۲- انتقال توان و تلفات در عملکرد القایی آبشاری	۵۰
۴-۲- تحلیل عملکرد در حالت سنکرون	۵۰
۱-۴-۲- انتقال توان و تلفات در حالت عملکرد سنکرون	۵۳
۵-۲- مقایسه BDFM با ماشین های استاندارد موجود	۵۴

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

فصل ۳- مدلسازی دینامیکی با وجود خطاهای استاتور ۵۵

- ۱-۳- مقدمه ۵۵
- ۲-۳- وجوه خطای ماشین ۵۵
- ۱-۲-۳- خطاهای استاتور ۵۷
- ۲-۲-۳- شکل گیری خطا ۶۱
- ۳-۳- محاسبه اندوکتانس های ماشین ۶۱
- ۱-۳-۳- تابع توزیع هادی مختلط ۶۲
- ۲-۳-۳- محاسبه اندوکتانس های استاتور ۶۳
- ۳-۳-۳- محاسبه انوکتانس های متقابل استاتور و روتور ۶۵
- ۴-۳-۳- محاسبه اندوکتانس های روتور ۶۶
- ۴-۳- معادلات دینامیکی ۶۷
- ۱-۴-۳- معادله تعادل ولتاژ استاتور ۶۷
- ۲-۴-۳- معادله تعادل ولتاژ روتور ۶۷
- ۳-۴-۳- معادله گشتاور ۶۸
- ۴-۴-۳- معادلات سیستم ۶۹
- ۵-۳- پیاده سازی سیستم در نرم افزار MATLAB/SIMULINK ۷۰

فصل ۴- مدلسازی اجزای محدود ۹۲

- ۱-۴- مقدمه ۹۲
- ۲-۴- استخراج معادلات بر اساس پتانسیل برداری مغناطیسی ۹۳
- ۳-۴- استخراج معادلات در دامنه های دوبعدی ۹۴
- ۴-۴- روش اجزای محدود ۹۴
- ۱-۴-۴- مثلث مرتبه اول ۹۵
- ۲-۴-۴- کاربرد روش باقیمانده وزن دار ۹۸
- ۳-۴-۴- شرایط مرزی ۱۰۱
- ۴-۴-۴- کاربردهای غیرخطی ۱۰۲
- ۵-۴- پیاده سازی روش اجزای محدود در مدلسازی BDFM ۱۰۴

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۱۱۷.....نتایج شبیه سازی -۶-۴

۱۲۶.....نتیجه گیری و پیشنهادها.

۱۲۹.....منابع و مراجع



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

این پایان نامه بر شبیه سازی و تحلیل عملکرد و طراحی موتور دوتحریکه بدون جاروبک تمرکز دارد . ماشین دوتحریکه بدون جاروبک که اغلب ماشین القایی دوتحریکه بدون جاروبک نیز خوانده می شود، یک ماشین الکتریکی AC است که می تواند هم بعنوان موتور و هم بعنوان ژنراتور کار کند . همانگونه که از نام آن پیداست، ماشین احتیاج به دو منبع تغذیه متناوب دارد و هیچگونه اتصال الکتریکی مستقیمی بین روتور و استاتور وجود ندارد که این مسئله سبب حذف ذغال های کربنی میشود که در اغلب ماشین های الکتریکی یافت می شوند.

در این فصل ابتدا ماشین های AC دو تحریکه معرفی ،دسته بندی و مقایسه شده (بخش ۱-۲) سپس پیدایش و پیشرفت ماشین دو تحریکه بدون جاروبک مرور گردیده است (بخش ۱-۳) در ادامه مفاهیم پایه ای عملکرد ماشین تشریح شده و حوزه های مناسب برای استفاده از ماشین ذکر شده است (بخش ۱-۴).

۱-۲- ماشین های AC با تغذیه دوکانه : طبقه بندی و مقایسه

پیشرفت های اخیر در زمینه ماشین های دوتحریکه، انجام تحقیقات در زمینه این نوع ماشین های الکتریکی را ضروری ساخته است . یک ماشین با تغذیه دوکانه، ماشین AC سه فازی است که دارای دودسته سیم پیچی سه فاز قابل دسترسی است و از طریق آنها توان الکتریکی به ماشین منتقل شده یا از آن استخراج می گردد . در میان این ماشین ها، دو رقیب اصلی در کسب بیشترین توجه، ماشین دوتحریکه بدون

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

جاروبک [۱] ، و ماشین دوتحریکه رلوکتانسی ^۱ هستند [۲]. انواع دیگر ماشین های با تغذیه دوگانه در دسته های زیر جای می گیرند:

- ✓ ماشین القایی با تغذیه دوگانه (روتور سیم پیچی شده ^آ)
- ✓ ماشین با تغذیه دوگانه آبشاری ^۳
- ✓ ماشین با تغذیه دوگانه آبشاری تک قابه ^۴
- ✓ ماشین القایی تاندم ^۵

یک طبقه بندی از خانواده ماشین های دوتحریکه در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در یک سمت ماشین القایی با روتورسیم پیچی شده و دارای جاروبک قرار دارد و در سمت دیگر انواع دیگر ماشین های دوتحریکه و بدون جاروبک قرار گرفته اند. شاخه بدون جاروبک به دو دسته تقسیم می شود. دسته اول نماینده ماشین های آبشاری ^۶ هستند که در آنها روتورهای دوماشین القایی با روتور سیم پیچی شده، هم بلحاظ الکتریکی و هم بلحاظ مکانیکی به یکدیگر متصل شده اند، پس جاروبکی برای این اتصال لازم نیست. این طرح به نام ماشین با تغذیه دوگانه آبشاری شناخته می شود.

در ماشین با تغذیه دوگانه آبشاری تک قابه، این ایده با ترکیب دو سیم پیچ استاتور در یک قاب پیشرفته تر شده است (۱-۱). با ادامه این پیشرفت ها در مورد ماشین آبشاری و ترکیب دو ماشین در یکی و داشتن دو سیم پیچ استاتور در هر شیار آن، شاخه متفاوت دیگری بوجود می آید. تفاوت بین BDFRM و BDFM ناشی از ساختار روتورهای آنهاست که به ترتیب از نوع قفسی و رلوکتانسی هستند. آخرین نوع ماشین دوتحریکه بدون جاروبک، ماشین القایی تاندم است که دارای یک استاتور ثابت و یک استاتور قابل چرخش است و یک روتور قفسی دارد که برای هر دو قاب استاتور مشترک است. حسن ماشین های القایی

¹ Brushless Doubly-Fed Reluctance Machine (BDFRM)

² Single Doubly-Fed Induction Machine(SDFM)

³ Cascade Doubly-Fed Induction Machine(CDFM)

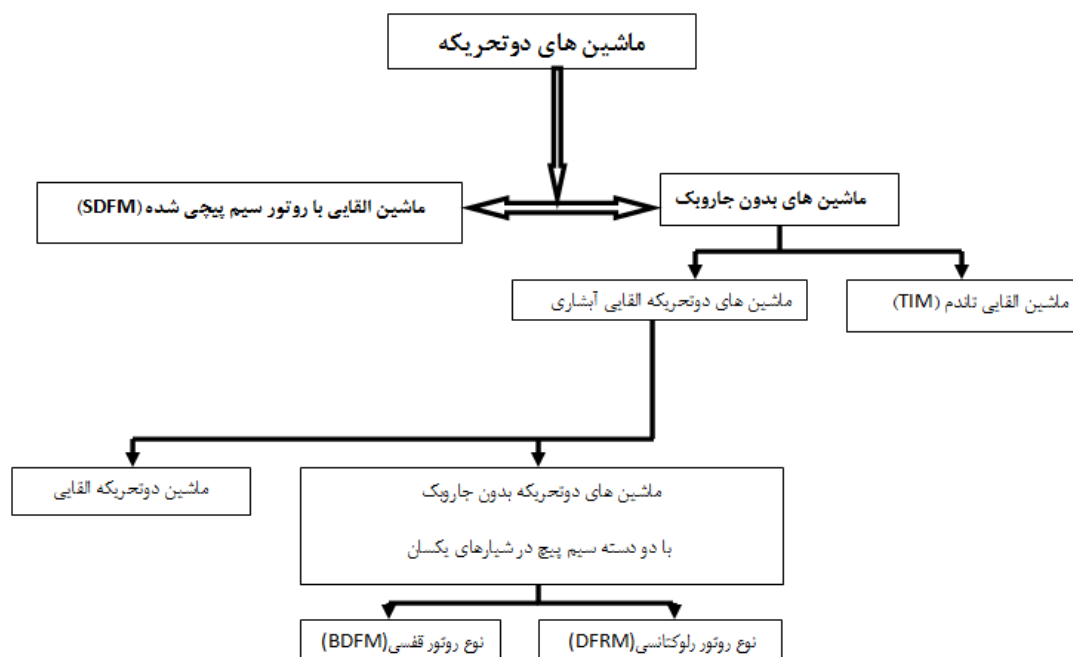
⁴ Single Frame-Cascade Doubly-Fed Induction Machine(SF-CDFM)

⁵ Tandem Induction Machine(TIM)

⁶ Cascade

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تاندم آنست که احتیاج به مبدل توان برای کنترل ندارند. این ویژگی آن را از تمام انواع دیگر ماشین های Ac دوتحریکه که یک سیم پیچ آنها باید به یک مبدل توان دوجهته وصل گردد، متمایز می سازد [۳].



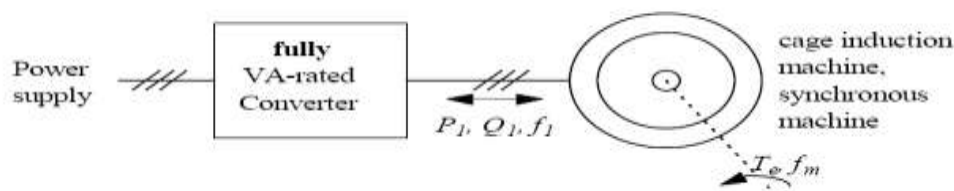
شکل ۱-۱ : طبقه بندی ماشین های الکتریکی دوتحریکه

عبارت دوتحریکه عموماً در مورد ماشینی به کار می رود که توان از طریق دو سیم پیچ سه فاز به آن تزریق شده یا از آن استخراج می گردد. بر خلاف آن ماشین های تک تحریکه تنها یک ترمینال برای انتقال توان الکتریکی دارند. ماشین القایی استاندارد و ماشین سنکرون نمونه هایی از ماشین تک تحریکه می باشند. مزیت ماشین های دوتحریکه بر تک تحریکه ها در کاربردهای سرعت متغیر آنهاست که نیاز به تبدیلی با ولت آمپر نامی کمتر دارند. مبدل ماشین تک تحریکه در کاربرد سرعت متغیر باید همه توان اکتیو

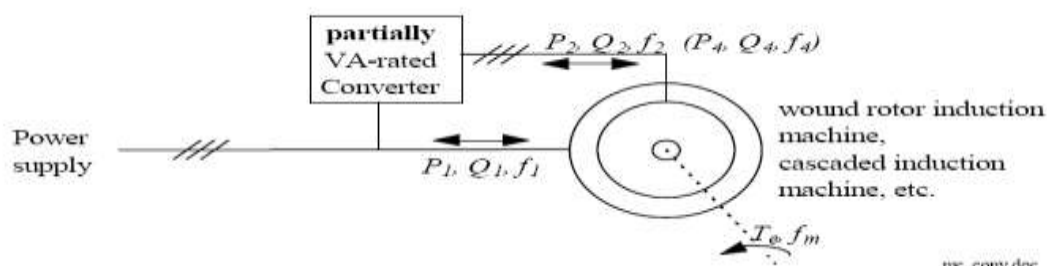
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

و راکتیو مورد نیاز را پردازش کند اما مبدل ماشین دوتحریکه بسته به محدوده مطلوب تغییرات سرعت، مقدار توان کمتری را پردازش می کند. شکل ۱-۲ ساختارهای هر دو نوع محرک را نشان میدهد.

Singly-fed machine system



Doubly-fed machine system



شکل ۱-۲: ساختار کلی ماشین های تک تحریکه و دوتحریکه [۲]

نواحی کاربرد ماشین های دوتحریکه می تواند در حالت کلی بعنوان سیستم های سرعت متغیر فرکانس ثابت^۱ توصیف گردد. این زمینه ها شامل توان آبی و توان بادی، کاربردهای فضایی، درایوهای پنکه و پمپ و تامین توان کشتی ها است [۴]. در ادامه هر یک از ساختارهای ذکر شده مختصراً معرفی شده اند و جزئیاتی درباره عملکرد آنها آورده شده است.

۱-۲-۱- ماشین القایی با روتور سیم پیچی شده

در ماشین القایی با روتور سیم پیچی شده سیم پیچ های استاتور مستقیماً به شبکه وصل می شود. روتور دارای سیم پیچی سه فازی است که توسط حلقه های لغزشی^۲ بیرون آورده شده اند و بر روی محور قرار

¹ Variable speed-constant frequency

² Slip ring

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

گرفته اند. آنها توسط ذغال ها قابل دسترسی هستند و همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، به یک مبدل توان دوجهته وصل شده اند.

اگر برای کمیت های استاتور از زیرنویس S و برای کمیت های روتور از زیرنویس r استفاده کنیم، برای ماشینی با P جفت قطب می توان نوشت:

$$f_s = f_r + P f_m \quad (1-1)$$

که f_m فرکانس مکانیکی روتور به Hz است. لغزش S بصورت رابطه ۱-۲ تعریف می شود.

$$S = \frac{f_r}{f_s} = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}}, \quad n_{sync} = \frac{60 f_s}{P} \quad (2-1)$$

که n_m سرعت مکانیکی روتور و n_{sync} سرعت سنکرون به rpm هستند. فرکانس و ولتاژ روتور بستگی به سرعت کارکرد دارد که می تواند به نواحی زیر تقسیم شود:

✓ ایستا (stationary): $S=1$

✓ زیر سنکرون (sub synchronous): $0 < S < 1$

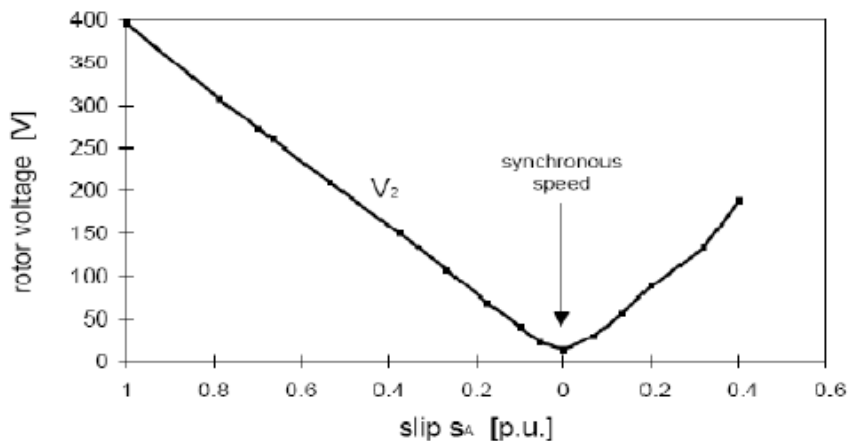
✓ سنکرون (synchronous): $S=0$

✓ فوق سنکرون (super synchronous): $S < 0$

✓ عکس سنکرون (counter synchronous): $S > 1$

شکل ۱-۳ انتقال توان در روتور SDFM را نشان می دهد که همانند دامنه ولتاژ و فرکانس آن دارای یک حالت V شکل حول سرعت سنکرون است. پس طبق این شکل با طراحی سیستم سرعت متغیر بگونه ای که محدوده مطلوب سرعت در اطراف سرعت سنکرون باشد، میزان توانی که مبدل دو جهته باید کنترل کند در مقایسه با سیستم های تک تحرکه بطور قابل توجهی کاهش می یابد [۳].

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

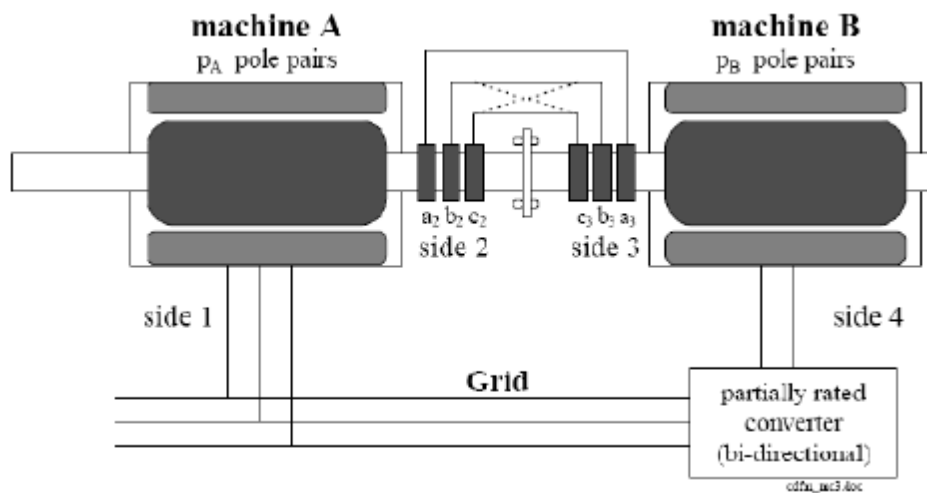


شکل ۳-۱: ولتاژ اندازه گیری شده روتور SDFM بعنوان تابعی از سرعت (روتور مدار باز است). [۳]

۲-۲-۱- ماشین دو تحریکه آبشاری

در این ساختار روتورهای دو ماشین القایی با روتور سیم پیچی شده بلحاظ الکتریکی و مکانیکی به

یکدیگر وصل شده اند (شکل ۴-۱) [۵].



شکل ۴-۱: آرایش ماشین CDFM [3]

حلقه های لغزشی طرف ۲ و ۳ ماشین مستقیماً و بدون جاروبک به یکدیگر وصل شده اند، بنابراین هر

دو سمت ماشین دارای سرعت مکانیکی یکسانی هستند. استاتور ماشین A یا سمت ۱، به منبع تغذیه

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

اصلی وصل شده و استاتور ماشین B یا سمت ۴، به یک مبدل دو جهته وصل شده است. در CDFM،

ماشین های A و B می توانند بلحاظ تئوری دارای هر ترکیب جفت قطب P_A و P_B باشند.

ارتباط فرکانسی هر ماشین CDFM بصورت روابط ۳-۱ و ۴-۱ است.

$$f_1 = f_2 + P_A f_m \quad (3-1)$$

$$f_3 = f_4 + P_B f_m \quad (4-1)$$

که فرکانس های مخصوص هر سمت ماشین هستند و f_m فرکانس چرخش مکانیکی روتور به Hz است.

با اتصال توالی فاز مثبت در روتور، برای فرکانس های f_3 و f_2 رابطه ۵-۱ برقرار است.

$$f_2 = f_3 \quad (5-1)$$

پس ارتباط فرکانسی بین طرف ۱ و ۴ ماشین بصورت رابطه ۶-۱ خواهد بود.

$$f_1 = (P_A + P_B) f_m + f_4 \quad (6-1)$$

مقدار لغزش برای هر ماشین بصورت روابط ۷-۱ و ۸-۱ تعریف می شود.

$$S_A = \frac{f_2}{f_1} \quad (7-1)$$

$$S_B = \frac{f_4}{f_3} \quad (8-1)$$

لغزش ترکیبی S_{AB} برای CDFM طبق رابطه ۹-۱ تعریف می گردد.

$$S_{AB} = S_A S_B = \frac{f_4}{f_1} \quad (9-1)$$

سرعت سنکرون حالت آبشاری نیز برای CDFM بصورت رابطه ۱۰-۱ تعریف می شود.

$$n_{cas.sync} = \frac{60(f_1 + f_4)}{P_A + P_B} \quad (10-1)$$

محدوده سرعت مطلوب CDFM برای استفاده از مزایای دوتحریکه بودن آن، در بالای ۸۰ % سرعت

سنکرون ماشین A است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

لازم به ذکر است که اگر سمت ۴ یک CDFM مدار باز شود، ماشین گشتاوری همانند یک ماشین القایی قفسی دارد. این بدان دلیل است که حلقه بسته شده سیم پیچ روتور اجازه می دهد که جریانی که در اثر ولتاژ القا شده از سمت ۱ ایجاد شده، جریان یابد. اگرچه عملکرد ماشین در این حالت ضعیف تر از ماشین القایی قفسی است اما CDFM با وجود اصطکاک و گشتاور باد که مخالف گشتاور تولیدر ماشین A هستند، شروع به شتاب گرفتن می کند [۶].

همانطور که از روابط بالا برمی آید، CDFM با اتصال توالی مثبت روتور در عبارت های فرکانس و لغزش مانند یک SDFM است که دارای تعداد جفت قطب هایی برابر با حاصل جمع جفت قطب های ماشین های A و B در ساختار CDFM است. چون معادلات انتقال توان برای CDFM با لغزش ترکیبی، مشابه SDFM است، پس محدوده سرعت کارکرد باید حول سرعت سنکرون CDFM متمرکز شده باشد و ظرفیت مبدل طرف ۴ همانند ظرفیت مبدل SDFM از مفاهیم مشابهی پیروی می کند [۳].

محدودیت هایی از قبیل تعداد جفت قطب، بازده ماشین، بهره برداری، محدوده سرعت و ظرفیت مبدل، هنگام تصمیم گیری در مورد ترکیب بهینه ماشین، نقش مهمی دارند. بعلاوه بهتر است که انتخاب گردد زیرا تلفات پریونیت شده برای چنین ساختاری کمتر است [۷]. با در نظر گرفتن $P_A > P_B$

این حقیقت که تقسیم گشتاور بین هر ماشین در CDFM متناسب با تعداد جفت قطب های آن است، پس برای دستیابی به بالاترین بهره برداری از CDFM ماشین ها باید یکسان باشند.

۱-۲-۳- ماشین با تغذیه دوگانه آبشاری تک قابه

ماشین با تغذیه دوگانه آبشاری تک قابه، یک توسعه منطقی از CDFM است. این ماشین تا ظرفیت ۲۵۰ کیلووات ساخته شده و بعنوان یک محرک سنکرون با مبدل تریستوری استفاده می شود و شامل دو ماشین است که در یک قاب قرار گرفته اند. دو سیم پیچ استاتور بطور محوری روبروی یکدیگر قرار گرفته اند، روتور دارای ساختار قفسی است و از تعدادی میله تشکیل شده است [۸].

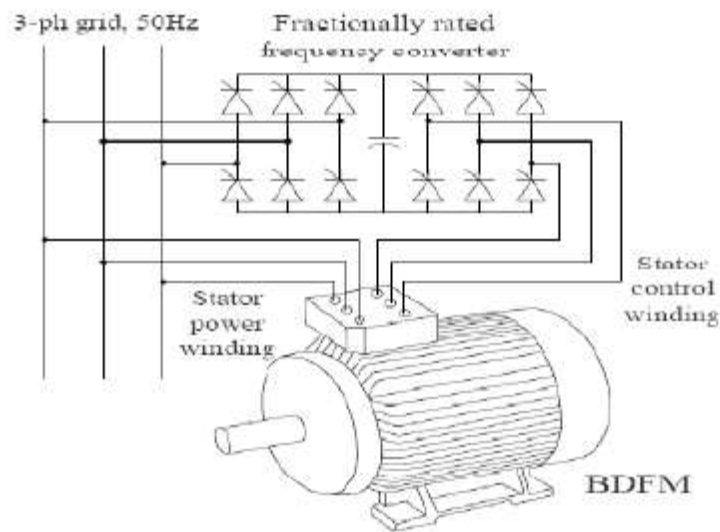
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۱-۲-۴- ماشین دوتحریکه بدون جاروبک

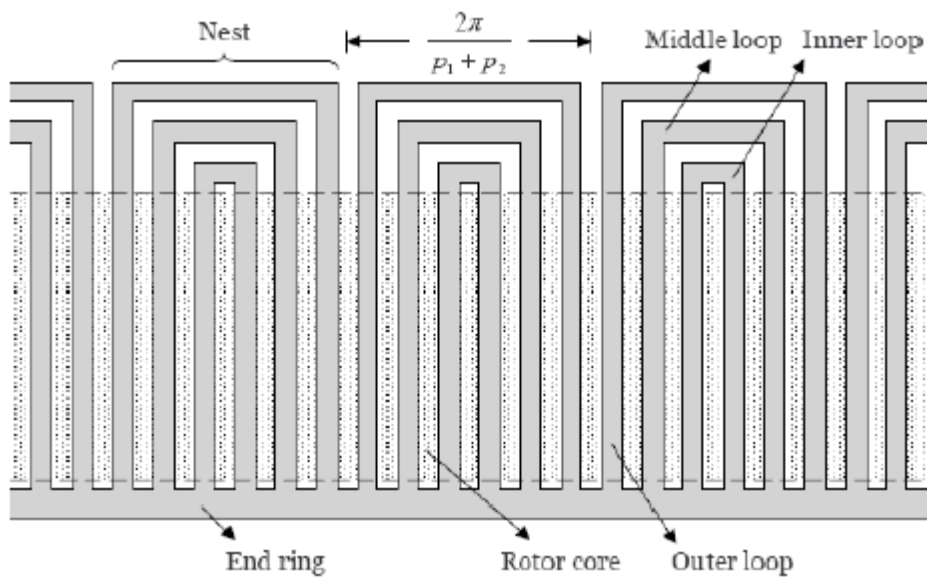
ماشین دوتحریکه بدون جاروبک یکی از انواع CDFM است زیرا دو ماشین را در یکی گرد آورده است و دو سیم پیچی استاتور دارد که بلحاظ فیزیکی مجزا هستند. هر دو سیم پیچ استاتور در شیارهای یکسانی پیچیده شده اند و دارای مدارمغناطیسی مشترکی هستند. برای جلوگیری از ارتباط مغناطیسی مستقیم بین دو سیم پیچ استاتور، آنها باید دارای تعداد قطب های نابرابر باشند. بعلاوه این اختلاف باید بیش از یک قطب باشد تا از ایجاد کشش های نامتعادل روی روتور جلوگیری شود [۶، ۱]. اگرچه آرایش یک سیم پیچ روی استاتور بگونه ای که دو میدان متفاوت تولید کند، امکان پذیر است [۶]، ولی ترجیح داده می شود که دو سیم پیچ سه فاز مجزا وجود داشته باشد زیرا در این حالت عملکرد کلی بهتر است و همچنین سیم پیچ ها می توانند برحسب نیاز کاربردی دارای ظرفیت های متفاوتی باشند [۹]. سیستم BDFM ویژگی استحکام مکانیکی یک ماشین القایی قفس سنجابی را به همراه قابلیت کنترل سرعت و تنظیم ضریب توان ماشین سنکرون داراست که این ویژگی ها با استفاده از یک مبدل الکترونیک قدرت با ظرفیت نسبی پایین (حدود ۳۰٪ ظرفیت ماشین) قابل دستیابی است. اما ابعاد و هزینه ساخت ماشین اندکی بیشتر از ماشین القایی با ظرفیت مشابه است. با این حال BDFM پتانسیل هایی را برای کاهش هزینه کلی در مقایسه با سیستم سرعت متغیر بر پایه ماشین القایی نشان می دهد که این بخاطر ظرفیت پایین مبدل مورد نیاز است.

این نکته بویژه هنگامیکه از آن در سطوح متوسط و بالای توان و کاربردهایی با تغییرات سرعت محدود استفاده شود، صحیح است [۱۰]. روتور دارای ساختاری است که ساختار تک لایه و چند مداره نامیده می شود و یک ساختار قفس ویژه است. این روتور شامل تعدادی قطب یا nest است که هر یک شامل تعدادی حلقه اتصال کوتاه شده می باشد. تعداد nest های روتور باید برابر حاصلجمع جفت قطب های دو سیم پیچ استاتور باشد [۶، ۱۰]. عملکرد BDFM بر پایه عکس العمل دو سیم پیچ استاتور از طریق عمل واسطه ای این روتور قفسی ویژه، قرار دارد [11]. سیستم BDFM و ساختار باز شده روتور آن با ۳ حلقه در هر nest بترتیب در شکل های ۱-۵ و ۱-۶ نشان داده شده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۵-۱: سیستم BDFM و تحریک سیم پیچ های آن [۱۲]



شکل ۶-۱: ساختار باز شده یک روتور *nested loop* با سه حلقه در هر *nest* [۱۲]

۵-۲-۱- ماشین دوتحریکه رلوکتانسی

نوع متفاوتی از روتور که توسط **Broadway** برای **BDFM** پیشنهاد شد، ساختاری رلوکتانسی دارد.

استاتور **DFRM** مشابه **BDFM** است اما بجای یک روتور قفسی، یک روتور رلوکتانسی دارد. همانند **BDFM**

تعداد قطب های روتور رلوکتانسی توسط حاصلجمع جفت قطب های سیم پیچ های استاتور تعیین می شود

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

[۱۳] در مقایسه با BDFM هیچ جریان روتوری وجود ندارد و از اینرو هیچ میدان روتوری برای عکس العمل با میدان های استاتور، وجود ندارد. شار فاصله هوایی نامنظم است و اساس عملکرد بر مبنای ارتباط مغناطیسی دو جانبه بین سیم پیچ های استاتور قرار دارد که با برجستگی روتور ایجاد می شود [۱۴].

۱-۲-۶- ماشین القایی تاندم

آخرین شکل از ماشین الکتریکی که می تواند بعنوان ماشین القایی دوتحریکه و بدون جاروبک طبقه بندی گردد، ماشین القایی تاندم نامیده می شود. ماشین القایی تاندم شامل دو استاتور است که بصورت محوری قرار گرفته اند، یکی ثابت است و دیگری بصورت محوری نسبت به اولی قابل چرخش است. روتور قفس سنجابی دارای میله های اریب شده ای است که تمام طول محوری دو استاتور را پوشش داده اند [۱۵].

۱-۳- پیدایش ماشین دوتحریکه بدون جاروبک

تاریخچه BDFM مدرن را می توان از ثبت اختراعی توسط برادران Siemens و F. Lydall در سال ۱۹۰۲ دنبال کرد [۱۶]. این اختراع یک ماشین self-cascaded بود. در آن زمان سیستم توزیع استاندارد در حال تغییر از DC به AC بود.

استفاده از منبع تغذیه متناوب، ماشین القایی را وارد سرویس دهی صنعتی کرد. ماشین القایی یک ساختار ساده و مقاوم^۱ را پیشنهاد می کرد که مطلوب بود. اما صنعت نیاز به سرعت متغیر دارد. همین مسئله سبب ایجاد یک مشکل جدی شد زیرا سرعت پایه یک ماشین القایی با فرکانس منبع ثابت می شود. در ابتدای قرن ۲۰، روش معمول برای کنترل سرعت ماشین های القایی، قرار دادن مقاومت های سری با سیم پیچی روتور توسط حلقه های لغزشی بود. استفاده از مقاومت ذاتاً ایجاد تلفات می کند، بنابراین علاقه

¹ robust

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

زیادی برای طراحی ماشینی وجود داشت که بتواند بدون استفاده از مقاومت سری با روتور، در سرعت های متفاوتی کار کند [۴].

در آن زمان مشخص شد که اتصال دو ماشین القایی به یکدیگر، به یکی از آنها اجازه می دهد که با داشتن عملکرد قابل قبول به سه سرعت مختلف برسد [۱۷]. این آرایش با عنوان **"Cascade Induction Machine"** شناخته می شد. اختراع **Lydall** شامل بکارگیری دو ماشین القایی با میدان های دارای تعداد قطب های متفاوت در یک قاب بود. او توضیح داد که ماشین حاصل، رفتار دو ماشین مجزا در ساختار ماشین **Cascade** را تقلید می کند زیرا میدان های با تعداد قطب های نابرابر، با یکدیگر کوپلاژ مغناطیسی ندارند. ماشین او دو سیم پیچ استاتور و دو سیم پیچ روتور داشت که توسط حلقه های لغزشی، بیرون آورده شده بودند. سه سرعت کارکرد می توانست حاصل شود، سرعت سنکرون سیم پیچ ۱، $\frac{\omega}{P_1}$ سرعت

سنکرون سیم پیچ ۲ $\frac{\omega}{P_2}$ و سرعت سنکرون آبشاری، $\frac{\omega}{P_1+P_2}$

در همان زمان انجام کار، **Lydall** دیگران نیز در تلاش بودند تا یک ماشین **self-cascaded** طراحی کنند، اما در کارهای آنان باید از فاصله مناسب برای سیم پیچ های استاتور استفاده می شد تا عدم ارتباط بین میدان های استاتور تضمین شود [۱۷، ۱۸].

Hunt در سال ۱۹۰۷، ایده اولیه **Lydall** را توسعه داد. **Hunt** نشان داد که حلقه های لغزان لازم نیستند زیرا در صورتیکه اتصال دو ماشین بصورت روتور به روتور انجام شود (نه بصورت روتور به استاتور)، هیچ حلقه لغزانی لازم نیست و داشتن سه سرعت عملکرد نیز همچنان امکانپذیر است.

Hunt همچنین نشان داد که با طراحی مناسب سیم پیچ های استاتور و روتور، کاهش قابل توجه تلفات مس امکانپذیر است. تنها یک سیم پیچ روی روتور طراحی شده بود تا با هر دو میدان فاصله هوایی کوپلاژ داشته باشد [۱۸].

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

پیشرفت های دیگری در طراحی استاتور و روتور توسط Creedy در سال ۱۹۲۰ انجام شد [۱۹].

او از قوانین Hunt برای انتخاب ترکیبات مناسب تعداد قطب ها استفاده کرد و گزینه های بیشتری برای ساختار ماشین ارائه داد. روابط Creedy برای انتخاب تعداد قطب ها منجر به امکان استفاده از یک ماشین با ۲ و ۶ قطب گردید که ۵۰٪ سریعتر از سریعترین ماشین قابل ساخت بر اساس روابط Hunt بود.

پس از Creedy در سال ۱۹۶۶ مقاله ای توسط Smith درباره این ماشین چاپ شد [۲۰]. ماشین Smith از عدم ارتباط بین میدان های استاتور با جدا سازی فضایی استفاده می کرد. او برای اولین بار یک مدل حالت پایدار برای عملکرد ماشین ارائه داد.

او مقالاتی درباره عملکرد سنکرون ماشین منتشر کرد و ذکر کرد که مبدل فرکانسی با توان پایین می تواند برای استخراج توان لغزشی از روتور استفاده شود [۲۱]. این یک پیشرفت قابل توجه بود زیرا اولین بار بود که حالت سنکرون کاملاً ذکر شده بود. اگرچه ماشین Smith یک BDFM واقعی نبود، بلکه دو ماشین از لحاظ مغناطیسی مجزا و در یک قاب بود.

در سال ۱۹۷۰ یک مشارکت مهم توسط Burbridge و Broadway انجام شد [۶]. در واقع BDFM مدرن بطور فیزیکی مشابه طراحی است که آنها ارائه کردند. آندو به ماشین Hunt برگشتند و همکاری مهمی با یکدیگر در طراحی روتور داشتند. آنان با دلیل ذکر کردند که یک روتور سیم پیچی شده، که در طراحی Hunt و Creedy لازم است، منجر به تلفات بالاتر و تداوم کارکرد کمتر می گردد. آنها درصدد طراحی یک روتور قفسی برآمدند که می توانست به همان روش ساخت روتور قفس سنجابی ساخته شود و مشکل راکتانس نشی اضافی را نداشته باشد. آنها در اولین کار خود نشان دادند که روتور قفسی برای BDFM باید تعداد میله هایی برابر با حاصل جمع جفت قطب های سیم پیچ های استاتور داشته باشد. کار اصلی آنان، پیشنهاد طراحی nested loop برای روتور بود که در اکثر کاربردهای BDFM مورد قبول واقع شده است. آنها یک مدار معادل برای BDFM ارائه کردند و بعضی از جنبه های کاربردی ماشین را

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در حالت پایدار مورد تحلیل قرار دادند. آنان همچنین بیان کردند که سیم پیچی دوم نه تنها می تواند توان لغزشی را استخراج کند، بلکه برای قرار دادن ماشین در حالت سنکرون نیز استفاده می شود [۴].

در اواسط دهه ۱۹۸۰ علاقه برای توسعه BDFM در دانشگاه Oregon State بوجود آمد [۲۲]. Li ، Wallace.Spee و دیگران در آنجا BDFM را مورد مطالعه قرار دادند و در واقع بکارگیری نام BDFM از مقالات آنها شروع شد. در کارهای آنان از روتور Burbridge و Broadway استفاده می شد و یک مدل دینامیکی کوپلاژ مداری^۱ برای ماشین ارائه دادند و از آن برای بررسی عملکرد ماشین استفاده کردند. آنها سپس طراحی روتور را مورد توجه قرار دادند و تحلیل ها و پیشنهاداتی برای بهتر کردن آن ارائه کردند [۲۳ و ۲۴].

۱-۴- توصیف ماشین دوتحریکه بدون جاروبک

ماشین دوتحریکه بدون جاروبک یک ماشین القایی تک قابه و بدون جاروبک است که دارای دو سیم پیچ سه فاز با تعداد قطب های مختلف می باشد. نوعاً دو تغذیه استاتور دارای فرکانس های مختلف می باشند، یکی منبع تغذیه فرکانس ثابت و دیگری منبع تغذیه فرکانس متغیر است که از یک مبدل الکترونیک قدرت تامین می شود (شکل ۱-۵).

برای درک مفاهیم ماشین می توان آن را بصورت دو ماشین القایی با تعداد قطب های مختلف فرض کرد که روتورهای آنها از لحاظ الکتریکی و مکانیکی به یکدیگر وصل شده اند. از دید فیزیکی این ماشین شبیه به ماشین self-cascaded پیشنهاد شده توسط Hunt است [۱۷].

این ترکیب از ماشین های القایی مشابه اتصال آبشاری از نوع روتور به استاتور است. در این ترکیب، روتور یک ماشین از طریق حلقه های لغزشی به استاتور ماشین بعدی وصل شده است. اما Hunt نشان داد که اگر هر دو ماشین در یک قاب باشند، بهتر است بجای اتصال روتور یکی به استاتور دیگری، روتورها به یکدیگر وصل شوند زیرا این اتصال نیاز به حلقه های لغزشی را حذف می کند Hunt همچنین نشان داد که

¹ Coupled-circuit

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

اتصال روتور به روتور، اساساً سیستمی مشابه اتصال روتور به استاتور ایجاد می کند. اگر استاتور ۱ دارای P_1 جفت قطب و استاتور ۲ دارای P_2 جفت قطب باشد، BDFM می تواند با اتصال استاتور ۱ یا استاتور ۲ به منبع، بترتیب بصورت یک ماشین القایی با P_1 یا P_2 جفت قطب عمل کند (درحالیکه سیم پیچ دیگر استاتور اتصال باز است). این حالت عملکرد، حالت القایی ساده خوانده می شود [۱۷]. ویژگی های BDFM در این حالت مشابه ماشین القایی استاندارد است بجز اینکه عملکرد ضعیفی خواهد داشت.

اما اگر سیم پیچ تحریک نشده استاتور، اتصال کوتاه شود، رفتار ماشین شبیه یک ماشین القایی آبخاری خواهد بود. یک ماشین القایی آبخاری که از ماشین های القایی با P_1 , P_2 جفت قطب تشکیل شده، ماشینی با $P_1 + P_2$ جفت قطب را شبیه سازی می کند. این حالت عملکرد، حالت القایی آبخاری خوانده می شود.

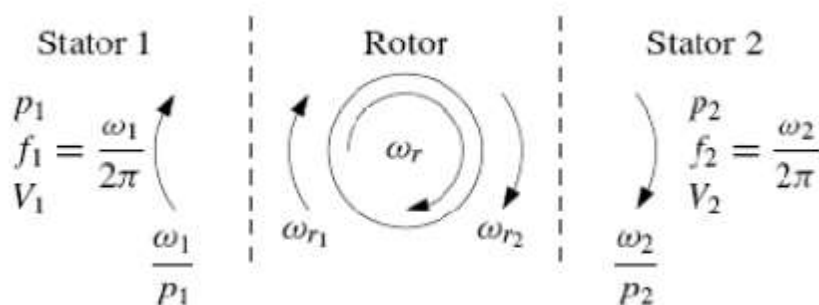


دو حالت عملکرد قبلی هر دو حالت های آسنکرون بودند یعنی اینکه سرعت محوری ماشین، بستگی به میزان بارگذاری و فرکانس تغذیه دارد. اما در حالت تغذیه دوگانه BDFM دارای عملکرد سنکرون است که حالت مطلوب برای عملکرد ماشین می باشد. [۴]

۱-۴-۱- حالت عملکرد سنکرون

حالت عملکرد سنکرون BDFM بر مبنای cross coupling بین استاتور و روتور قرار دارد cross coupling به معنای کوپلاژ میدان های تولیدی استاتور ۱ و ۲ است [۱۱]. بخاطر نابرابر بودن تعداد قطب های سیم پیچ های استاتور، این ارتباط نمی تواند مستقیماً بین میدان های دو سیم پیچ بوجود آید.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۱-۷: سرعت میدان های پایه استاتور و روتور [۴]

اگر استاتور ۱ دارای P_1 جفت قطب باشد و توسط منبع سه فاز با $\omega_1 \text{ rad/s}$ تغذیه شود، شکل

موج جریان استاتور و چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی با سرعت $\frac{\omega_1}{P_1} \text{ rad/s}$ چرخید.

بطور مشابه اگر استاتور ۲ دارای P_2 جفت قطب باشد و منبع تغذیه آن فرکانس زاویه ای $\omega_2 \text{ rad/s}$

داشته باشد، شکل موج ها با سرعت $\frac{\omega_2}{P_2} \text{ rad/s}$ می چرخند.

بنابراین میدان های مغناطیسی پایه ناشی از استاتور ۱ و ۲ می تواند بصورت روابط ۱۱-۱ و ۱۲-۱ بیان شوند (با صرف نظر از هرگونه انحراف زاویه ای ثابت):

$$b_1(t, \theta) = B_1 \cos(\omega_1 t - P_1 \theta) \quad (11-1)$$

$$b_2(t, \theta) = B_2 \cos(\omega_2 t - P_2 \theta) \quad (12-1)$$

اگر روتور با سرعت $\omega_r \text{ rad/s}$ بچرخد، روابط چگالی شارها می تواند در مبنای موقعیت روتور

$$(\theta_r = \theta + \omega_r t)$$

نوشته شود:

$$b_1(t, \theta_r) = B_1 \cos((\omega_1 - \omega_r P_1)t - P_1 \theta_r) \quad (13-1)$$

$$b_2(t, \theta_r) = B_2 \cos((\omega_2 - \omega_r P_2)t - P_2 \theta_r) \quad (14-1)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی‌پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$(\omega_2 - \omega_r P_2) \text{ و } (\omega_1 - \omega_r P_1)$$

بنابراین چگالی شارهادرمبنای موقعیت روتو بافرکانس های زاویه‌های می چرخند. برای وقوع cross

coupling لازم است که جریان های القا شده در روتور توسط $b_2(t, \theta_r)$ و $b_1(t, \theta_r)$ دارای کوپلاژ

مغناطیسی باشند. منظور از داشتن کوپلاژ مغناطیسی اینست که یک گشتاور ثابت (گشتاوری با مقدار

متوسط غیر صفر) تولیدشود. برای آنکه جریان های القا شده توزیع یکسانی داشته باشند، باید اختلاف فاز

مربوط به مکان میله های روتور معادل باشد،

$$P_1 \frac{2\pi}{P_r} = P_2 \frac{2\pi}{P_r} + 2\pi q, q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots :$$

یعنی

برای مقادیر عملی P_1 و P_2 ، q غیر از واحد، تعداد کم و غیر عملی از تعداد میله ها را نتیجه می

دهد،

پس:

$$P_r = P_1 + P_2 \quad (15-1)$$

از اینرو:

$$\omega_1 - P_1 \omega_r = \pm (\omega_2 - P_2 \omega_r) \quad (16-1)$$

بنابراین تحت شرایط رابطه ۱-۱۶ سیم پیچ های استاتور، جریان هایی با فرکانس و توزیع یکسان در

قفس روتور القا می کنند که شرایط لازم برای وقوع cross coupling می باشد:

$$P_r = P_1 + P_2, \omega_r = \frac{\omega_1 + \omega_2}{P_1 + P_2} \quad (\text{الف})$$

$$P_r = P_1 - P_2, \omega_r = \frac{\omega_1 - \omega_2}{P_1 - P_2} \quad (\text{ب})$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

در عمل انتخاب P_r تحت شرط اول بسیار مرسوم تر است زیرا تعداد بیشتری از میله های روتور را نتیجه می دهد (هرچه تعداد میله های روتور کمتر باشد، راکتانس نشتی روتور بیشتر است).

سیم پیچ دوم ممکن است توسط DC تغذیه شود ($\omega_2 = 0$). در این حالت، سرعت روتور را سرعت طبیعی^۱ گویند که دارای رابطه ۱-۱۸ است [۴].

$$\omega_n = \frac{\omega_1}{P_1 + P_2} \quad (18-1)$$

بعلاوه برای وقوع **cross coupling** باید هماهنگی مکانی نیز وجود داشته باشد یعنی اینکه جریان القا

شده در روتور توسط $b_1(t, \theta_r)$ باید یک میدان مغناطیسی شامل مؤلفه هارمونیک با **cross**

coupling اتفاق افتد و البته برعکس. این الزامات می تواند با طراحی بهینه روتور برآورده شود که یکی از

این طراحی ها **nested loop** است و همانطور که ذکر گردید ابتدا توسط **Burbridge** و **Broadway**

معرفی شد [۶].

هنگامیکه شرایط قرارگرفتن در حالت عملکرد سنکرون فراهم شد، ماشین همانند ماشین سنکرون

گشتاور تولید می کند که مقدار آن توسط زاویه بار کنترل می شود. همچنین توان ماشین با نسبت $\frac{\omega_2}{\omega_1}$

بین دو منبع تغذیه استاتور تقسیم می شود. بنابراین اگر تنها انحراف کمی از سرعت طبیعی لازم باشد،

باید سیستم سرعت متغیری با اینورتری که ظرفیت آن تنها بخشی از ظرفیت کلی سیستم است، طراحی

شود. بعلاوه ثابت می شود که ضریب توان ماشین می تواند در حالت سنکرون کنترل شود و ضریب توان

سیم پیچ متصل به شبکه می تواند پیشفاز گردد بنابراین اگر تنها انحراف کمی از سرعت طبیعی لازم

باشد، باید سیستم سرعت متغیری با اینورتری که ظرفیت آن تنها بخشی از ظرفیت کلی سیستم است،

طراحی شود. بعلاوه ثابت می شود که ضریب توان ماشین می تواند در حالت سنکرون کنترل شود و

ضریب توان سیم پیچ متصل به شبکه می تواند پیشفاز گردد [۲۷].

¹ Natural speed

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۱-۵- پتانسیل های کاربرد موتور دوتحریکه بدون جاروبک

ماشین دوتحریکه بدون جاروبک دارای برخی ویژگی های بسیار جذاب است: عملکرد آن بدون نیاز به جاروبک است، عملکرد آن هنگامیکه بعنوان سیستم درایو سرعت متغیر با ضریب توان بالاست و رسیدن به عملکرد سرعت متغیر تنها با استفاده از اینورتری با ظرفیت خیلی کمتر از ظرفیت ماشین امکانپذیر است. پایین بودن ظرفیت اینورتر مورد نیاز، منجر به مزایای اقتصادی قابل توجه خواهد شد زیرا نوعاً قیمت اینورتر بخش غالب قیمت یک درایو سرعت متغیر را تشکیل می دهد [۲۸].

بنابراین بیشترین کاربرد مورد انتظار برای ماشین دوتحریکه بدون جاروبک کاربردی است که نیاز به عملکرد سرعت متغیر (ترجیحاً روی یک بازه سرعت محدود) دارند و در محیط هایی که ضریب توان بالا و عدم وجود جاروبک مطلوب است.

تولید توان بادی در حال حاضر یکی از زمینه های کاربرد مورد علاقه است زیرا دارا بودن مزایایی از قبیل اینورتر با ظرفیت پایین و عملکرد با ضریب توان بالا، استفاده از ماشین های القایی با تغذیه دوگانه را در این حوزه افزایش داده است. ماشین دوتحریکه بدون جاروبک علاوه بر داشتن این مزایا، عملکرد بدون جاروبک را نیز محقق می کند که دارای مزایای قابل توجه بخصوص در مکان های ساحلی است که منابع انرژی بادی بیشتری دارند، زیرا زمان بین تعمیرات و نگهداری و قابلیت اطمینان را افزایش می دهد [۲۹].

کاربرد دیگری که برای این ماشین در نظر گرفته شده است، راه انداز پمپ می باشد. انگیزه اصلی برای استفاده از BDFM در این مورد نیز، نیاز به اینورتر با ظرفیت کاهش یافته است و چون گشتاور راه انداز برای بارهای سیال پایین است، این مزیت می تواند حداکثر گردد [۲۹].

اما برای استفاده از ماشین دوتحریکه بدون جاروبک در مقایسه با ماشین های القایی مرسوم یک ضریب جرمه هزینه وجود دارد. بنظر می رسد که ساختار روتور پیچیده تر است پس هزینه های ساخت اندکی بیشتر است و همچنین ابعاد ماشین اندکی بزرگتر از ماشین های مرسوم با گشتاور خروجی یکسان است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

ولی در حوزه های کاربردی مناسب، مزایای استفاده از ماشین دوتحریکه بدون جاروبک بر افزایش هزینه های ناشی از ساخت غلبه می کند.

۱-۶- هدف رساله

از ابتدای پیدایش ایده ماشین های دوتحریکه بدون جاروبک و بویژه در سال های اخیر، تلاش های زیادی برای مدلسازی ماشین بمنظور تحلیل عملکرد و کنترل آن صورت گرفته است و مدل های حالت پایدار و دینامیکی زیادی نیز توسط محققان ارائه گردیده است. یکی از بهترین و کامل ترین مدل های ارائه گردیده، مدل دینامیکی کوپلاژ مداری^۱ است که در [۴] گزارش شد. استخراج این مدل بر پایه ساختار هندسی و الگوهای سیم پیچی ماشین استوار است و با دقت خوبی رفتار دینامیکی وهارمونیک ماشین را پیش بینی می کند. اما در این میان، کمبود مدلی دینامیکی که بتواند رفتار ماشین را با وجود هر نوع آرایش سیم پیچی تحلیل کند، احساس می شود. در انجام پروژه حاضر، این مدل برای ماشین دوتحریکه بدون جاروبک استخراج گردید که مراحل انجام مدلسازی و نتایج شبیه سازی های انجام شده در این گزارش آورده شده است.

در میان مدل های گوناگونی که برای یک ماشین الکتریکی وجود دارد، مدل اجزا محدود^۲ از همه دقیق تر است و نتایج حاصله از آن هماهنگی بسیار خوبی با نتایج عملکرد واقعی ماشین دارد. کارهای بسیار محدودی برای مدلسازی اجزا محدود ماشین دوتحریکه بدون جاروبک و خصوصاً مدل مغناطیسی-دینامیکی^۳ آن صورت گرفته است. در این گزارش، مدل مغناطیسی - دینامیکی ماشین بطور کامل و گویا برای تحلیل ماشین سالم و ماشینی که دچار خطاهای استاتور گردیده، تشریح شده است. در این رساله استخراج مدل های فوق برای عملکرد موتوری مد نظر بوده است.

¹ Coupled-Circuit

² Finite Element Model (FEM)

³ Magnetodynamic

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

همانطور که در بخش های پیشین این فصل ذکر شد، روتور این ماشین دارای آرایش پیچیده و خاصی است. در میان مقالاتی که با موضوع این ماشین منتشر شده اند، مقالات محدودی به بررسی طراحی و آرایش روتور با جزئیات پرداخته اند. در این رساله ویژگی های این ساختار در انجام عمل تبدیل قطب ها و ایجاد هارمونیک های مکانی با جزئیات دقیق تشریح گردیده است و نتایج مطالعه برای بهبود طراحی روتور با مورب کردن شیارها و حلقه های آن بمنظور کاهش ریپل های گشتاور، ارائه شده است.

۱-۷- ساختار کلی پروژه

این پایان نامه در ۴ فصل تهیه گردیده است. در فصل دوم مبانی روش تئوری جامع هارمونیک در مدلسازی عملکرد حالت پایدار ماشین از منابعی که مستقیماً به معرفی این روش در ماشین دوتحریکه بدون جاروبک پرداخته اند و منابعی که این روش را در سایر ماشین ها بکار می گیرند، بیان شده است. برخی از کمیت های ماشین در سه حالت مختلف عملکرد توسط این روش شبیه سازی شده و نتایج آن ذکر گردیده است. در فصل سوم مدل دینامیکی ماشین با وجود خطاهای استاتور استخراج گردیده و رفتار ماشین در چند مورد از این نوع خطاها برای کارکرد سنکرون شبیه سازی شده اند. در فصل چهارم مدل دو بعدی اجزای محدود و مغناطیسی - دینامیکی ماشین ارائه گردیده و بمنظور اثبات صحت مدل ارائه شده در فصل قبل بکار گرفته شده است.

فصل ۲- تحلیل وضعیت پایدار هارمونیک حالت های مختلف

عملکرد

۲-۱- مقدمه

در فصل قبل بیان شد که موتور دوتحریکه بدون جاروبک می تواند بسته به چگونگی تحریک سیم پیچ های خود، سه حالت عملکرد متفاوت داشته باشد. این حالت های عملکرد عبارت بودند از:

القایی ساده^۱

القایی آبشاری^۲

القایی سنکرون^۳

در این فصل با استفاده از تئوری جامع هارمونیک^۴، که برای BDFM توسط S. Williamson در [۱۱] ارائه شده است هر یک از این سه حالت عملکرد بطور جداگانه مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. این بررسی شامل استخراج عبارات تحلیلی کمیت های ماشین در حالت پایدار هارمونیک، انتقال توان در ماشین و مقایسه عملکرد ماشین با ماشین های استاندارد موجود می باشد.

۲-۲- تحلیل عملکرد در حالت القایی ساده

در صورتیکه یکی از سیم پیچ های استاتور بدون تحریک رها شود (مدار باز باشد) و ماشین از طریق سیم پیچ دیگر خود تغذیه شود، رفتاری همانند یک موتور القایی قفس سنجابی خواهد داشت. با وجودیکه در این حالت عملکردی نمی توان از مزایای BDFM مانند عملکرد سنکرون، سرعت متغیر، جبران سازی ضریب توان و ... بهره برد، اما وجود این حالت عملکردی خود یکی از مزایای ماشین محسوب می شود زیرا

¹ Simple Induction

² Cascade Induction

³ Synchronous

⁴ Generalized harmonic theory

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

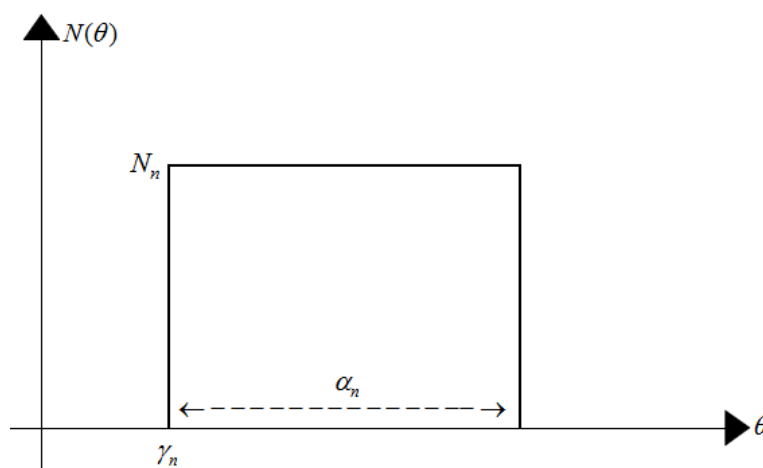
در صورت وقوع خطای مبدل در حین کار و از دست دادن تحریک سیم پیچ کنترل، ماشین با کاهش میزان عملکرد مؤثر، همچنان قادر به تولید گشتاور می باشد.

۱-۲-۲- تحلیل جامع هارمونیکی

رفتار یک موتور القایی سه فاز متعادل وابستگی زیادی به عکس العملی که بین توزیع های پایه جریان استاتور و روتور اتفاق می افتد، دارد. میدان های هارمونیکی را می توان با سهیم کردن آنها در اندوکتانس ناشی اجزای تولید کننده آنها، در نظر گرفت. به همین خاطر است که رفتار موتور می تواند با دقت خوبی توسط مدار معادلی که تنها یک شاخه موازی دارد، مشخص گردد.

در مورد *BDFM* نیز بدون در نظر گرفتن ساختار نامعمول روتور این حقایق برقرار است. بنابراین در تحلیل هایی که در ادامه می آید، توزیع سیم پیچی استاتور کاملاً سینوسی فرض می شود که در اثر تحریک توسط یک منبع ولتاژ سه فاز متعادل تنها یک توزیع نیرومحرکه مغناطیسی^۱ در فرکانس پایه تولید می کند. همچنین اثرات میدان های هارمونیکی استاتور در راکتانس ناشی آن لحاظ می گردد.

تابع توزیع هادی مختلط برای کوئل n ام که دارای N_n دور است و درشیارهایی واقع درزوایای γ_n و $\alpha_n + \gamma_n$ جا زده شده است از رابطه ۱-۲ پیروی می کند.



شکل ۱-۲: تابع توزیع هادی یک کوئل سیم پیچی استاتور

¹ Magnetomotive Force (MMF)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی‌پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$c_s^n(\theta) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} C_{sh}^n e^{-jhp\theta} \quad (1-2)$$

که در این رابطه C_{sh}^n از روابط ۲-۲ و ۳-۲ بدست می آید.

$$C_{sh}^n = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_n}^{\gamma_n + \alpha_n} N_n \{ \delta(\theta - \gamma_n) - \delta(\theta - (\gamma_n + \alpha_n)) \} e^{jPh\theta} d\theta \quad (2-2)$$

$$C_{sh}^n = \frac{-j}{\pi} N_n \sin\left(\frac{\pi h \alpha_n}{2}\right) e^{jPh(\gamma_n + \frac{\alpha_n}{2})} \quad (3-2)$$

تابع توزیع هادی مختلط برای سیم پیچی که از M کویل سری با یکدیگر تشکیل شده، از مجموع توابع توزیع کویل های آن محاسبه می شود.

$$c_s(\theta) = \sum_{n=1}^M c_s^n(\theta) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} C_{sh} e^{-jhp\theta} \quad (4-2)$$

با این فرض که سیم پیچی استاتور کاملا سینوسی است و دارای P جفت قطب می باشد روابط ۲-۵ و

۲-۶ برای توزیع هادی مختلط آن برقرار خواهد بود.

$$c_s(\theta) = C_{s1} e^{-jP\theta} + C_{s(-1)} e^{jP\theta} \quad (5-2)$$

$$C_{s(-1)} = C_{s1}^* \quad (6-2)$$

از این پس C_{s1} بطور ساده با C_s نشان داده می شود [۳۰]

امپدانس های خودی استاتور : سیم پیچ سه فاز متعادل استاتور را می توان در قالب تحلیلی

توزیع هادی مختلط نوشت.

$$c_A(\theta) = C_s e^{-jP\theta} + C_s^* e^{jP\theta} \quad (7-2)$$

$$c_B(\theta) = C_s e^{-j(P\theta - \frac{2\pi}{3})} + C_s^* e^{j(P\theta - \frac{2\pi}{3})} \quad (8-2)$$

$$c_C(\theta) = C_s e^{-j(P\theta + \frac{2\pi}{3})} + C_s^* e^{j(P\theta + \frac{2\pi}{3})} \quad (9-2)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

زیرنویس های A ، B و C نشان دهنده سه فاز هستند و P تعداد جفت قطب های پایه سیم پیچی است. استفاده از توزیع هادی مختلط امکان تحلیل ماشین را در هر ترکیب خاص از کوپل ها فراهم می آورد و جداسازی نقش توزیع هادی ها و جریان ها را در تولید MMF امکان پذیر می سازد.

این سیم پیچ متعادل توسط جریان های سه فاز متعادل با توزیع های زمانی روابط ۲-۱۰ تا ۲-۱۲ تغذیه می شوند.

$$i_A(t) = \text{Re}\{I_s e^{j\omega t}\} \quad (10-2)$$

$$i_B(t) = \text{Re}\left\{I_s e^{j\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}\right\} \quad (11-2)$$

$$i_C(t) = \text{Re}\left\{I_s e^{j\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)}\right\} \quad (12-2)$$

توزیع چگالی جریان سطحی در جهت طول محوری ماشین از حاصلضرب توزیع های هادی مختلط در جریان های مربوطه و جمع کردن آنها بدست می آید.

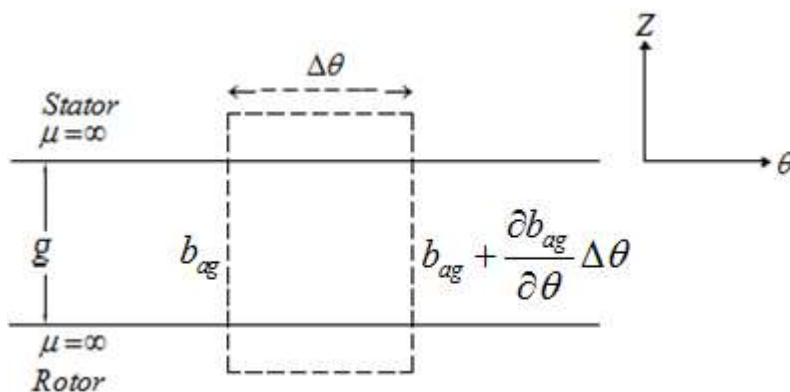
$$J_s(\theta, t) = \sum_i c_i(\theta) i_i(t) \quad , i = A, B, C \quad (13-2)$$

از آنجاییکه $c_i(\theta)$ کاملاً حقیقی است، عبارت بالا را می توان بصورت رابطه ۲-۱۴ نوشت.

$$J_s(\theta, t) = \text{Re}\{J_{sm} e^{j(\omega t - P\theta)}\} \quad , J_{sm} = 3I_s C_s \quad (14-2)$$

رابطه ۲-۱۴ یک شکل موج MMF چرخان را توصیف می کند که J_{sm} مقدار rms آن در هر نقطه روی سطح استاتور است. میدان فاصله هوایی که ناشی از MMF استاتور تولید می گردد با اعمال قانون آمپر حول حلقه نشان داده شده در شکل ۲-۲ و از معادله ۲-۱۵ بدست می آید.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۲-۲: قانون حلقه آمپر، استفاده شده در استخراج رابطه ۱۵-۲

$$\frac{\partial b_{ag}(t, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\mu_0}{g} J_s(t, \theta) \quad (15-2)$$

بنابراین موج چگالی شار در فاصله هوایی به صورت رابطه ۱۶-۲ است.

$$b_{ag}(\theta, t) = \text{Re}\{B_{ag} e^{j(\omega t - p\theta)}\}, \quad B_{ag} = j \frac{\mu_0}{\pi g} J_{sm} \quad (16-2)$$

شدت میدان الکتریکی در سطح استاتور با اعمال قانون فارادی محاسبه می شود. میدان فاصله هوایی

کاملاً در جهت Z می باشد اما شدت میدان الکتریکی فقط در جهت θ تغییر می کند، پس:

$$\frac{\partial e_s(\theta, t)}{\partial \theta} = \frac{\partial b_{ag}(\theta, t)}{\partial t} \quad (17-2)$$

با محاسبه معادله ۱۷-۲، شدت میدان الکتریکی به شکل استاندارد رابطه ۱۸-۲ در می آید.

$$e_s(\theta, t) = \text{Re}\{E_s e^{j(\omega t - p\theta)}\}, \quad E_s = -\frac{\omega}{p} B_{ag} \quad (18-2)$$

نیروی محرکه الکتریکی القایی ۱ در هر فاز می تواند از حاصلضرب شدت میدان الکتریکی هر فاز در

توزیع هادی مختلط آن فازو سپس انتگرال گیری از این حاصلضرب روی سطح استاتور بدست آید. نیروی

محرکه الکتریکی القایی در فاز **A** بعنوان فاز مرجع از رابطه ۱۹-۲ محاسبه می گردد.

$$u_A(t) = \frac{dW}{2} \int_0^{2\pi} c_A(\theta) e_s(\theta, t) d\theta \quad (19-2)$$

¹ Electromotive Force (EMF)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

در این عبارت انتگرال گیری در جهت محوری با ضرب طول محوری (W) جایگزین شده است زیرا میدان تنها دارای تغییرات در یک بعد است. با جایگذاری عبارت کمیت ها و در نظر گرفتن این واقعیت که $c_A(\theta)$ کاملاً حقیقی است (پس عبارت آن می تواند وارد عملگر Re شود)، رابطه EMF القایی در فاز A سیم پیچی به شکل استاندارد رابطه ۲-۲۰ بدست می آید.

$$u_A(t) = Re\{U_s e^{j\omega t}\} = \pi W d Re\left\{\frac{-j3\mu_0 \omega I_s C_s C_s^*}{P^2 g} e^{j\omega t}\right\} \quad (20-2)$$

رابطه بین ولتاژ القایی و جریان تحریک مطابق رابطه ۲-۲۱ می باشد.

$$U_s = -Z_s I_s \quad (21-2)$$

که Z_s امپدانس فازی سیم پیچی استاتور است و علامت منفی در این رابطه برای در نظر گرفتن جهت جریان لحاظ شده است. از این رابطه می توان عبارت تحلیلی امپدانس استاتور را بصورت رابطه ۲-۲۲ یافت. این امپدانس کاملاً موهومی است و در واقع بیان کننده راکتانس مغناطیس کننده یک فاز سیم پیچی استاتور ماشینی سه فاز با P جفت قطب است [۳۰۹۱]

$$Z_s = \frac{-j3\mu_0 \omega C_s C_s^*}{P^2 g} \quad (22-2)$$

امپدانس کوپلاژ استاتور به روتور: روتور BDFM دارای تعدادی حلقه اتصال کوتاه شده در گروه هایی به نام $nest$ است. پس هر حلقه از روی شماره $nest$ و مکان قرار گرفتنش در $nest$ مشخص می شود. فرض کنید که $nest$ شماره ۱ به صورت متقارن حول مرجع روتور قرار گرفته باشد و حلقه ها در هر از خارجی ترین حلقه (حلقه شماره ۱) تا داخلی ترین $nest$ آنها (حلقه شماره P_r) شماره گذاری شده باشند.

هر زیرسیستم از روتور بصورت مجموعه تمامی حلقه های با شماره حلقه یکسان در $nest$ های روتور تعریف می شود. روتور دارای N_r گروه $nest$ است. پس N_r حلقه در هر زیرسیستم و در مجموع P_r زیرسیستم وجود دارد.

هر حلقه را می توان به صورت یک کوپل تک دوره در نظر گرفت که در قالب توزیع هادی مختلط قابل توصیف است. اما در مورد حلقه های روتور بر خلاف سیم پیچ های استاتور که با دقت خوبی از هارمونیک

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

های مکانی از مرتبه بالا در تابع توزیع هادی های آن صرفنظر می شد، تابع توزیع هادی های آن سرشار از هارمونیک مکانی است. رابطه ۲-۲۳ بیان کننده تابع توزیع هادی مختلط حلقه n از زیرسیستم R است.

$$c_{R,n}(\theta_r) = \sum_{\mu} C_{R\mu} e^{j\mu(\theta_r - (n-1)\frac{2\pi}{N_r})}, \mu \neq 0 \quad (23-2)$$

که در این رابطه، $C_{R\mu}$ دامنه هارمونیک مکانی مرتبه μ از تابع توزیع هادی مختلط حلقه شماره ۱ از زیرسیستم R است. تنها محدودیت روی μ آنست که یک عدد صحیح غیر صفر می باشد. میدان استاتور در فاصله هوایی را می توان با تعریف لغزش s (رابطه ۲-۲۵) از مرجع استاتور به مرجع روتور منتقل کرد (رابطه ۲-۲۴).

$$b_{ag}(\theta_r, t) = \text{Re}\{B_{ag} e^{j(s\omega t - p\theta_r)}\} \quad (24-2)$$

$$s = \frac{\omega - p\omega_r}{\omega} \quad (25-2)$$

که ω_r سرعت زاویه ای روتور بر حسب رادیان بر ثانیه است.

این میدان چرخان EMF هایی را در حلقه های زیرسیستم های روتور القا می کند که دارای دامنه

یکسان هستند اما به $\mu(n-1)\frac{2\pi}{N_r}$ با حلقه ای از زیرسیستم که در $nest$ مرجع قرار گرفته، اختلاف فاز دارند. نیرو محرکه الکتریکی القایی در حلقه مرجع از قانون شارهای قطع کننده بدست می آید:

$$e_r(\theta_r, t) = v b_{ag}(\theta_r, t) \quad (26-2)$$

که در این رابطه v سرعت روتور نسبت به میدان است و از رابطه ۲-۲۷ پیروی می کند.

$$v = -\frac{s\omega}{p} \quad (27-2)$$

بنابراین توزیع شدت میدان القایی در روتور به شکل استاندارد رابطه ۲-۲۸ نوشته می شود.

$$e_r(\theta_r, t) = \text{Re}\{E_r e^{j(s\omega t - p\theta_r)}\}, E_r = -\frac{s\omega}{p} B_{ag} \quad (28-2)$$

نیرو محرکه الکتریکی القایی در حلقه شماره n از زیرسیستم شماره R روتور از حاصل ضرب تابع توزیع

هادی مربوطه در شدت میدان الکتریکی بدست می آید:

$$u_{R,n}(t) = \frac{dW}{2} \int_0^{2\pi} c_{R,n}(\theta_r) e_r(\theta_r, t) d\theta_r \quad (29-2)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

حاصل این انتگرال بجز برای $\mu = P$ صفر است، پس:

$$u_{R,n}(t) = \pi W d \operatorname{Re}\{C_{RP}^* E_r e^{-jP(n-1)\frac{2\pi}{N_r}} e^{js\omega t}\} \quad (30-2)$$

این معادله نشان می دهد که میدان استاتور EMF هایی دارای توزیع P قطب در حلقه های زیرسیستم R القا می کند. این بدان معناست که جریان هایی که از این حلقه ها عبور می کنند دارای الگوی مشابهی هستند. پس جریان گذرنده از n امین حلقه زیرسیستم R دارای توزیع رابطه ۲-۳۱ است.

$$i_{R,n}(t) = \operatorname{Re}\{I_R e^{j(s\omega t - P(n-1)\frac{2\pi}{N_r})}\} \quad (31-2)$$

که I_R دامنه جریان گذرنده از حلقه اول زیرسیستم R است.

نیرو محرکه الکتریکی القایی در حلقه اول از زیرسیستم R با قرار دادن $n=1$ در رابطه ۲-۳۰ بدست می

آید.

$$u_{R,1}(t) = \pi W d \operatorname{Re}\{U_R e^{js\omega t}\}, U_R = -j \frac{3s\omega\pi W d \mu_0}{gP^2} C_s C_{RP}^* I_s \quad (32-2)$$

بر اساس این رابطه می توان امپدانس کوپلاژ بین زیرسیستم R روتور و فازهای سیم پیچی استاتور را یافت [۱۱]

$$Z_{sR} = -j \frac{3s\omega\pi W d \mu_0}{gP^2} C_s C_{RP}^* \quad (33-2)$$

امپدانس کوپلاژ روتور به استاتور: در ادامه محاسبات مربوط به یافتن امپدانس کوپلاژ روتور به

استاتور بیان می شود. توزیع جریان سطحی روتور که در اثر عبور جریان از حلقه های زیرسیستم R تولید

می شود، از حاصل ضرب جریان در هر حلقه با تابع توزیع هادی آن و سپس جمع کردن حاصل ضرب ها

بدست می آید.

$$J_R(\theta_r, t) = \sum_{i=1}^{N_r} i_{R,n}(t) c_{R,n}(\theta_r) \quad (34-2)$$

که $c_{R,n}(\theta_r)$ کاملاً حقیقی است و می تواند وارد عملگر Re شود. پس رابطه ۲-۳۴ به شکل رابطه ۲-۳۵

۳۵ نوشته می شود.

$$J_R(\theta_r, t) = \operatorname{Re}\{\sum_{\mu} I_R C_{R\mu} e^{j(s\omega t - \mu\theta_r)} * \sum_{n=1}^{N_r} e^{-j(P-\mu)(n-1)\frac{2\pi}{N_r}}\} \quad (35-2)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

حاصل جمع نهایی این عبارت بجز برای $\mu = P + qN_r, q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ صفر می شود. با

محدود کردن μ به این مقادیر، توزیع چگالی سطحی جریان زیرسیستم مطابق رابطه ۲-۳۶ خواهد بود.

$$J_R(\theta_r, t) = \text{Re}\{\sum_q J_{R(P+qN_r)} e^{j(s\omega t - (P+qN_r)\theta_r)}\}, J_{R(P+qN_r)} = N_r I_R C_{R(P+qN_r)} \quad (2-36)$$

میدان مغناطیسی که در اثر توزیع جریان رابطه بالا تولید می گردد دارای رابطه ۲-۳۷ است.

$$b_{agR}(\theta_r, t) = \text{Re}\{\sum_q B_{agR(P+qN_r)} e^{j(s\omega t - (P+qN_r)\theta_r)}\}, B_{agR(P+qN_r)} = \frac{j\mu_0}{(P+qN_r)g} J_{R(P+qN_r)} \quad (2-37)$$

برای بررسی EMF القایی این توزیع میدان در سیم پیچ های استاتور لازم است تا رابطه میدان تولیدی

روتور به مرجع استاتور منتقل گردد. با جایگذاری عبارت s و رابطه تبدیل مرجع بصورت $\theta = \theta_r + \omega_r t$

، میدان تولیدی زیرسیستم R روتور به مرجع استاتور منتقل می شود.

$$b_{agR}(\theta, t) = \text{Re}\{\sum_q B_{agR(P+qN_r)} e^{j((\omega + qN_r\omega_r)t - (P+qN_r)\theta)}\} \quad (2-38)$$

این معادله نشان می دهد که بجز برای $q = 0$ ، فرکانس $b_{agR}(\theta, t)$ برابر فرکانس منبع تغذیه یعنی

ω نخواهد شد مگر اینکه روتور قفل شود یا به ازای بعضی از سرعت های خاص. مقادیر غیر صفر q

، هارمونیک های شیاریندی روتور ناشی از میدان پایه استاتور هستند. تاثیری که این هارمونیک ها بر سیم

پیچ های استاتور دارند، بصورت القای EMF هایی با فرکانس غیر از فرکانس منبع می باشد که می تواند به

کلی نادیده گرفته شود. برای بررسی کوپلاژ روتور به استاتور، فرض می شود که q برابر صفر است. تحت

این شرایط میدان تولیدی زیرسیستم R روتور در مرجع استاتور دارای توزیعی بصورت رابطه ۲-۳۹ است.

$$b_{agR}(\theta, t) = \text{Re}\{\sum_q B_{agRP} e^{j(\omega t - P\theta)}\} \quad (2-39)$$

این رابطه مشابه رابطه میدان تولیدی استاتور در فاصله هوایی می باشد. پس با همان استدلال ها و طی

روندی مشابه آنچه در روابط ۲-۲۶ تا ۲-۳۲ انجام شد، عبارت دامنه ولتاژ القایی روتور در سیم پیچ های

استاتور بصورت رابطه ۲-۴۰ بدست می آید.

$$U_{Rs} = -j \frac{N_r \omega W \pi d \mu_0}{g P^2} C_s^* C_{RP} I_R \quad (2-40)$$

بر اساس این رابطه امپدانس کوپلاژ بین توزیع جریان با P قطب در زیرسیستم R روتور و استاتور

بصورت رابطه ۲-۴۱ خواهد بود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

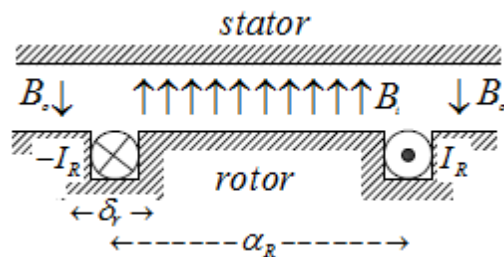
$$Z_{RS} = j \frac{N_r \omega W \pi d \mu_0}{q P^2} C_s^* C_{RP} \quad (41-2)$$

با مقایسه روابط مربوط به Z_{RS} و Z_{SR} نتیجه زیر حاصل می شود:

$$\frac{Z_{SR}}{Z_{RS}} = \frac{3 s C_s C_{RP}^*}{N_r 1 C_s^* C_{RP}} \quad (42-2)$$

عبارت اول در معادله بالا مربوط به تبدیل تعداد فازها است زیرا N_r حلقه در زیرسیستم روتور تشکیل یک سیستم با N_r فاز را می دهند. ضریب دوم مربوط به تبدیل فرکانس بر اساس چرخش روتور می باشد و عبارت سوم یک فاکتور تغییر فاز است که اجازه لحاظ نمودن اثر موقعیت نسبی مرجع استاتور (یعنی فاز A) و حلقه مرجع روتور (حلقه شماره ۱) را می دهد. [۱]

امپدانس کوپلاژ روتور به روتور : از همان روش های هارمونیک که برای محاسبه امپدانس های استاتور، استاتور به روتور و روتور به استاتور استفاده شد می توان برای استخراج روابط امپدانس های روتور نیز استفاده کرد. اما طبیعت روتور به گونه ای است که استفاده از روش مستقیم تری را ممکن می سازد. شکل ۲-۳ یک حلقه از روتور را نشان می دهد که به اندازه α_R امتداد دارد و جریان $i_R(t)$ از آن عبور می کند. با اعمال قانون آمپر و این محدودیت که مجموع شار داخل شونده یا خارج شونده از سطح روتور برابر صفر است، ثابت می شود که چگالی شار گذرنده از فاصله هوایی از داخل حلقه و از خارج آن بترتیب از روابط ۲-۴۳ و ۲-۴۴ پیروی می کند [۴].



شکل ۲-۳: چگالی شار تولیدی با عبور جریان از یک حلقه روتور

$$B_i = \frac{\mu_0}{g} \left(1 - \frac{\alpha_R}{2\pi} \right) i_R \quad (43-2)$$

$$B_o = -\frac{\mu_0 \alpha_R}{2\pi g} i_R \quad (44-2)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

شاری که حلقه شماره ۱ از زیرسیستم R را قطع می کند و ناشی از جریان های عبوری از حلقه های همان زیرسیستم است از رابطه ۴۵-۲ محاسبه می شود.

$$\varphi_{R,1}(t) = Re\left\{\frac{\alpha_R W d}{2} I_R e^{j\omega t} \left(\frac{\mu_0}{g} \left(1 - \frac{\alpha_R}{2\pi}\right) - \sum_{n=2}^{N_r} \frac{\mu_0 \alpha_R}{2\pi g} e^{-jP(n-1)\frac{2\pi}{N_r}}\right)\right\} \quad (45-2)$$

این معادله بر اساس این واقعیت بدست می آید که هر حلقه توسط شار داخلی خود و شار خارجی سایر حلقه ها قطع می گردد. حاصل رابطه ۴۵-۲ پس از ساده شدن در رابطه ۴۶-۲ آورده شده است.

$$\varphi_R(t) = Re\left\{\frac{\mu_0 \alpha_R W d}{2g} I_R e^{j\omega t}\right\} \quad (46-2)$$

نیرو محرکه الکتریکی القایی در این حلقه مطابق رابطه ۴۷-۲ بدست می آید.

$$e_{R,1}(t) = \frac{d\varphi_{R,1}(t)}{dt} = Re\left\{j \frac{\omega \mu_0 \alpha_R W d}{2g} I_R e^{j\omega t}\right\} \quad (47-2)$$

بنابراین امپدانس خودی زیرسیستم R بصورت رابطه ۴۸-۲ بدست می آید.

$$Z_R = j \frac{\omega \mu_0 \alpha_R W d}{2g} \quad (48-2)$$

امپدانس محاسبه شده در رابطه ۴۸-۲ تنها مربوط به شار است که فاصله هوایی را قطع می کند. برای بدست آوردن امپدانس مؤثر زیرسیستم لازم است تا مقاومت و راکتانس ناشی از شارهای غیر از شار فاصله هوایی را نیز به آن اضافه کرد.

$$Z_R = j \frac{\omega \mu_0 \alpha_R W d}{2a} + R_R + jS X_{Rl} \quad (49-2)$$

که X_{Rl} و R_R بترتیب مقاومت و راکتانس ناشی از حلقه های زیرسیستم R می باشند.

اما شار تولیدی حلقه هایی که در دیگر زیرسیستم های روتور قرار دارند نیز از حلقه فوق الذکر عبور می کند که به معنای وجود امپدانس متقابل بین زیرسیستم های روتور می باشد. برای بررسی این اثر، شار عبوری از حلقه مرجع زیرسیستم R_i ناشی از جریان های عبوری از حلقه های زیرسیستم R_j در رابطه ۲-۵۰ محاسبه شده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$\varphi_{R_i, R_j} = Re \left\{ \frac{\alpha_{R_i} W d}{2} I_{R_j} e^{j s \omega t} \left(\frac{\mu_0}{g} \left(1 - \frac{\alpha_{R_j}}{2\pi} \right) - \sum_{n=2}^{N_r} \frac{\mu_0 \alpha_{R_j}}{2\pi g} e^{-j P(n-1) \frac{2\pi}{N_r}} \right) \right\} \quad (50-2)$$

بترتیب زوایای امتداد حلقه ها در زیرسیستم های R_i و R_j فرض شده است که α_{R_i} کوچکتر از α_{R_j} می باشد یعنی حلقه های زیرسیستم R_i درون حلقه های زیرسیستم R_j قرار دارند. با محاسبه مشابه رابطه ۲-۴۷ عبارت تحلیلی امپدانس متقابل بین زیرسیستم های روتور بصورت رابطه ۲-۵۱ بدست می آید.

$$Z_{R_i R_j} = j \frac{s \omega \mu_0 \alpha_{R_j} W d}{2a}, \quad \alpha_{R_i} < \alpha_{R_j} \quad (51-2)$$

این امپدانس کاملاً القایی است و در واقع راکتانس بین دو زیرسیستم را نشان می دهد. همانگونه که انتظار می رود میتوان نشان داد که [۱۱]:

$$Z_{R_i R_j} = Z_{R_j R_i} \quad (52-2)$$

چون حلقه های زیرسیستم های روتور در یک حلقه انتهایی اتصال کوتاه کننده مشترک هستند، رابطه امپدانس متقابل زیرسیستم های روتور بصورت رابطه ۲-۵۳ با در نظر گرفتن مقاومت و راکتانس نشتی قسمتی از حلقه انتهایی که بین حلقه ها مشترک است، اصلاح می شود.

$$Z_{R_i R_j} = j \frac{s \omega \mu_0 \alpha_{R_j} W d}{2g} + R_e + j s X_e, \quad \alpha_{R_i} < \alpha_{R_j} \quad (53-2)$$

بترتیب مقاومت و راکتانس برای امتداد حلقه کوچکتر هستند. X_e و R_e

معادلات تعادل ولتاژ: جریان بخش های مختلف ماشین از حل سیستم معادلات تعادل ولتاژ

بصورت همزمان محاسبه می شود. معادله تعادل ولتاژ برای استاتور بصورت رابطه ۲-۵۴ نوشته می شود.

$$V_s = I_s (R_s + j X_s + Z_s) + \sum_{R_i=1}^{P_r} Z_{R_i s} I_{R_i} \quad (54-2)$$

در این معادله امپدانس مغناطیس کننده استاتور با مقاومت و راکتانس نشتی آن جمع می شود. معادله تعادل ولتاژ برای زیرسیستم R_i روتور بصورت رابطه ۲-۵۵ است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$0 = I_s Z_{sR_i} + \sum_{R_j=1}^{P_r} Z_{R_i R_j} I_{R_j} \quad (55-2)$$

بنابراین سیستمی با $P_r + 1$ معادله و $P_r + 1$ مجهول حاصل می شود که در صورت مشخص بودن ولتاژ استاتور و سرعت روتور قابل حل است. معادلات روتور را می توان بصورت معادلات ماتریسی نوشت که در روابط ۵۶-۲ تا ۵۹-۲ آورده شده است.

$$0 = Z_{sr} I_s + Z_r I_r \quad (56-2)$$

$$Z_{sr} = [Z_{sR_1} \quad Z_{sR_2} \quad \dots \quad Z_{sR_{P_r}}]^T \quad (57-2)$$

$$Z_r = \begin{bmatrix} Z_{R_1 R_1} & Z_{R_1 R_2} & \dots & Z_{R_1 R_{P_r}} \\ Z_{R_2 R_1} & Z_{R_2 R_2} & \dots & Z_{R_2 R_{P_r}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{R_{P_r} R_1} & Z_{R_{P_r} R_2} & \dots & Z_{R_{P_r} R_{P_r}} \end{bmatrix} \quad (58-2)$$

$$I_r = [I_{R_1} \quad I_{R_2} \quad \dots \quad I_{R_{P_r}}]^T \quad (59-2)$$

حل معادله رابطه ۵۶-۲ بصورت رابطه ۶۰-۲ خواهد بود.

$$I_r = -Z_r^{-1} Z_{sr} I_s \quad (60-2)$$

با جایگذاری عبارت بالا در معادله ۵۴-۲، رابطه ۶۱-۲ بدست می آید که می تواند مستقیماً برای یافتن

I_s حل شود و سپس با استفاده از رابطه ۶۰-۲ جریان های روتور محاسبه گردد.

$$V_s = I_s (R_s + jX_s + Z_s - Z_{rs}^T Z_r^{-1} Z_{rs}) \quad (61-2)$$

گشتاور: عبارت کلی برای گشتاور عمل کننده روی استاتور بصورت رابطه ۶۲-۲ است.

$$T_s = -\frac{wd}{2} \int_0^{2\pi} J_s(\theta, t) b_{ag}(\theta, t) d\theta \quad (62-2)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

که در این رابطه $J_s(\theta, t)$ چگالی سطحی جریان استاتور است که در رابطه ۲-۱۴ تعریف شده است و $b_{ag}(\theta, t)$ میدان فاصله هوایی بصورت مجموع مؤلفه های میدان های تولیدی استاتور و روتور می باشد.

$$b_{ag}(\theta, t) = b_{ags}(\theta, t) + b_{agr}(\theta, t) \quad (۶۳-۲)$$

هنگامیکه از حاصل ضرب $J_s(\theta, t)$ در $b_{ags}(\theta, t)$ روی θ از ۰ تا 2π انتگرال گرفته می شود، نتیجه برابر صفر خواهد بود. این مسئله مورد انتظار است زیرا در غیر اینصورت جریان تحریک در یک ماشین استوانه ای بدون نیاز به جریان های روتور قادر به تولید گشتاور است. پس رابطه ۲-۶۲ بصورت رابطه ۲-۶۴ تبدیل می شود.

$$T_s = -\frac{Wd}{2} \int_0^{2\pi} J_s(\theta, t) b_{agr}(\theta, t) d\theta \quad (۶۴-۲)$$

با جایگذاری عبارت کمیت های انتگرال و ساده کردن حاصل آن، عبارت گشتاور الکترومکانیکی استاتور ماشین صورت رابطه ۲-۶۵ بدست می آید.

$$T_s = -3 \frac{\pi W d \mu_0}{2 P g} N_r \operatorname{Re} \left\{ j \sum_{i=1}^{P_r} I_s^* I_{R_i} C_{R_i P} C_s^* \right\} \quad (۶۵-۲)$$

این رابطه گشتاور عمل کننده روی استاتور را بیان می کند. پس گشتاور روتور منفی این عبارت است.

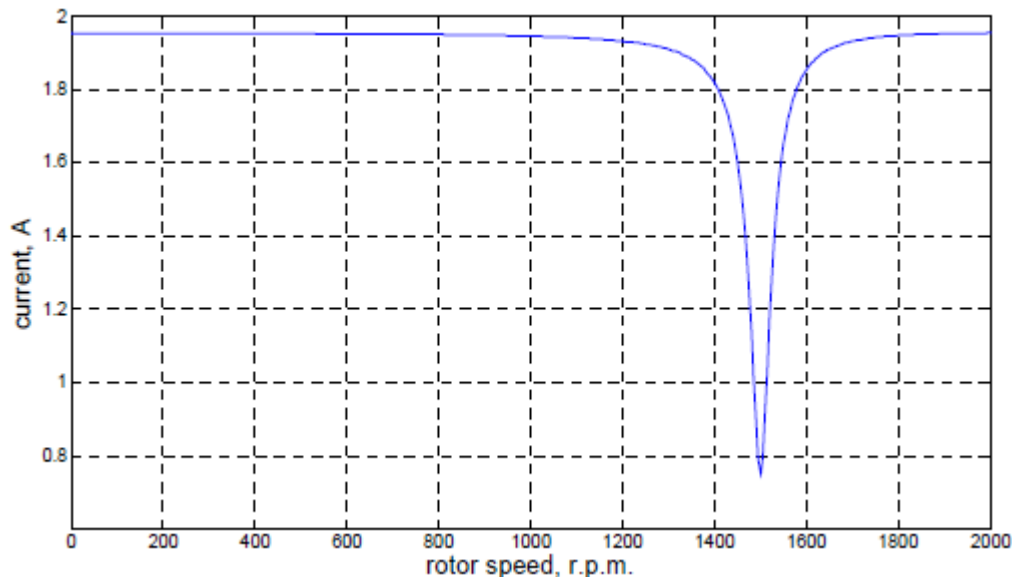
$$T_r = 3 \frac{\pi W d \mu_0}{2 P g} N_r \operatorname{Re} \left\{ j \sum_{i=1}^{P_r} I_s^* I_{R_i} C_{R_i P} C_s^* \right\} \quad (۶۶-۲)$$

برای تحلیل موتور دوتحریکه بدون جاروبک در حالت القایی ساده، کمیت های سیم پیچ تحریک جایگزین پارامترهای موجود در محاسبات انجام شده در این بخش می گردد [۱۱].

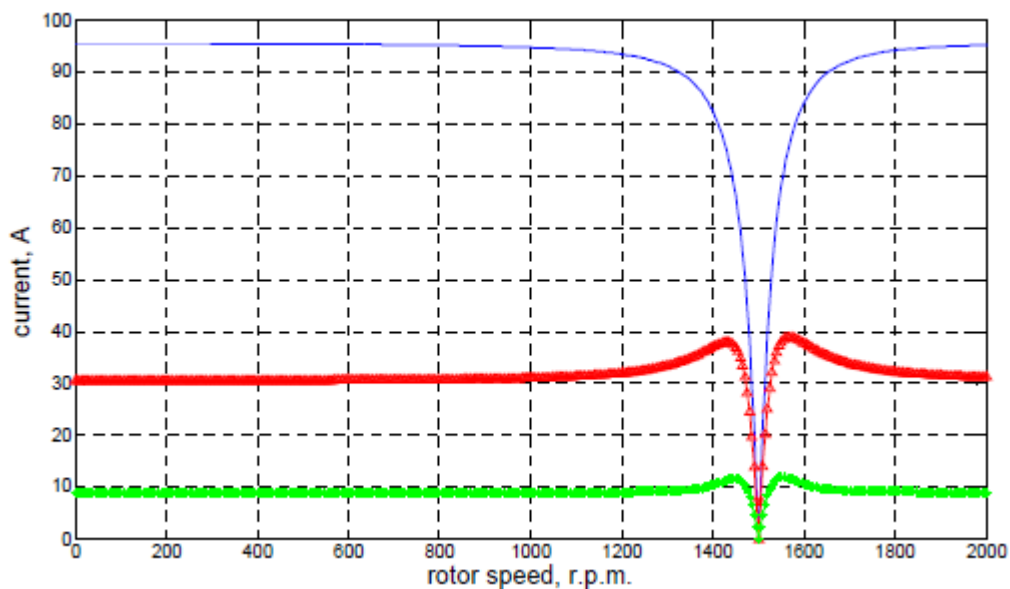
در شکل های ۲-۴ تا ۲-۶ بترتیب جریان استاتور، جریان زیرسیستم های روتور منتقل شده به طرف استاتور و گشتاور ماشین در سرعت های مختلف و با تحریک سیم پیچ توان نشان داده شده است. تحریک سیم پیچ توان توسط یک منبع تغذیه سه فاز متعادل با دامنه V ۹۰ و فرکانس Hz ۵۰ انجام شده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

تمامی شبیه سازی های انجام شده بر اساس پارامترهای ماشین ساخته شده در دانشگاه کمبریج است که در ضمیمه الف ذکر شده است.

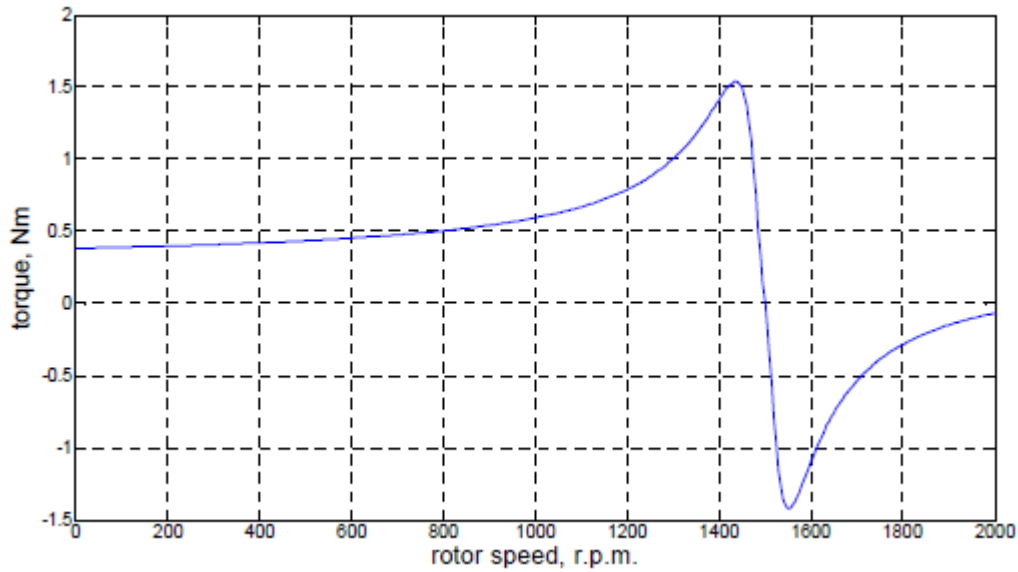


شکل ۲-۴: جریان یک فاز سیم پیچ توان در عملکرد القایی ساده



شکل ۲-۵: جریان حلقه های روتور واقع در nest مرجع در عملکرد القایی ساده

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



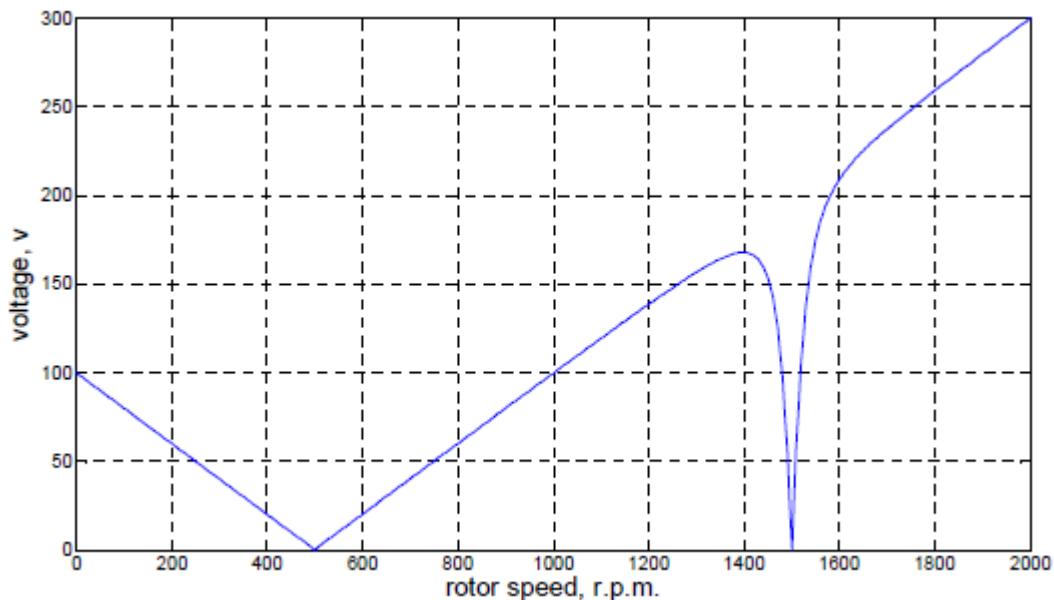
شکل ۶-۲: گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی در عملکرد القایی ساده با تحریک سیم پیچ توان

ولتاژ القایی در سیم پیچ کنترل از رابطه ۶۷-۲ محاسبه می شود. منحنی ولتاژ القایی در هر فاز سیم

پیچ مدار باز کنترل برحسب سرعت، منتقل شده به سمت سیم پیچ توان در شکل ۷-۲ نشان داده شده

است.

$$V_c = Z_{Risc} Z_r^{-1} Z_{sp} R_i I_{sp}^* \quad (۶۷-۲)$$



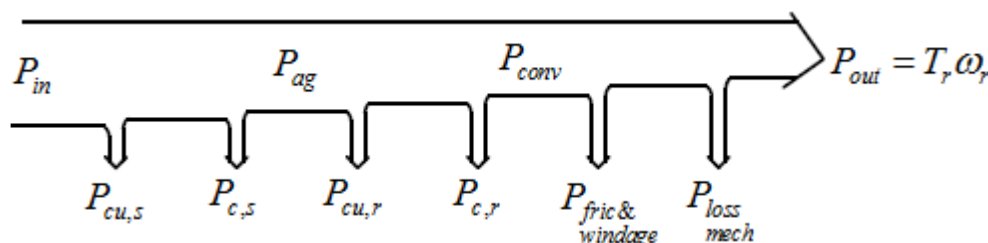
شکل ۷-۲: ولتاژ القایی در یک فاز سیم پیچ کنترل در عملکرد القایی ساده با تحریک سیم پیچ توان

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۲-۲-۲- انتقال توان و تلفات در عملکرد القایی ساده

شکل ۸-۲ نمودار انتقال توان و تلفات اکتیو موتور دوتحریکه بدون جاروبک را در حالت عملکرد القایی

ساده نشان می دهد.



شکل ۸-۲ : نمودار انتقال توان اکتیو در عملکرد القایی ساده

همانطور که از شکل واضح است توان ورودی بطور مثال در اثر تحریک سیم پیچ توان تامین می شود . قسمتی از توان ورودی بشکل تلفات مس و آهن استاتور در می آید و مابقی توان در فاصله هوایی را تشکیل می دهد . با ورود این توان به روتور قسمتی از آن بصورت تلفات مس و آهن روتور درآمده و بقیه به توان مکانیکی تبدیل می شود . توان مکانیکی خروجی یا توان مفید ماشین از کم کردن P_{conv} از تلفات اصطکاک و بادخوری ($P_{fric \& \text{windage}}$) و تلفات مکانیکی اضافی ($P_{loss \text{ mech.}}$) بدست می آید و این همان توانی است که سبب چرخش ماشین و تولید گشتاور می شود . با فرض اینکه سیم پیچ توان ماشین تحریک شده، عبارات کمیت های موجود در نمودار انتقال توان شکل ۸-۲ از روابط ۲-۶۸ تا ۲-۷۲ محاسبه می شوند.

$$P_{in} = Re\{V_p I_p^*\} \quad (۲-۶۸)$$

$$P_{cu,s} = R_p I_p^2 \quad (۲-۶۹)$$

$$P_{ag} = P_{in} - P_{cu,s} - P_{c,s} = Re\{\sum_{i=1}^{Pr} Z_{R_i s p} I_{R_i}^2\} \quad (۲-۷۰)$$

$$P_{conv} = P_{ag} - N_r \sum_{i=1}^{Pr} R_{R_i} I_{R_i}^2 - P_{c,r} \quad (۲-۷۱)$$

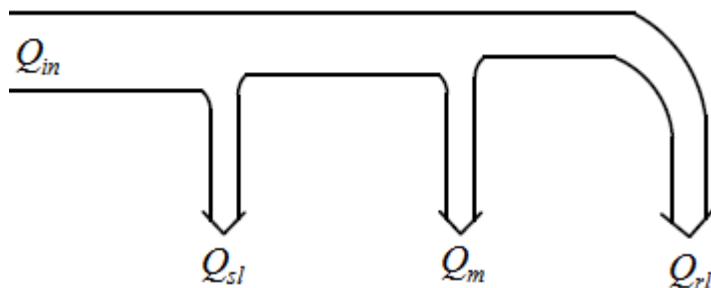
$$P_{out} = P_{conv} - P_{fric \& \text{windage}} - P_{loss \text{ mech.}} = T_r \omega_r \quad (۲-۷۲)$$

شکل ۹-۲ نمودار انتقال توان راکتیو را در موتور دوتحریکه بدون جاروبک برای عملکرد القایی ساده

نشان می دهد . توان کشیده شده از منبع تغذیه در حالت القایی ساده، صرف شارژ کردن راکتانس های

نشستی استاتور و روتور و مغناطیس کردن هسته می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۲-۹: نمودار انتقال توان راکتیو در عملکرد القایی ساده

روابط ۲-۷۳ تا ۲-۷۶ کمیت های موجود در نمودار انتقال توان راکتیو شکل ۲-۹ را توصیف می کنند.

$$Q_{in} = \text{Im}\{V_p I_p^*\} = Q_{sl} + Q_m + Q_{rl} \quad (۲-۷۳)$$

$$Q_{sl} = X_{sl} I_p^2 \quad (۲-۷۴)$$

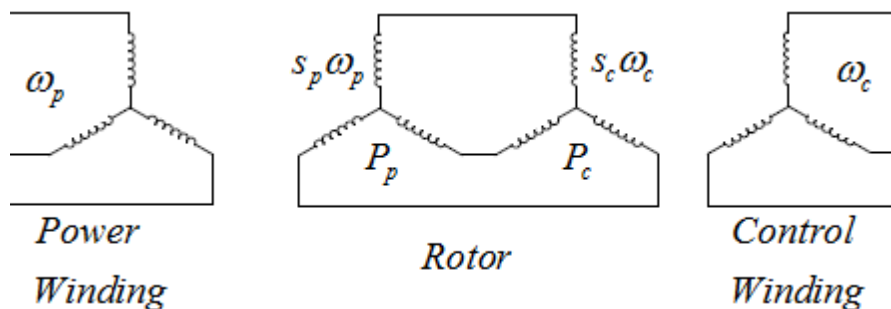
$$Q_m = Z_s I_p^2 \quad (۲-۷۵)$$

$$Q_{rl} = N_r \sum_{i=1}^{Pr} X_{R_i} I_{R_i}^2 \quad (۲-۷۶)$$

۲-۳- تحلیل عملکرد در حالت القایی آبخاری

حالت دیگر برای عملکرد **BDFM** بعنوان موتور، حالت القایی آبخاری است. همانگونه که ذکر گردید، قرار گرفتن **BDFM** در این حالت با اتصال کوتاه کردن ترمینال های یکی از سیم پیچ ها و تغذیه دیگری توسط یک منبع سه فاز متعادل انجام میشود. کاربرد این حالت عملکردی معمولاً در راه اندازی موتور و رساندن آن به سرعت سنکرون می باشد زیرا **BDFM** دارای سیم پیچ های میرا کننده نیست پس با این آرایش بصورت القایی راه اندازی شده و سپس با وارد مدار کردن مبدل، ماشین دارای عملکرد سنکرون می شود. همانگونه که در مقدمه توضیح داده شد، عملکرد **BDFM** در این حالت همانند دو ماشین القایی با روتور سیم پیچی شده است که روتورهای آن دو بلحاظ الکتریکی و مکانیکی به یکدیگر وصل شده اند. بر این اساس شماتیک مداری ماشین و فرکانس قسمت های مختلف آن در حالت عملکرد آبخاری در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۱۰-۲: آرایش شماتیک سیستم BDFM به همراه فرکانس های قسمت های مختلف در عملکرد القایی آبشاری

در ادامه تحلیل حالت پایدار هارمونیک ماشین برای عملکرد القایی آبشاری با استفاده از تئوری جامع هارمونیک بیان شده است. معادلات تعادل ولتاژ استاتور در این حالت از رابطه ۷۷-۲ پیروی می کنند.

$$V_{sp} = I_{sp}(R_p + jX_{pl} + Z_{sp}) + \sum_{i=1}^{P_r} Z_{R_{isp}} I_{R_i} \quad (77-2)$$

نیرومحرکه الکتریکی القایی در حلقه شماره n از زیرسیستم R ناشی از میدان تولیدی سیم پیچ توان دارای رابطه ۷۸-۲ است.

$$u_{R,np}(t) = \pi W d \operatorname{Re}\{C_{RP_p}^* E_{rp} e^{j((\omega_p - P_p \omega_r)t - P_p(n-1)\frac{2\pi}{N_r})}\} \quad (78-2)$$

ولتاژ القایی در این حلقه ناشی از میدان سیم پیچ کنترل بطور مشابه از رابطه ۷۹-۲ بدست می آید.

$$u_{R,nc}(t) = \pi W d \operatorname{Re}\{C_{RP_c}^* E_{rc} e^{j((\omega_c - P_c \omega_r)t - P_c(n-1)\frac{2\pi}{N_r})}\} \quad (79-2)$$

که در این روابط ω_r و N_r بصورت روابط ۸۰-۲ و ۸۱-۲ تعریف می شوند.

$$\omega_r = \frac{\omega_p + \omega_c}{P_p + P_c} \quad (80-2)$$

$$N_r = P_p + P_c \quad (81-2)$$

با جایگذاری عبارات ω_r و N_r در روابط ۷۸-۲ و ۷۹-۲، روابط ۸۲-۲ و ۸۳-۲ برای ولتاژهای القایی در

حلقه روتور حاصل می شوند.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$u_{R,np}(t) = \pi W d \operatorname{Re} \left\{ C_{RP_p}^* E_{rp} e^{j \left(\frac{\omega_p P_c - P_p \omega_c}{P_p + P_c} t - P_p (n-1) \frac{2\pi}{N_r} \right)} \right\} \quad (۸۲-۲)$$

$$u_{R,nc}(t) = \pi W d \operatorname{Re} \left\{ C_{RP_c}^* E_{rc} e^{-j \left(\frac{\omega_p P_c - P_p \omega_c}{P_p + P_c} t - P_p (n-1) \frac{2\pi}{N_r} \right)} \right\} \quad (۸۳-۲)$$

مقایسه این دو رابطه نتیجه می دهد که عبارات زمانی و فاز هر دو کمیت یکسان است. پس ولتاژ القایی کلی در حلقه شماره n از زیرسیستم R از حاصل جمع این دو ولتاژ و مطابق رابطه ۸۴-۲ بدست می آید.

$$u_{R,n}(t) = u_{R,np}(t) + u_{R,nc}(t) = \pi W d \operatorname{Re} \left\{ \left(C_{RP_p}^* E_{rp} + C_{RP_c}^* E_{rc} \right) e^{j \left(s_p \omega_p t - P_p (n-1) \frac{2\pi}{N_r} \right)} \right\} \quad (۸۴-۲)$$

بر اساس این رابطه، معادله تعادل ولتاژ برای زیرسیستم R روتور مطابق رابطه ۸۵-۲ است.

$$0 = I_{sp} Z_{spR_i} + I_{sc}^* Z_{scR_i}^* + \sum_{R_j=1}^{P_r} Z_{R_i R_j} I_{R_j} \quad (۸۵-۲)$$

توزیع جریان در این حلقه از رابطه ۸۶-۲ پیروی می کند.

$$i_{R,n}(t) = \operatorname{Re} \left\{ I_R e^{j \left(s_p \omega_p t - P_p (n-1) \frac{2\pi}{N_r} \right)} \right\} = \operatorname{Re} \left\{ I_R^* e^{j \left(s_c \omega_c t - P_c (n-1) \frac{2\pi}{N_r} \right)} \right\} \quad (۸۶-۲)$$

شکل این معادله نشان می دهد که معادله تعادل ولتاژ برای سیم پیچ کنترل بصورت رابطه ۸۷-۲ می باشد.

$$0 = I_{sc} (R_c + jX_{cl} + Z_{sc}) + \sum_{i=1}^{P_r} Z_{R_i sc} I_{R_i}^* \quad (۸۷-۲)$$

لازم به ذکر است که هیچ امیدانس کوپلاژی برای ارتباط مستقیم دو سیم پیچ استاتور وجود ندارد.

شکل ماتریسی معادلات تعادل ولتاژ زیرسیستم های روتور بصورت رابطه ۸۸-۲ می باشد.

$$I_r = -Z_r^{-1} Z_{spr} I_p^* - Z_r^{-1} Z_{scr} I_c^* \quad (۸۸-۲)$$

ماتریس Z_r همانند رابطه ۵۸-۲ تعریف می شود و ماتریس های Z_{scr} و Z_{spr} نیز بترتیب در روابط

۸۹-۲ و ۹۰-۲ تعریف شده اند.

$$Z_{spr} = [Z_{spR_1} \quad Z_{spR_2} \quad \dots \quad Z_{spR_{P_r}}]^T \quad (۸۹-۲)$$

$$Z_{scr} = [Z_{scR_1} \quad Z_{scR_2} \quad \dots \quad Z_{scR_{P_r}}]^T \quad (۹۰-۲)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

با جایگذاری رابطه ۲-۸۸ در روابط ۲-۸۲ و ۲-۸۳ دستگاه معادلات ۲-۹۱ بدست می آید.

$$\begin{cases} V_{sp} = I_{sp}(R_p + jX_{pl} + Z_{sp} - Z_{rsp}^T Z_r^{-1} Z_{spr}) - Z_{rsp}^T Z_r^{-1} Z_{scr}^* I_{sc} \\ V_{sc} = I_{sc}(R_{sc} + jX_{cl} + Z_{sc} - Z_{rsp}^T \text{inv}(Z_r^*) Z_{scr}) - Z_{rsp}^T Z_r^{-1} Z_{spr}^* I_{sp} \end{cases} \quad (91-2)$$

این دستگاه معادلات را می توان با معلوم بودن V_{sc} و V_{sp} برای یافتن I_{sc} و I_{sp} حل کرد و سپس از رابطه ۲-۸۸ جریان های عبوری از زیرسیستم های روتور را محاسبه نمود. در مورد حالت القایی آبخاری V_{sc} برابر صفر است و ω_c در اثر تبدیل فرکانسی در ماشین از رابطه ۲-۹۲ محاسبه می شود.

$$\omega_c = \omega_r(P_p + P_c) - \omega_p \quad (92-2)$$

گشتاور عمل کننده بر روی روتور را می توان مشابه محاسبات بخش پیش بدست آورد و ثابت می شود

برای حالت های با تغذیه دوگانه ماشین، از رابطه ۲-۹۳ حاصل می شود.

$$T_r = \frac{\pi W d}{2} \text{Re}\{J_{sp}^* B_{agRP_p} + J_{sc}^* B_{agRP_c}\} \quad (93-2)$$

جریان های زیرسیستم های روتور توزیعی بصورت رابطه ۲-۸۶ دارند، بنابراین مطابق روابط ۲-۱۳ تا ۲-۱۵، توزیع چگالی شاری بصورت رابطه ۲-۹۴ در فاصله هوایی تولید می کنند.

$$b_{agR}(\theta, t) = \text{Re}\{\sum_q B_{agR(P_p+qN_r)} e^{j((\omega+qN_r\omega_r)t - (P+qN_r)\theta)}\} \quad (94-2)$$

که:

$$B_{agR(P_p+qN_r)} = \frac{j\mu_0 N_r}{(P_p+qN_r)g} I_R C_{R(P_p+qN_r)} \quad (95-2)$$

پس:

$$B_{agRP_p} = B_{agR(P_p+qN_r)}|_{q=0} = \frac{j\mu_0 N_r}{P_p g} I_R C_{RP_p} \quad (96-2)$$

$$B_{agRP_c} = B_{agR(P_p+qN_r)}^*|_{q=-1} = \frac{j\mu_0 N_r}{P_c g} I_R^* C_{RP_c} \quad (97-2)$$

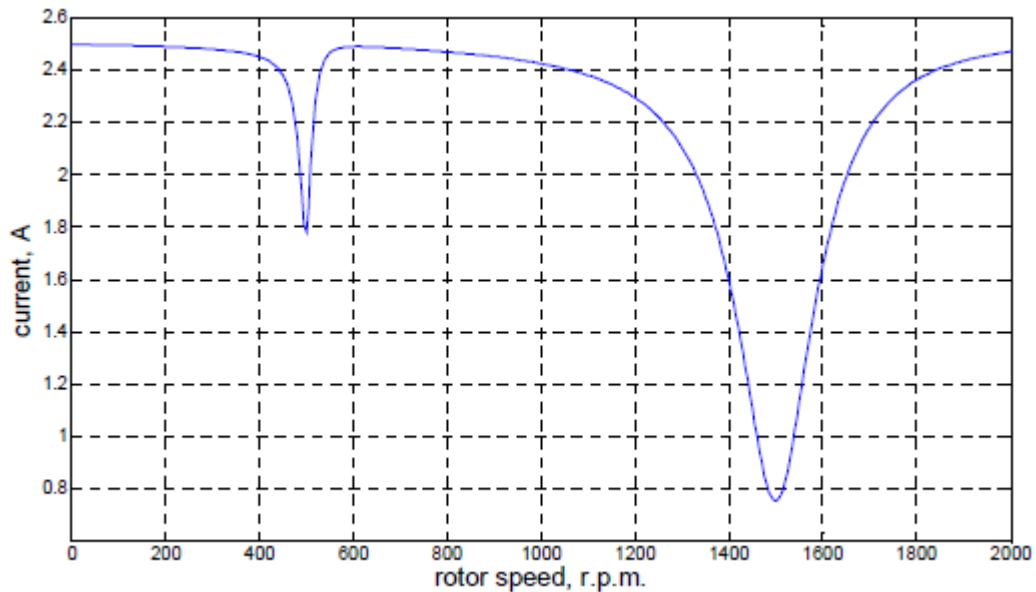
با جایگذاری این عبارات در عبارت رابطه ۲-۹۳ و محاسبه مجموع آنها برای در نظر گرفتن تمامی

زیرسیستم ها، رابطه ۲-۹۸ برای گشتاور الکترومکانیکی عمل کننده بر روی روتور بدست می آید. [۱۱]

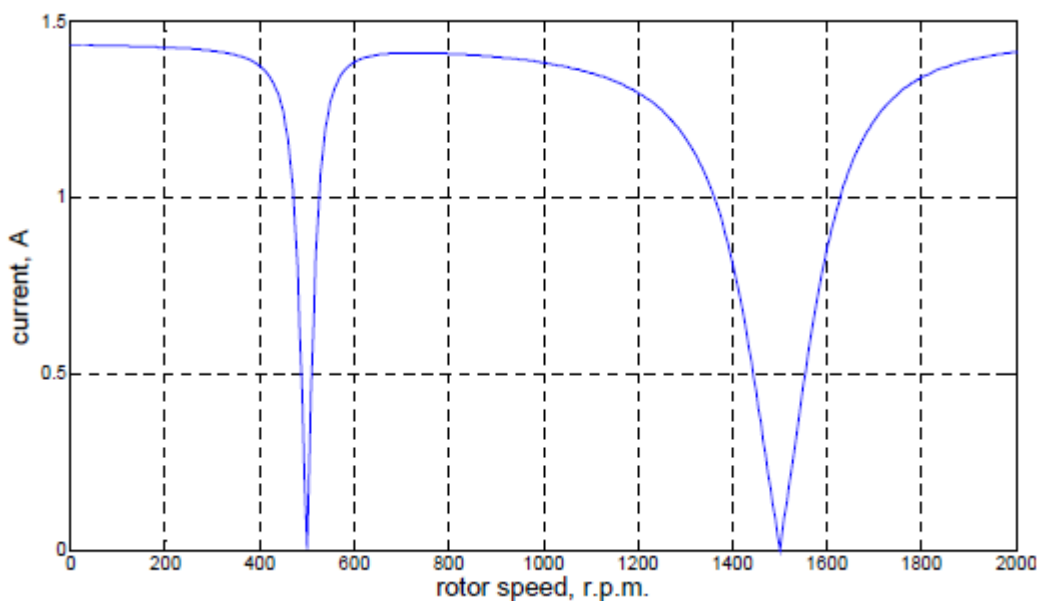
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$T_r = \frac{3\pi W d \mu_0 N_r}{2g} \operatorname{Im}\left\{\sum_{i=1}^{P_r} \frac{1}{P_p} I_{sp}^* I_{R_i} C_{R_i P_p} C_{sp}^* + \frac{1}{P_c} I_{sc}^* I_{R_i}^* C_{R_i P_c} C_{sc}^*\right\} \quad (98-2)$$

نمودارهای تغییرات جریان سیم پیچ توان، جریان سیم پیچ کنترل، جریان زیرسیستم های روتور و گشتاور در حالت عملکرد القایی آبشاری و شرایط تحریک پیشین برای سیم پیچ توان، به ترتیب در شکل های ۱۱-۲ تا ۱۴-۲ نشان داده شده اند.

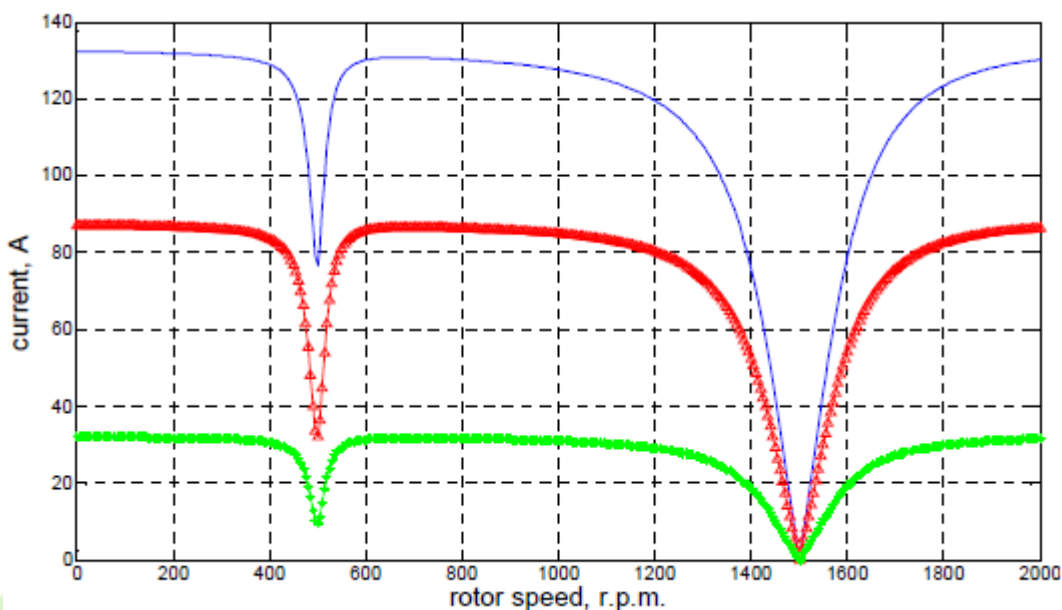


شکل ۱۱-۲: جریان فازی سیم پیچ توان در عملکرد القایی آبشاری (ترمینال های سیم پیچ کنترل اتصال کوتاه شده است)

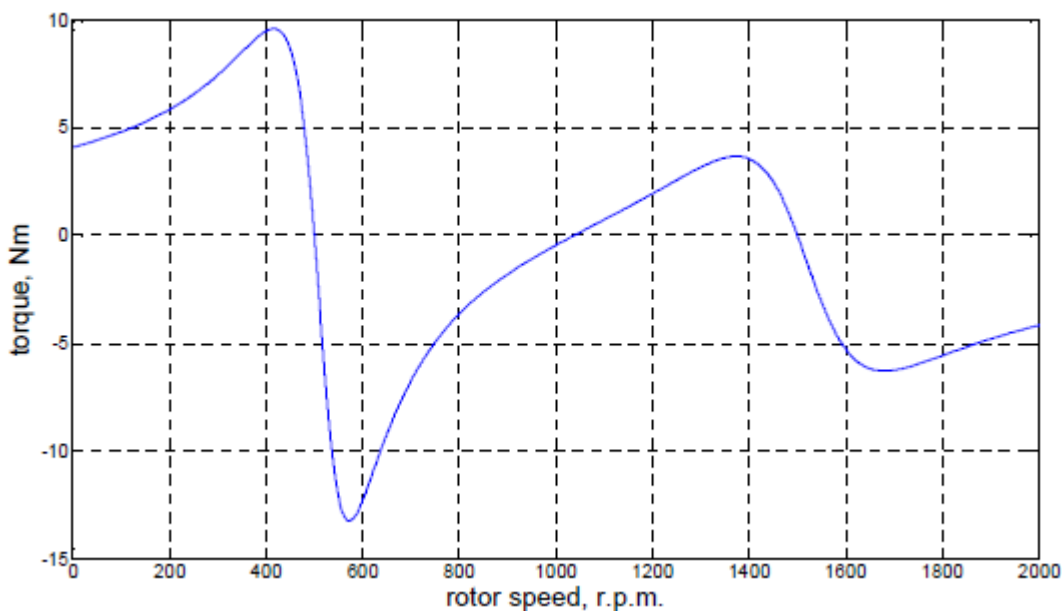


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

شکل ۲-۱۲: جریان فازی سیم پیچ کنترل در عملکرد القایی آبخاری (ترمینال های سیم پیچ کنترل اتصال کوتاه شده است)



شکل ۲-۱۳: جریان حلقه های واقع در *nest* مرجع روتور در عملکرد القایی آبخاری (ترمینال های سیم پیچ کنترل اتصال کوتاه شده است)

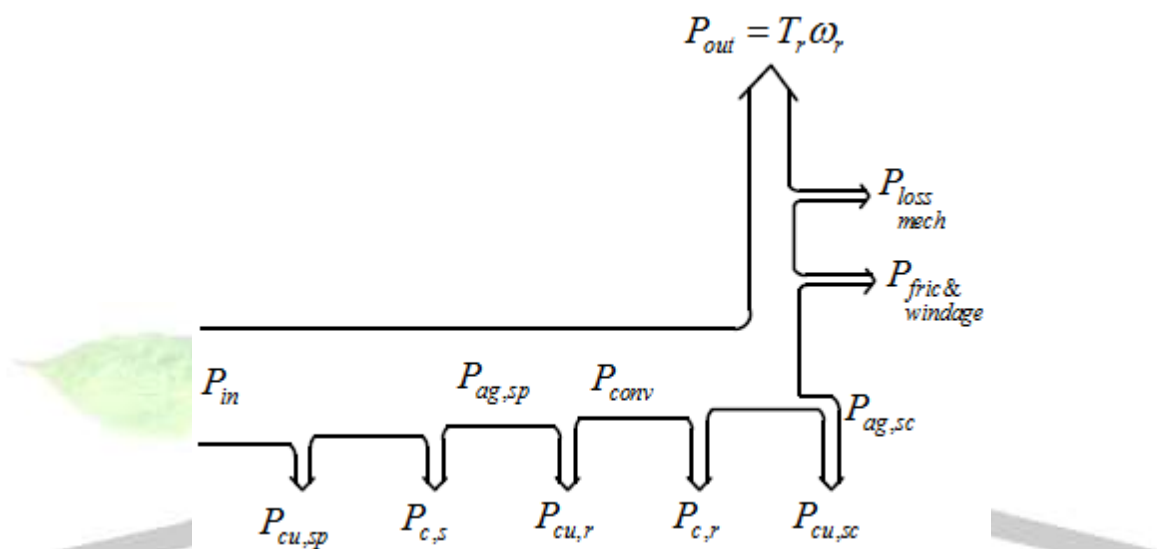


شکل ۲-۱۴: گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی در عملکرد القایی آبخاری (ترمینال های سیم پیچ کنترل اتصال کوتاه شده است)

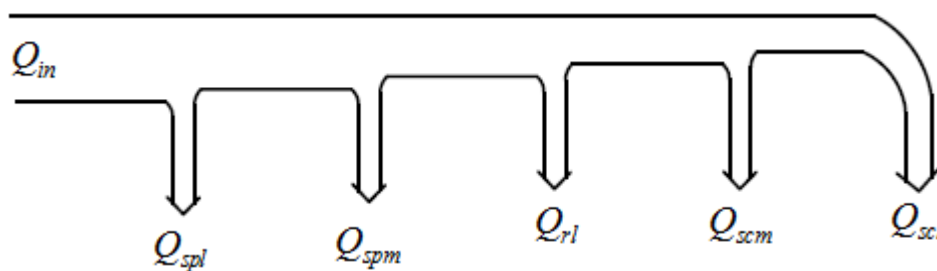
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۱-۳-۲- انتقال توان و تلفات در عملکرد القایی آبشاری

شکل ۱۵-۲ و ۱۶-۲ بترتیب نمودار انتقال توان اکتیو و توان راکتیو را برای موتور دوتحریکه بدون جاروبک در حالت عملکرد القایی آبشاری نشان می دهد. مشابه بخش ۲-۲-۲ می توان با استفاده از این نمودارهای انتقال توان روابطی را بین توان های ورودی، توان های خروجی، توان های تبدیلی و تلفات نوشت.



شکل ۱۵-۲: نمودار انتقال توان اکتیو در عملکرد القایی آبشاری



شکل ۱۶-۲: نمودار انتقال توان راکتیو در عملکرد القایی آبشاری

۲-۴- تحلیل عملکرد در حالت سنکرون

این حالت عملکرد، وضعیت مطلوب برای کارکرد ماشین است و تمامی مزایایی که استفاده از این ماشین را در کاربردهای مورد نظر توجیه پذیر می سازند، مربوط به این حالت عملکرد هستند. برای قرار گرفتن ماشین در سرعت سنکرون سیم پیچ های توان و کنترل باید بترتیب توسط منبعی با ولتاژ و فرکانس ثابت و

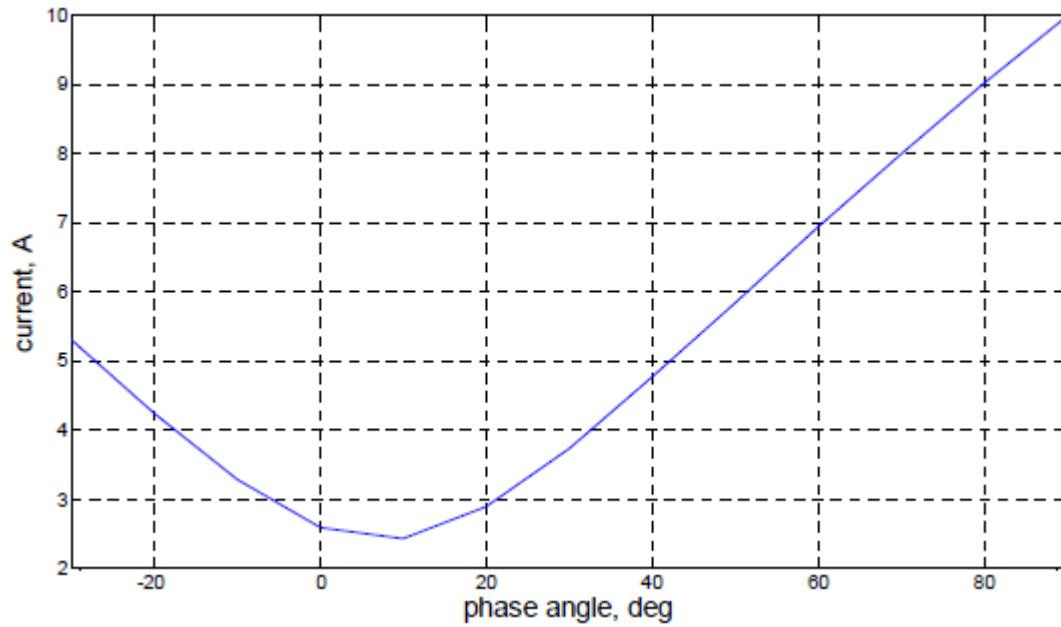
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

مبدلی با ظرفیت کاهش یافته تغذیه گردند. بعلاوه برای باقی ماندن در حالت سنکرون لازم است که دامنه جریان یا ولتاژ تولیدی مبدل الکترونیک قدرت توسط یک کنترل کننده و بر اساس شرایط کاری تنظیم گردد. در غیر اینصورت ماشین از حالت سنکرون خارج می شود. فرکانس شکل موج تولیدی مبدل با توجه به سرعت سنکرون و فرکانس سیم پیچ توان مشخص می شود.

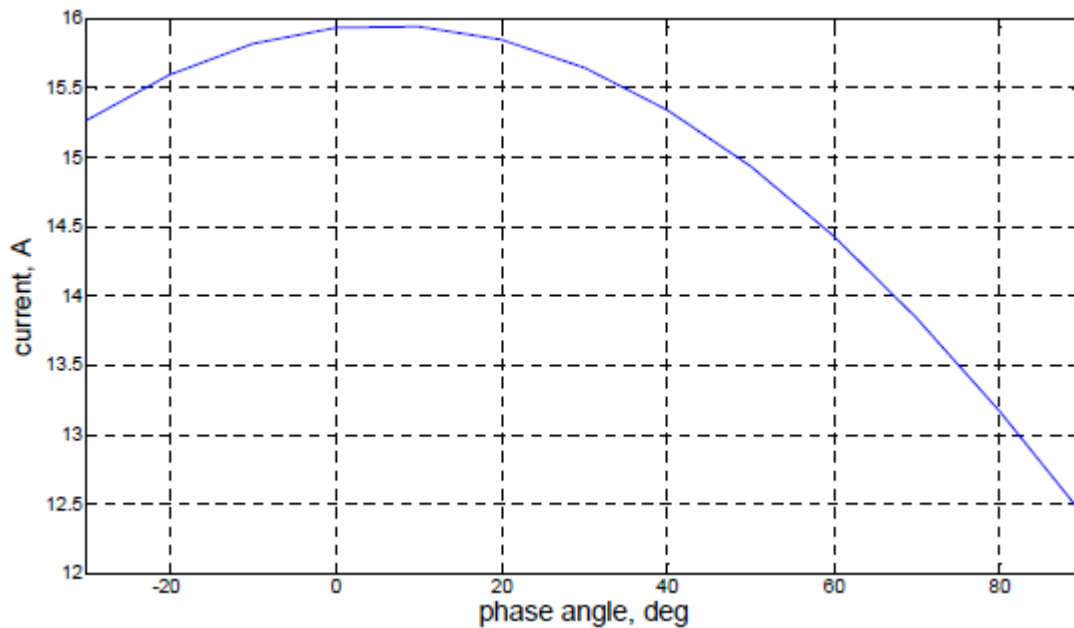
روابط مورد نیاز برای تحلیل BDFM در حالت سنکرون مشابه حالت عملکرد القایی آبشاری است با این تفاوت که V_c دارای دامنه غیر صفر و فرکانس ثابتی است که بر اساس سرعت سنکرون مورد نیاز تنظیم می گردد. سرعت چرخش روتور بر اساس فرکانس های تحریک و جفت قطب های سیم پیچ های استاتور، ثابت می شود و تغییرات کمیت های مختلف در این حالت، بستگی به دامنه و فاز ولتاژ سیم پیچ کنترل خواهد داشت. در شبیه سازی هایی که در شکل های زیر آمده، دامنه و فرکانس ولتاژ سیم پیچ کنترل بترتیب برابر 90° و 30° تا تغییر داده شده است.

سرعت سنکرون ماشین در این حالت برابر 800 rpm خواهد بود. از نتایج شبیه سازی ها اینگونه استنباط می شود که شرایط تحریک در عملکرد سنکرون تاثیر عمیقی بر پارامترهای کاری ماشین دارد. این موارد باید در طراحی کنترل کننده ای که برای قرار دادن ماشین در سرعت سنکرون بکار می رود لحاظ گردد تا ویژگی های کاری مطلوب مانند حداکثر بازده، ضریب توان مناسب و ... با کارکرد ماشین حاصل شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی‌پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

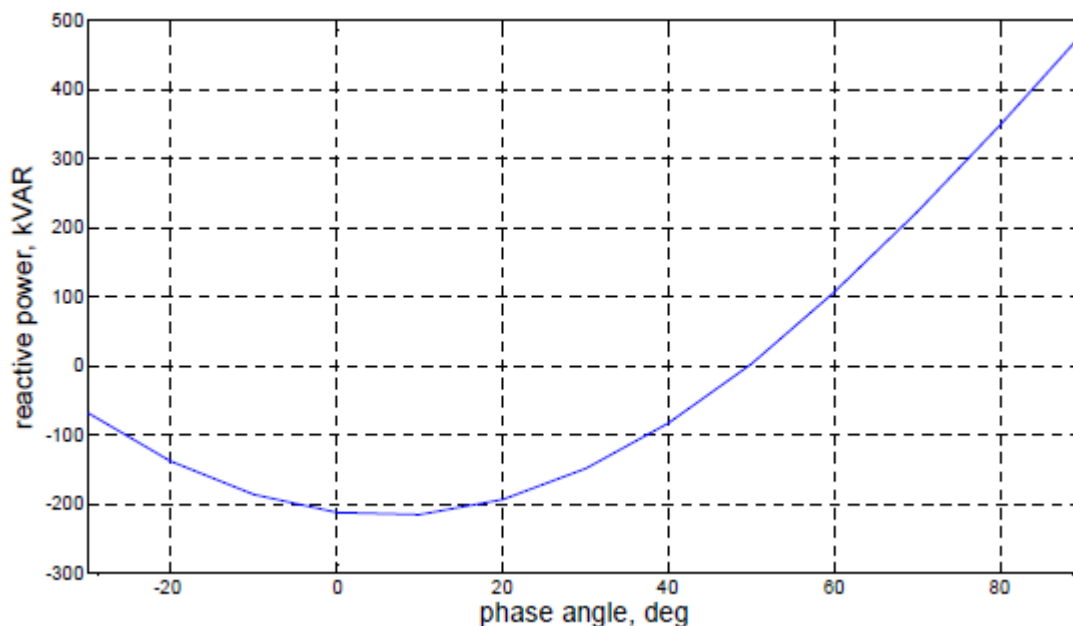


شکل ۲-۱۷: جریان فاز سیم پیچ توان با تغییر زاویه فاز ولتاژ سیم پیچ کنترل

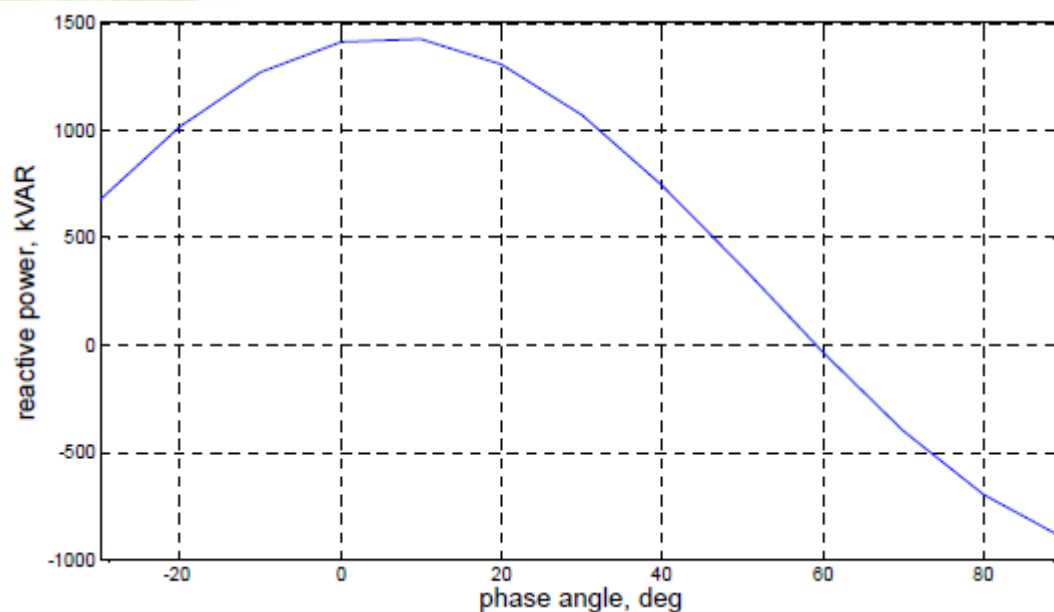


شکل ۲-۱۸: جریان فاز سیم پیچ کنترل با تغییر زاویه فاز ولتاژ سیم پیچ کنترل

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۱۹-۲: توان راکتیو یک فاز سیم پیچ توان با تغییر زاویه فاز ولتاژ سیم پیچ کنترل



شکل ۲۰-۲: توان راکتیو یک فاز سیم پیچ کنترل با تغییر زاویه فاز ولتاژ سیم پیچ کنترل

۲-۴-۱- انتقال توان و تلفات در حالت عملکرد سنکرون

در [۲۷] برای یک BDFM بدون تلفات و در حالت سنکرون اثبات می شود که برای سرعت های کمتر از سرعت طبیعی، توان اکتیو به سیم پیچ توان وارد شده و سیم پیچ کنترل توان اکتیو تولید می کند. در سرعت های بالاتر از سرعت سنکرون، توان اکتیو به هر دو سیم پیچ وارد می شود. نمودار انتقال توان اکتیو

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در عملکرد سنکرون را می توان با در نظر گرفتن توان سیم پیچ کنترل و مطلب گفته شده در بالا بدست آورد. در مورد نمودار انتقال توان راکتیو نیز توان راکتیو ورودی یا خروجی سیم پیچ کنترل به نمودار شکل ۲-۱۵ اضافه می گردد. اما جهت انتقال توان راکتیو در عملکرد سنکرون بستگی به ضریب توان سیم پیچها دارد و در واقع اثبات می شود که در عملکرد سنکرون، دامنه ولتاژ سیم پیچ کنترل همانند جریان تحریک سیم پیچ میدان در ماشین های سنکرون مرسوم عمل می کند.

۲-۵- مقایسه BDFM با ماشین های استاندارد موجود

هنگامیکه ماشین در حالت القایی ساده کار می کند، از نظر ساختار بجز در رابطه با ساختار قفسی ویژه خود، کاملاً مشابه ماشین القایی قفس سنجابی است. پس تفاوت بین آن دو را باید در ساختار روتورهای آن دو جستجو کرد. برخی از این تفاوت ها بصورت فهرست وار در زیر آمده است:

امپدانس نشتی روتور BDFM بسیار بزرگتر از امپدانس نشتی روتور قفس سنجابی است که این بدلیل کمتر بودن تعداد میله های روتور در ساختار nested loop و همچنین بدلیل آرایش خاص میله ها است که سبب تولید هارمونیک های مکانی نامطلوب بیشتری در مقایسه با آرایش قفس سنجابی مرسوم می گردد. این مسئله دلیل کاهش شدید عملکرد BDFM در حالت القایی ساده نسبت به موتور القایی می شود. از مظاهر این کاهش عملکرد می توان به: کاهش شدید گشتاور راه اندازی، کاهش گشتاور تولیدی در سرعت های مختلف و حداکثر گشتاور، افزایش میزان توان راکتیو کشیده شده از منبع برای تامین توان تلفات ناشی از راکتانس نشتی روتور و در نتیجه پایین بودن بازده و ضریب توان،، اشاره نمود.

فصل ۳- مدلسازی دینامیکی با وجود خطاهای استاتور

۳-۱- مقدمه

در این فصل ، مدلی دینامیکی برای تحلیل عملکرد موتور دوتحریکه بدون جاروبک ارائه گردیده است که قادر است رفتار ماشین را با وجود عدم تعادل در تحریک و خطاهای استاتور، تحلیل کند. در استخراج این مدل از مفاهیم مدلسازی کوپلاژ مداری و تئوری جامع هارمونیک استفاده شده است. در ابتدا با استفاده از تئوری جامع هارمونیک اندوکتانس های خودی و متقابل تمامی سیم پیچ های استاتور و حلقه های روتور با هر آرایش دلخواه محاسبه گردیده و سپس معادلات دینامیکی اصلاح شده مدل کوپلاژ مداری برای بدست آوردن کمیت های ماشین اعمال شده اند. مدل استخراج شده برای تحلیل عملکرد ماشین در حالت های آبخاری و سنکرون و هنگامیکه خطاهای فاز به خنثی، فاز به فاز و مدار باز در سیم پیچ های استاتور وجود دارد، بکار گرفته شده است. بر خلاف روش های مدلسازی که بر پایه مؤلفه اصلی توزیع سیم پیچی استاتور قرار دارد، مؤلفه های هارمونیک مکانی در محاسباتی که در ادامه می آید، در نظر گرفته شده اند. مزیت دیگر مدل معرفی شده، امکان محاسبه جریان عبوری از بخش های مختلف ماشین از قبیل کویل های استاتور و میله های روتور، در طول شرایط عملکرد حالت پایدار، دینامیکی و گذرا می باشد.

۳-۲- وجوه خطای ماشین

خطاها در ماشین های الکتریکی چرخان و بویژه در موتورهای القایی قفسی را می توان در ۴ گروه اصلی طبقه بندی کرد.

- ✓ خطاهای یاتاقان^۱ و لنگی^۲ روتور
- ✓ خطاهای سیم پیچی استاتور

^۱ Bearing

^۲ Eccentricity

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

✓ خطاهای سیم پیچی روتور (میله ها یا حلقه های انتهایی در مورد روتورهای قفسی)

✓ خطاهای تجهیزات خارجی شامل لوازم سیستم درایو

چندین گروه بر روی نرخ وقوع این خطاها تحقیق و آنها را با یکدیگر مقایسه کرده اند (IEEE)

نتایج مقایسه این گروه ها در (Committee 85 EPRI, Thorsen 95, Thorsen 99, Benbouzid 03)

شکل ۱-۳ ارائه شده است. اگرچه نتایج بدست آمده توسط هر گروه بطور مثال به موارد زیر بستگی دارد:

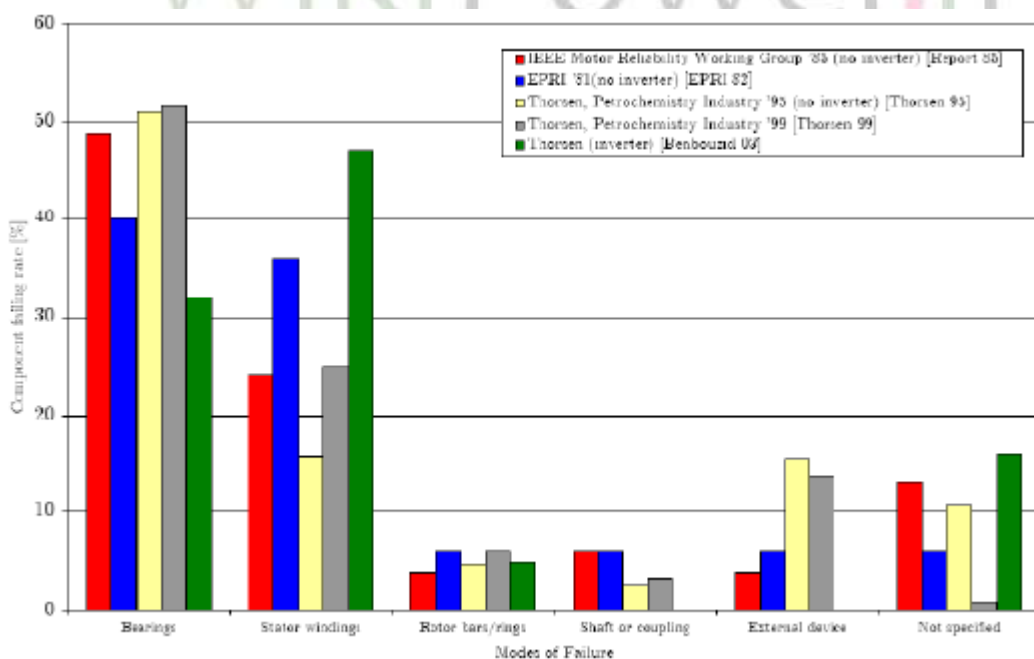
✓ تعداد نمونه ها

✓ محیطی که درایو در آن کار می کند

✓ استراتژی های تعمیراتی تاسیسات

✓ ساختار ماشین ها

اما واضح است که خطاهای یاتاقان معمولترین حالت خطا در ماشین های الکتریکی است و پس از آن با فاصله کمی خطاهای سیم پیچی استاتور در رتبه دوم قرار دارند بویژه هنگامیکه سیم پیچ های استاتور توسط اینورترها تغذیه می شوند. خطاهای روتور بخش کوچکی را در میان خطاهای ماشین به خود اختصاص می دهند. [۱۱]



شکل ۱-۳: نرخ انواع خطاهای موتور القایی [۳۱]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

باتوجه به اینکه ساختار ماشین دوتحریکه بدون جاروبک تا حدود زیادی شبیه ماشین القایی است، بنظر می رسد که نتایج بدست آمده برای ماشین القایی قفس سنجابی کم و بیش در مورد آن نیز برقرار باشد. اما چون ماشین دوتحریکه بدون جاروبک دارای دو سیم پیچ استاتور است و تغذیه یکی از آنه توسط مبدل صورت می گیرد، نسبت وقوع خطاهای سیم پیچی در آن بیشتر از ماشین های القایی خواهد بود. بنابراین خطاهای استاتور درصد قابل توجهی از کل خطاهای سیستم BDFM را به خوداختصاص می دهند.

در صورت وقوع خطای سیم پیچی در یکی از سیم پیچ های استاتور ماشین دوتحریکه بدون جاروبک، شار تولیدی آن درفاصله هوایی می تواند شامل مؤلفه های هارمونیکی با هر تعداد ممکن جفت قطب باشد. در این شرایط دیگر کوپلاژ مغناطیسی بین دو سیم پیچ صفر نیست و کوپل های دو سیم پیچ به یکدیگر نیرو وارد می کنند که علاوه بر کاهش میزان عملکرد مؤثر ماشین، می تواند صدمات مکانیکی شدیدی به آن وارد آورد. پس تشخیص به موقع خطاهای استاتور و تعمیر اجزای ایجاد کننده آنها در ماشین بسیار مفید است. در ادامه جزئیات شکل گیری خطاهای سیم پیچی در ماشین های الکتریکی و تاثیر آنها بر رفتار ماشین شرح داده می شود.

WikiPower.ir

۱-۲-۳ - خطاهای استاتور

عوامل اصلی ایجاد خطاهای استاتور را می توان در چهار گروه اصلی دسته بندی کرد.

✓ تنش های حرارتی ۱

✓ تنش های الکتریکی ۲

✓ تنش های مکانیکی ۳

✓ تنش های محیطی ۴

¹ Thermal stress

² Electrical stress

³ Mechanical stress

⁴ Environmental stress

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تنش های حرارتی: گفته می شود که عایق بندی برای داشتن یک طول عمر نامحدود در درجه

حرارت نامی طراحی می شود (برای مثال عایق های کلاس A دارای طول عمر ۲۰۰۰۰ ساعت در ۱۰۵ درجه سانتیگراد هستند). اما اگر دما به بالای دمای نامی کارکرد افزایش یابد، طول عمر به سرعت کاهش می یابد، همانگونه که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

این پدیده پیر شدن حرارتی^۱ نامیده می شود. این افزایش درجه حرارت می تواند ناشی از عوامل زیر

باشد. [۳۲]

تغییرات ولتاژ یا عدم تعادل آن. در [۳۲] بیان شده است که ۳.۵% عدم تعادل ولتاژ در هر فاز منجر به

افزایش ۲۵% دمای سیم پیچ در فاز با بالاترین جریان می گردد.

✓ راه اندازی های مکرر در یک دوره زمانی کوتاه

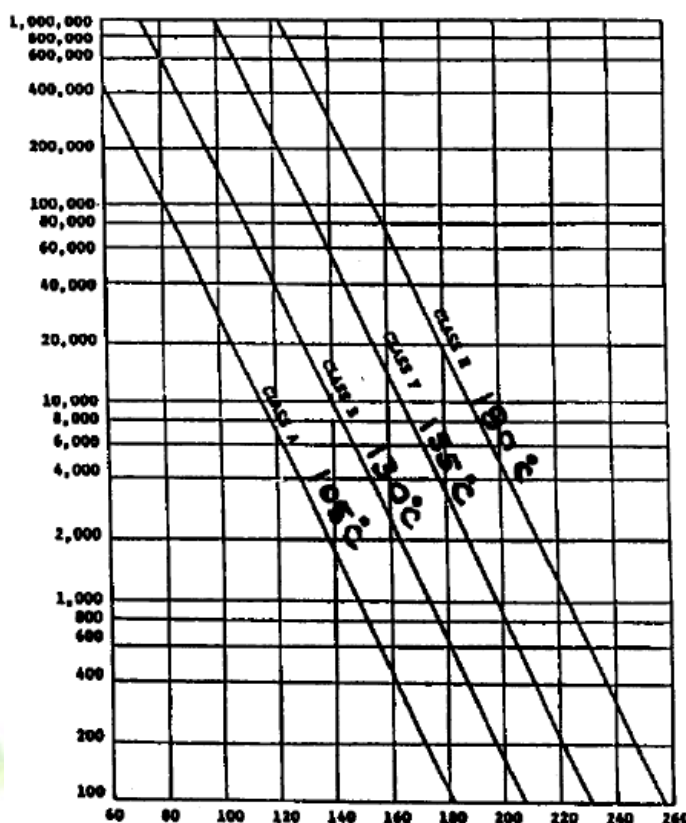
✓ اضافه بار

✓ تهویه بد یا ناقص

✓ دمای محیطی بالا

¹ Thermal aging

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۳-۲: دمای کلی سیم پیچ (درجه سانتیگراد) بر حسب طول عمر (ساعت) [۳۲]

تنش های الکتریکی : ولتاژهای بزرگتر نسبت به مقدار نامی یا $\frac{dv}{dt}$ بالا (کلیدزنی خازن، باز و بسته کردن مدار، درایوهای PWM، ...) منجر به تخریب دی الکتریک ها خواهد شد. وجود اینورتر بطور واضحی بر خطاهای سیم پیچی تاثیر می گذارد. بعلاوه چون مواد خارجی و رطوبت به درون عایق نفوذ می کنند، جریان های کوچکی می تواند بین فاز و زمین جریان یابد. این جریان می تواند سبب سوختن مواد در امتداد مسیر خود گردد که عبور جریان بزرگتری را باعث می شود [۳۲].

برای موتورهای بالای ۵ kV، حضور یک میدان الکتریکی قوی منجر به وقوع تخلیه های جزئی در حفره های درون عایق می شود. این پدیده سبب ایجاد نقاط کربنیزه شده ای در عایق می شود. این نقاط موجب تغییر شکل میدان الکتریکی می شوند (چگالی میدان در نقاط کربنیزه شده افزایش می یابد). تخلیه های

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

بزرگتری در این نواحی ظاهر می شود و یک مسیر هادی درون عایق شکل می گیرد (شکل ۳-۳). این پدیده

جرقه ۱ نامیده می شود [۳۲ و ۳۳]



شکل ۳-۳ : مسیر جرقه در یک پوشینگ کلید قدرت

تنش های مکانیکی: همانطور که قبلاً ذکر شد، راه اندازی های مکرر باعث افزایش دمای سیم پیچ

های ماشین می شود. بعلاوه این کار سبب انقباض و انبساط متناوب عایق ها می شود که می تواند سبب

ایجاد ترک هایی در آن شود [۳۳].

همچنین در اثر عکس العمل جریان های استاتور و میدان مغناطیسی اعمال شده به هادی کوئل ها،

نیروی بوجود می آید که مؤلفه متناوبی با دو برابر فرکانس منبع دارد. لرزش های ایجاد شده در اثر این

نیرو باعث سایش و فرسایش عایق ها می شود. سرانجام ممکن است اجسامی به سیم پیچ ها ضربه بزنند و

موجب آسیب دیدن عایق ها گردند [۳۴ و ۳۵ و ۳۲].

تنش های محیطی: حضور رطوبت و مواد شیمیایی می تواند سبب کاهش کیفیت عایق بندی گردد

و عامل ایجاد خطاهای استاتور باشد [۳۱].

¹ Arc

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۲-۲-۳- شکل گیری خطا

پس از اینکه عایق بندی دچار نقصان شد، جریان های تخلیه در حفره های عایق بر ولتاژ ترمینال های ماشین تاثیر می گذارد و نوسانات فرکانس بالایی اتفاق می افتد. تاثیر دیگر این مسئله شکل گیری ازن^۱ و اکسیدهای نیتروژن است که "تخلیه های جزئی"^۲ نامیده می شود. این ترکیبات می توانند با رطوبت واکنش دهند و اسید نیتریک تولید کنند که موجب تخریب ماده عایقی می شود.

پس از آنکه یک مسیر کربنیزه شده شکل گرفت، جریان خطا هم می تواند به سمت هسته استاتور جریان یابد (خطای فاز به زمین) و هم به بخش های دیگر سیم پیچ (خطای داخلی دور به دور) و هم به سیم پیچ دیگری که در آن شیار جا زده شده است (خطای فاز به فاز) توپولوژی مدار الکتریکی توسط این خطاها تاثیر می پذیرد [۳۶].

۳-۳- محاسبه اندوکتانس های ماشین

بمنظور تحلیل و تشخیص خطاهای استاتور باید ابتدا مدل دینامیکی ماشین استخراج گردد. مدل مرسوم برای تحلیل دینامیکی ماشین، مدل $d-q$ مرسوم برای یک ماشین AC بر پایه این فرض است که سیم پیچ های استاتور بصورت سینوسی حول سطح استاتور توزیع شده اند. مدل های ماشین که بر پایه این فرض استخراج شده اند عموماً بمنظور کنترل و تحلیل حالت پایدار و دینامیکی مؤلفه اصلی قابل قبول هستند. اما برای مطالعاتی نظیر تاثیر هارمونیک های مرتبه های بالای شار روی عملکرد ماشین، تحلیل شرایط خطا، تحلیل عملکرد ماشین هنگام خارج از مرکز بودن محور روتور یا مطالعه ماشینی با اتصالات دلخواه سیم پیچی، مدل $d-q$ مرسوم مناسب نیست. بنابراین مدلی بر پایه هندسه ماشین و الگوهای سیم پیچی برای یک ماشین n فازه دلخواه چیز است که برای تحلیل عمومی ماشین لازم است.

¹ Ozone

² Partial discharge

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

تئوری جامع هارمونیک با موفقیت برای محاسبه اندوکتانس های ماشین القایی با هر آرایش دلخواه از سیم پیچ های استاتور و میله های روتور، استفاده شده است. ساختار سیم پیچ های استاتور ماشین دوتحریکه بدون جاروبک مشابه سیم پیچ استاتور ماشین القایی است و در حالت بدون خطا می توان آن دو را همانند دو سیم پیچ مجزا فرض کرد اما در شرایط خطا دیگر این فرض معتبر نیست و باید روابط امپدانس های متقابل بین مدارات دو سیم پیچ را در نظر گرفت و آنها را در محاسبات وارد کرد. ساختار روتور ماشین دوتحریکه بدون جاروبک تفاوت قابل توجهی با روتور قفسی ماشین القایی دارد و شار تولیدی آن سرشار از هارمونیک های مکانی است و این هارمونیک ها تاثیر زیادی بر عملکرد ماشین دارند. بنابراین باید تاثیر هارمونیکهای مکانی روتور بر امپدانس های ماشین بدقت در محاسبات لحاظ شود.

۱-۳-۳- تابع توزیع هادی مختلط

برای تحلیل میدان های هارمونیک که در اثر خطاهای سیم پیچی بوجود می آیند، لازم است تا تعداد جفت قطب های پایه سیم پیچ برابر ۱ در نظر گرفته شود تا دیگر مؤلفه ها، هارمونیک هایی از این مؤلفه پایه باشند.

هر آرایش سیم پیچی را می توان در قالب توزیع هادی هارمونیک مختلط بیان کرد. اگر سیم پیچ m ام شامل M کویل سری باشد، آنگاه تابع توزیع هادی مختلط آن بصورت بسط رابطه ۱-۳ بیان می شود.

$$c_m(\theta) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} C_{mh} e^{-jh\theta} \quad (1-3)$$

$$C_{mh} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sin(\frac{h\delta_s}{2})}{\frac{h\delta_s}{2}} \sum_{n=1}^M N_n e^{jh\gamma_n} \quad (2-3)$$

بطور مشابه، تابع توزیع هادی مختلط حلقه m از k امین $nest$ روتور می تواند با استفاده از روابط ۳-۳ و

۴-۳ در قالب سری فوریه بسط داده شود.

$$c_{knh}(\theta_r) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} C_{knh} e^{-jh\theta_r} \quad (3-3)$$

$$C_{knh} = \frac{-j}{\pi} \frac{\sin(\frac{h\delta_r}{2})}{\frac{h\delta_r}{2}} \sin(\frac{h\alpha'_n}{2}) e^{jh(\gamma'_n + \frac{\alpha'_n}{2})} \quad (4-3)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

که در این روابط ضرایب اضافی $\frac{\sin(\frac{h\delta_r}{2})}{\frac{h\delta_r}{2}}$ و $\frac{\sin(\frac{h\delta_s}{2})}{\frac{h\delta_s}{2}}$ ، بترتیب ضرایب مربوط به عرض دهانه شیار استاتور و شیار روتور می باشد. این عبارات از آنجا می آیند که فرض شده است، نیرو محرکه مغناطیسی فاصله هوایی ناشی از جریان در یک شیار، معادل نیرو محرکه مغناطیسی تولید شده توسط یک توزیع سطحی جریان با عرض برابر با عرض دهانه شیار است و روی سطح یک استوانه صاف جریان دارد [۳۷].

۳-۲- محاسبه اندوکتانس های استاتور

اگر سیم پیچ m ام استاتور با جریان $i_m(t)$ (رابطه ۳-۵) تحریک گردد، توزیع چگالی جریان سطحی در جهت طول محوری ماشین از حاصلضرب تابع توزیع هادی مختلط آن در جریان مربوطه بدست می آید (رابطه ۳-۶).

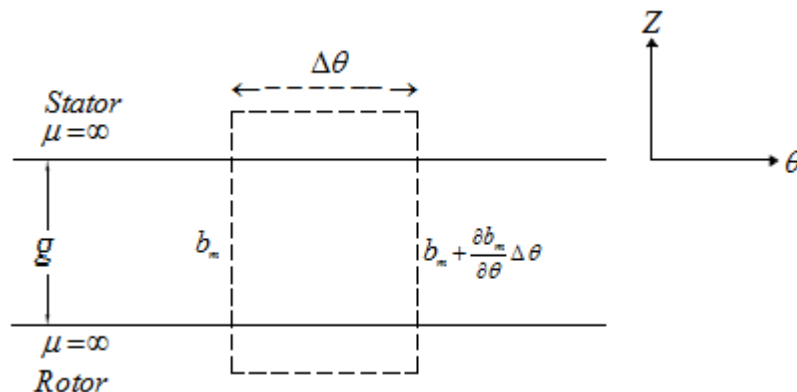
$$i_m(t) = \text{Re}\{I_m e^{j\omega t}\} \quad (۵-۳)$$

$$J_m(t, \theta) = c_m(\theta) i_m(t) \quad (۶-۳)$$

از آنجاییکه $c_m(\theta)$ کاملاً حقیقی است، عبارت $J_m(t, \theta)$ می تواند بصورت رابطه ۳-۷ نوشته شود.

$$J_m(t, \theta) = \text{Re}\{\sum_{h=-\infty}^{\infty} I_m C_{mh} e^{j(\omega t - h\theta)}\} \quad (۷-۳)$$

این توزیع چگالی جریان، یک توزیع MMF هارمونیک را در فاصله هوایی تولید می کند. میدان فاصله هوایی که ناشی از این نیرو محرکه مغناطیسی تولید می شود با اعمال قانون آمپر حول حلقه نشان داده شده در شکل ۳-۴ و رابطه ۳-۸ محاسبه میشود.



شکل ۳-۴: حلقه آمپر استفاده شده برای استخراج رابطه ۳-۸

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$\frac{\partial b_m(t, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\mu_0}{g} J_m(t, \theta) \quad (۸-۳)$$

بنابراین چگالی شار فاصله هوایی در اثر تحریک سیم پیچ m بصورت رابطه ۳-۹ است.

$$b_m(t, \theta) = \operatorname{Re}\left\{\sum_{h=-\infty}^{\infty} \frac{j\mu_0}{hg} C_{ih} I_i e^{j(\omega t - h\theta)}\right\} \quad (۹-۳)$$

شدت میدان الکتریکی در سطح استاتور با اعمال قانون آمپر بدست می آید.

$$\frac{\partial e_m(t, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial b_m(t, \theta)}{\partial t} \quad (۱۰-۳)$$

پس توزیع شدت میدان الکتریکی به شکل استاندارد رابطه ۳-۱۱ درمی آید.

$$e_m(t, \theta) = \operatorname{Re}\left\{\sum_{h=-\infty}^{\infty} -\frac{\omega j\mu_0}{h} C_{ih} I_i e^{j(\omega t - h\theta)}\right\} \quad (۱۱-۳)$$

ولتاژ القایی در j امین سیم پیچ ناشی از تحریک سیم پیچ i ام از انتگرال گیری روی شدت میدان

الکتریکی سیم پیچ i ام در تابع توزیع هادی سیم پیچ j ام بدست می آید.

$$v_{ji}(t) = \operatorname{Re}\{V_{ji} e^{j\omega t}\} = \frac{dW}{2} \int_0^{2\pi} e_i(t, \theta) c_j(\theta) d\theta \quad (۱۲-۳)$$

با محاسبه و ساده کردن رابطه ۳-۱۲، نتیجه زیر حاصل می شود:

$$V_{ji} = -\sum_{h=-\infty}^{\infty} \frac{j\mu_0 \omega W \pi d}{h^2 g} C_{ih} C_{jh}^* I_i \quad (۱۳-۳)$$

از رابطه ۳-۱۳ عبارت تحلیلی امپدانس کوپلاژ بین سیم پیچ های استاتور بصورت رابطه ۳-۱۴ بدست می

آید. لازم به ذکر است که علامت منفی در رابطه ۳-۱۳ مربوط به جهت جریان I_i می باشد.

$$Z_{ji} = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \frac{j\mu_0 \omega W \pi d}{h^2 g} C_{ih} C_{jh}^* + Z_{ji}^l \quad (۱۴-۳)$$

در این رابطه Z_{ij}^l امپدانس نشتی متقابل بین دو سیم پیچ i و j می باشد. اگر i و j برابر باشد، این

امپدانس نشتی برابر مجموع مقاومت اهمی سیم پیچ و اندوکتانس نشتی آن است که روابط مربوط به

محاسبه این اندوکتانس در [۴] بطور کامل آمده است. اگر i مخالف j باشد، امپدانس نشتی تنها شامل یک

اندوکتانس نشتی متقابل است که در اثر شار انتهاهای سیم پیچ ها بوجود می آید.

اندوکتانس متقابل بین دو سیم پیچ از رابطه ۳-۱۵ محاسبه می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$L_{ji} = L_{ij} = \frac{\mu_0 W \pi d}{g} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{h=-\infty}^{\infty} \frac{C_{ih} C_{jh}^*}{h^2} \right\} + L_{ij}^l \quad (15-3)$$

مقداران دوکتانس متقابل بین دوسیم پیچ بر طبق رابطه بالا هنگامیکه $h > \pi d / \delta_s$ باشد با ضرب

h^{-4} کاهش می یابد. پس صرفنظر کردن از مولفه های از مرتبه بالاتر از $\pi d / \delta_s$ خطای محاسباتی

ناچیزی ایجاد می کند و در عوض زمان لازم برای انجام محاسبات کاهش قابل ملاحظه ای می یابد.

۳-۳-۳- محاسبه انوکتانس های متقابل استاتور و روتور

میدان فاصله هوایی که در اثر تحریک سیم پیچ i تولید شده، در حلقه های $nest$ های روتور نیز

نیرو محرکه الکتریکی القا می کند. توزیع هارمونیک مکانی مرتبه h میدان تولیدی سیم پیچ i در مرجع

روتور مطابق رابطه ۱۶-۳ می باشد.

$$(\theta = \theta_r + \omega_r t, \omega_r = \frac{\omega_p + \omega_c}{P_p + P_c})$$

$$b_{ih}(t, \theta_r) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{j\mu_0}{hg} C_{ih} I_i e^{j(S_h \omega t - h\theta_r)} \right\}, S_h = \frac{\omega - h\omega_r}{\omega} \quad (16-3)$$

نیرو محرکه الکتریکی القایی در تمامی حلقه های یکسان تمامی $nest$ های روتور دارای دامنه یکسان اما

فاز متفاوت هستند. اختلاف فاز بین کمیت های حلقه ای خاص در k امین $nest$ روتور با حلقه قرار گرفته

در مکان مشابه و در $nest$ مرجع ($k=1$) برابر $h(k-1) \frac{2\pi}{N_r}$ بازای هارمونیک مرتبه h می باشد.

با طی روندی مشابه معادله ۱۰-۳، شدت میدان الکتریکی القایی در حلقه مرجع ($n=1$)، از

زیرسیستم k ام روتور بصورت ۱۷-۳ بدست می آید.

$$e_{ik_n}(t, \theta_r) = \operatorname{Re} \left\{ - \sum_{h=-\infty}^{\infty} S_h \frac{\omega j\mu_0}{h ng} e^{j(S_h \omega t - h\theta_r)} \right\} \quad (17-3)$$

ولتاژ القایی در حلقه مرجع با انتگرال گیری از حاصلضرب شدت میدان الکتریکی در تابع توزیع هادی

مختلط برای حلقه مرجع بدست می آید.

$$v_{ik_n}(t) = \operatorname{Re} \left\{ V_{ik_n} e^{jS_h \omega t} \right\} = \frac{dW}{2} \int_0^{2\pi} e_{ik_n}(t, \theta_r) c_{k_n}(\theta_r) d\theta_r \quad (18-3)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

با محاسبه حاصل انتگرال رابطه ۳-۱۸ و ساده کردن آن و همچنین لحاظ نمودن جابجایی نسبی مختصات استاتور و روتور با چرخش روتور، رابطه ۳-۱۹ برای امپدانس کوپلاژ بین حلقه n ام از $nest$ شماره k روتور با سیم پیچ i ام استاتور بدست می آید. رابطه ۳-۲۰ عبارت تحلیلی اندوکتانس متناظر با این امپدانس را بیان می کند.

$$Z_{ik_n} = j \sum_{h=-\infty}^{\infty} \frac{\mu_0 S_h \omega W \pi d}{g h^2} C_{ih} C_{knh}^* e^{-jh\theta} \quad (۱۹-۳)$$

$$L_{ik_n} = L_{kni} = \frac{\mu_0 W \pi d}{g} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{h=-\infty}^{\infty} \frac{C_{ih} C_{knh}^*}{h^2} e^{-jh\theta} \right\} \quad (۲۰-۳)$$

حاصل عبارت روابط ۳-۱۹ و ۳-۲۰ به ازای $h > \frac{2\pi}{\delta_r}$ با ضریب h^{-4} کاهش می یابد. بنابراین با دقت قابل قبولی می توان از هارمونیک های با مرتبه بالاتر از این مقدار چشم پوشی کرد.

۳-۳-۴- محاسبه اندوکتانس های روتور

هر حلقه در ساختار روتور را می توان همانند مداری با ولتاژ تحریک صفر فرض کرد. با طی روندی مشابه آنچه برای یافتن امپدانس های خودی استاتور و استاتور به روتور انجام شد، امپدانس های کوپلاژ مدارات روتور نیز قابل محاسبه است. امپدانس کوپلاژ بین حلقه n ام از $nest$ شماره k و حلقه m ام از $nest$ شماره l روتور مطابق رابطه ۳-۲۱ می باشد. اندوکتانس متناظر این امپدانس در رابطه ۳-۲۲ ذکر شده است.

$$Z_{k_n l_m} = j \frac{\mu_0 S_h \omega W \pi d}{g} \sum_{h=-\infty}^{\infty} \frac{C_{knh} C_{l_m h}^*}{h^2} + Z_{k_n l_m}^l \quad (۲۱-۳)$$

$$L_{k_n l_m} = L_{l_m k_n} = \frac{\mu_0 W \pi d}{g} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{h=-\infty}^{\infty} \frac{C_{knh} C_{l_m h}^*}{h^2} \right\} + L_{k_n l_m}^l \quad (۲۲-۳)$$

امپدانس نشستی متقابل بین حلقه های $nest$ های روتور است که عبارات تحلیلی مورد نیاز برای محاسبه آن در [۴] آمده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۴-۳- معادلات دینامیکی

معادله عمومی رهیافت مدلسازی کوپلاژ مداری برای مدلسازی دینامیکی یک ماشین الکتریکی به صورت رابطه ۳-۲۳ می باشد.

$$v = Ri + \frac{d}{dt} \lambda \quad (23-3)$$

۱-۴-۳- معادله تعادل ولتاژ استاتور

برای یک سیم پیچ استاتور، معادله تعادل ولتاژ ۳-۲۴ را می توان نوشت.

$$v_s = R_s i_s + \frac{d}{dt} \lambda_s \quad (24-3)$$

که کمیت های ذکر شده در این رابطه در روابط ۳-۲۵ تا ۳-۲۸ تعریف شده اند.

$$v_s = [v_{s1} \ v_{s2} \ \dots \ v_{sM}]^T \quad (25-3)$$

$$R_s = \text{diag}([R_{s1} \ R_{s2} \ \dots \ R_{sM}]) \quad (26-3)$$

$$i_s = [i_{s1} \ i_{s2} \ \dots \ i_{sM}]^T \quad (27-3)$$

$$\lambda_s = [\lambda_{s1} \ \lambda_{s2} \ \dots \ \lambda_{sM}]^T = [L_{ij}] i_s, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (28-3)$$

شار پیوندی استاتور را می توان بصورت حاصل جمع دو مؤلفه شار پیوندی بسط داد.

$$\lambda_s = \lambda_{ss} + \lambda_{sr} \quad (29-3)$$

عبارت اول در رابطه ۳-۲۹ شار پیوندی استاتور ناشی از جریان های سیم پیچ های استاتور را معرفی می

کند و عبارت دوم نشان دهنده مشارکت حلقه های روتور در تولید شار پیوندی استاتور می باشد.

$$\lambda_{ss} = [\lambda_{ij}] = [L_{ij}] i_s, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (30-3)$$

$$\lambda_{sr} = [\lambda_{ik_n}] = [L_{ik_n}] i_r, \quad k \in \{1, 2, \dots, N_r\}, n \in \{1, 2, \dots, L_r\} \quad (31-3)$$

۲-۴-۳- معادله تعادل ولتاژ روتور

معادله تعادل ولتاژ برای حلقه های اتصال کوتاه شده روتور را می توان به شکل معادله رابطه ۳-۳۲ بیان

کرد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$\mathbf{0} = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_r + \frac{d}{dt} \lambda_r \quad (32-3)$$

که پارامترهای این معادله بصورت روابط ۳-۳۳ تا ۳-۳۶ تعریف می شوند.

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_{nest} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{nest} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & R_{nest} \end{bmatrix}_{(N_r * L_r) \times (N_r * L_r)} \quad (33-3)$$

$$R_{nest} = \begin{bmatrix} R_{r1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{r2} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & R_{rL_r} \end{bmatrix}_{L_r \times L_r} \quad (34-3)$$

$$\mathbf{i}_r = [i_{r1} \ i_{r2} \ \dots \ i_{rN_r}]^T, \mathbf{i}_{rk} = [i_{rk1} \ i_{rk2} \ \dots \ i_{rkL_r}]^T \quad (35-3)$$

$$\lambda_r = [\lambda_{r1} \ \lambda_{r2} \ \dots \ \lambda_{rN_r}]^T = [L_{rk}] \mathbf{i}_r, \lambda_{rk} = [\lambda_{rk1} \ \lambda_{rk2} \ \dots \ \lambda_{rkL_r}]^T = [L_{rk_n}] \mathbf{i}_{rk} \quad (36-3)$$

۳-۴-۳- معادله گشتاور

گشتاور تولیدی توسط توان لحظه ای منتقل شده به سیستم الکترومکانیکی مشخص می شود. شبه-

انرژی^۱ در یک سیستم الکترومکانیکی با رابطه ۳-۳۷ تعریف می شود.

$$W_c = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \mathbf{M} \mathbf{i} \quad (37-3)$$

که \mathbf{i} بردار جریان سیستم است و \mathbf{M} ماتریس امپدانس کوپلاژ سیستم است و بترتیب در روابط ۳-۳۸

و ۳-۳۹ تعریف می شوند.

$$\mathbf{i} = [i_s \ i_r]^T \quad (38-3)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (39-3)$$

گشتاور الکترومکانیکی را از شبه-انرژی سیستم مطابق رابطه ۳-۴۰ می توان محاسبه کرد.

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta_r} \quad (40-3)$$

¹ Co-energy

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

با جایگذاری رابطه ۳-۳۷ در رابطه ۳-۴۰، عبارت تحلیلی گشتاور الکترومکانیکی سیستم بصورت رابطه

۳-۴۱ بدست می آید.

$$T_e = \frac{1}{2} i_s^T \frac{dL_{sr}}{d\theta_r} i_r + \frac{1}{2} i_r^T \frac{dL_{rs}}{d\theta_r} i_s \quad (41-3)$$

۳-۴-۴- معادلات سیستم

رفتار چرخشی یک ماشین الکتریکی از رابطه ۳-۴۲ تبعیت می کند.

$$T_e + T_{mech} = T_{f\&w} + J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (42-3)$$

در این رابطه ω_r سرعت زاویه ای چرخش روتور است و با رابطه ۳-۴۳ تعریف می شود.

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (43-3)$$

معادلات ۳-۲۴، ۳-۴۱ و ۳-۴۲ را می توان در صورت معلوم بودن ولتاژ اعمالی به هر یک از سیم پیچ

های استاتور مستقیماً حل کرد. اما در مواقعی که عدم تعادل وجود دارد مانند شرایط خطا، این مسئله کمتر

اتفاق می افتد. مدارات به شکل به هم پیوسته هستند، پس ولتاژ اعمالی به هر یک لزوماً مشخص نیست.

این مشکل را می توان با استفاده از ماتریس اتصال^۱ حل کرد که متغیرهای شاخه را به متغیرهای حلقه

تبدیل می کند [۳۸]

$$[i_s \ i_r]^T = C [i_{sL} \ i_{rL}]^T \quad (44-3)$$

در رابطه ۳-۴۴ زیرنویس L ، متغیر حلقه را علامت گذاری می کند. با این تعریف ترکیب معادلات

روابط ۳-۲۴ و ۳-۳۲ با استفاده از متغیرهای حلقه بصورت رابطه ۳-۴۵ خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} v_{sL} \\ v_{rL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sL} & 0 \\ 0 & R_{rL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sL} \\ i_{rL} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{ssL} & L_{srL} \\ L_{rsL} & L_{rrL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sL} \\ i_{rL} \end{bmatrix} \quad (45-3)$$

که پارامترهای رابطه ۳-۴۵ در روابط ۳-۴۶ تا ۳-۴۸ تعریف شده اند.

¹ Connection matrix

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

✓ ماتریس های اندوکتانس استاتور، استاتور-روتور و روتور و ماتریس مقاومت های مدارات استاتور

و روتور

✓ اینرسی ماشین

بلوک ۱ : در این بلوک ولتاژ حلقه های سیم پیچ توان بصورت تابعی از زمان محاسبه می شوند و ولتاژ

حلقه اتصال کوتاه صفر لحاظ می شود.

بلوک ۲ : این بلوک ولتاژ حلقه های سیم پیچ کنترل را از روی دامنه و فرکانس ورودی سیستم و

خروجی بلوک ۳ که زاویه فاز ولتاژهای سیم پیچ کنترل را برای پایدار سازی سیستم در سرعت سنکرون

تولید می کند، مشخص می نماید.

بلوک ۳ : این بلوک ابتدا با مقایسه سرعت روتور با سرعت سنکرون که از روی فرکانس های تحریک و

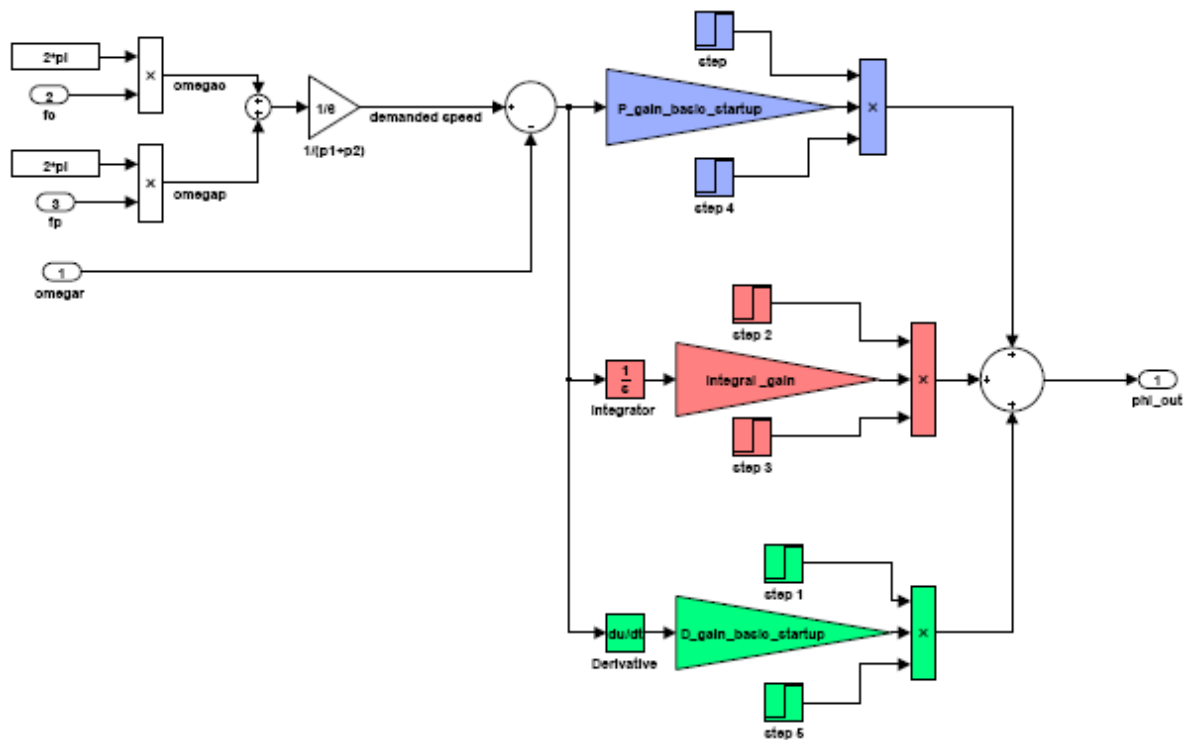
جفت قطب های سیم پیچ ها مشخص می شود، سیگنال خطای سرعت را تولید کرده و سپس با استفاده از

یک کنترل کننده

PID زاویه فاز ولتاژ سیم پیچ کنترل را جهت پایدار سازی ماشین در سرعت مطلوب تولید می کند .

شکل ۳-۶ دیاگرام این کنترل کننده را نشان می دهد

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



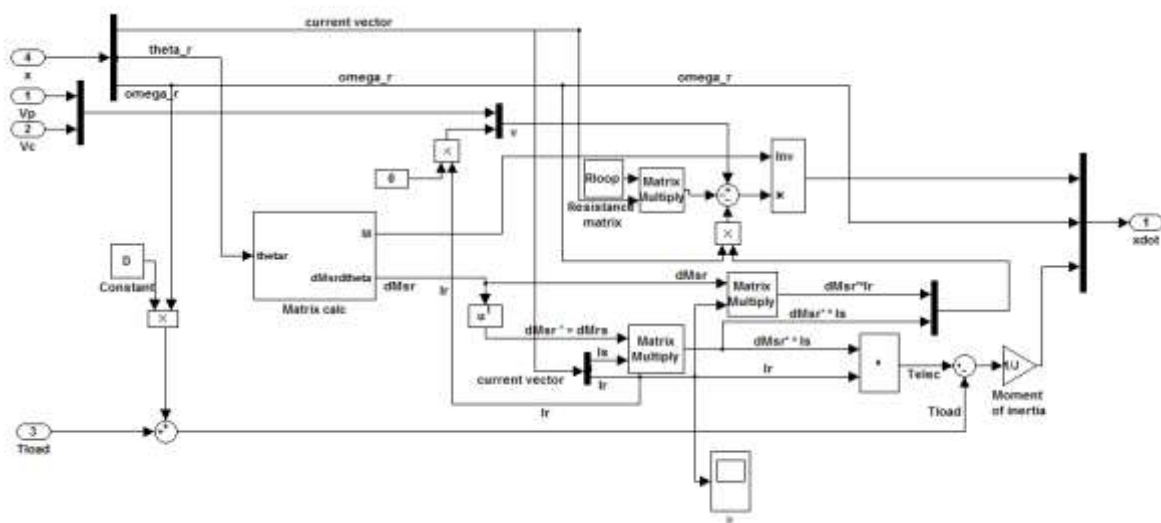
شکل ۳-۶: بلوک دیاگرام کنترل کننده PID برای پایدارسازی سیستم در عملکرد سنکرون

بلوک ۴: خروجی این بلوک، گشتاور باری است که بر حسب زمان به ماشین اعمال می شود.

بلوک ۵: در این بلوک معادلات حالت سیستم برای یافتن جریان های حلقه های استاتور و روتور،

گشتاور و سرعت ماشین حل می شود. شکل ۳-۷ دیاگرام بلوکی عملکرد این واحد را نشان می دهد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳-۷: بلوک دیاگرام حل معادلات حالت

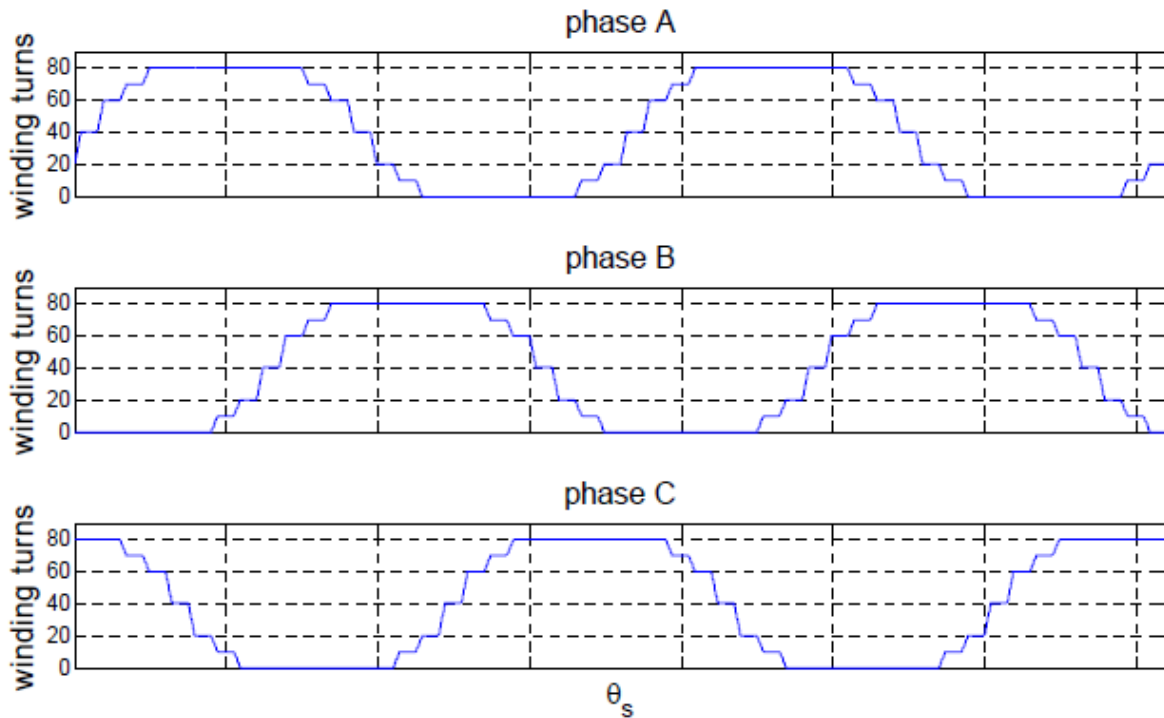
بلوک های A: در این قسمت، متغیرهای سیستم یعنی جریان های استاتور و روتور و سرعت و

موقعیت روتور تفکیک شده و معادله ۳-۴۲ حل میشود.

شکل های ۳-۸ و ۳-۹ بترتیب توابع توزیع سیم پیچی را برای فازهای سیم پیچ توان و کنترل نشان می

دهند. جدول ۳-۱ و ۳-۲ نیز نحوه اتصال کوپل ها را برای فازهای این دو سیم پیچ بیان می کنند.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

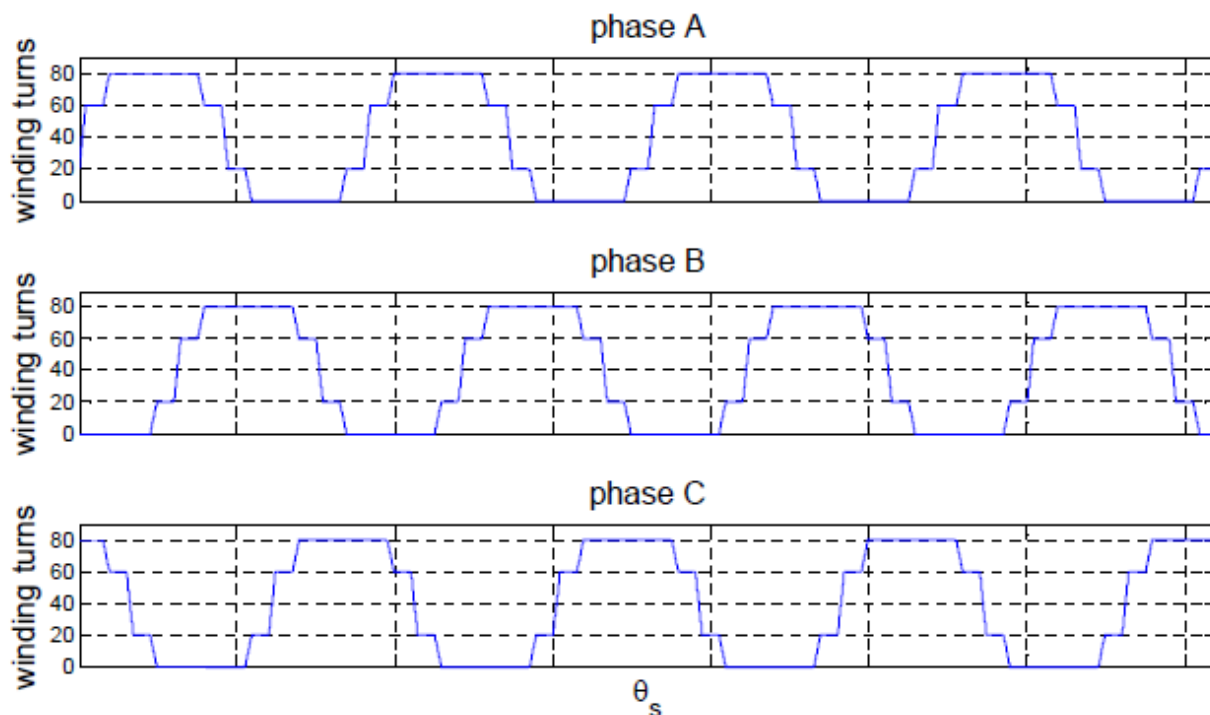


شکل ۳-۸: تابع توزیع هادی فازهای سیم پیچ توان ماشین مورد استفاده جهت شبیه سازی

جدول ۳-۱: نحوه اتصال کوپل های فازهای سیم پیچ توان بر حسب شماره شیار و جهت فرضی جریان بازوهای کوپل

اتصالات کوپل های سیم پیچی	نام سیم پیچ
1, 2, 3, 4, -13, -14, -15, -16, 25, 26, 27, 28, -37, 38, -39, -40	A
-9, -10, -11, -12, 21, 22, 23, 24, -33, -34, -35, -36, 45, 46, 47, 48	B
5, 6, 7, 8, -17, -18, -19, -20, 29, 30, 31, 32, -41, -42, -43, -44	C

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



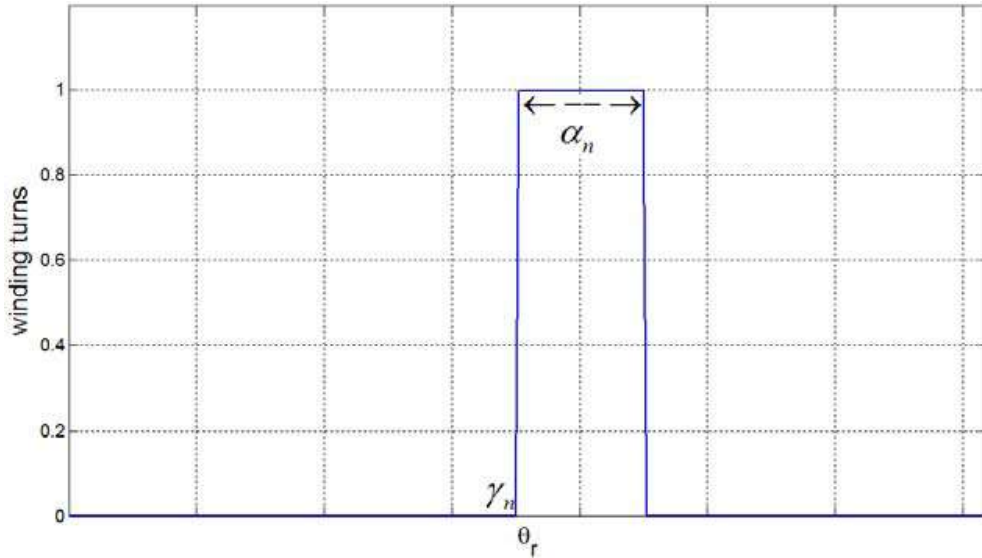
شکل ۳-۹: تابع توزیع هادی فازهای سیم پیچ کنترل ماشین مورد استفاده جهت شبیه سازی

جدول ۳-۲: نحوه اتصال کویل های فازهای سیم پیچ کنترل برحسب شماره شیار و جهت فرضی جریان بازوی های کویل

اتصالات کویل های سیم پیچی	نام سیم پیچ
1, 2, -7, -8, 13, 14, -19, -20, 25, 26, -31, -32, 37, 38, -43, -44	A
-5, -6, 11, 12, -17, -18, 23, 24, -29, -30, 35, 36, -41, -42, 47, 48	B
3, 4, -9, -10, 15, 16, -21, -22, 27, 28, -33, -34, 39, 40, -45, -46	C

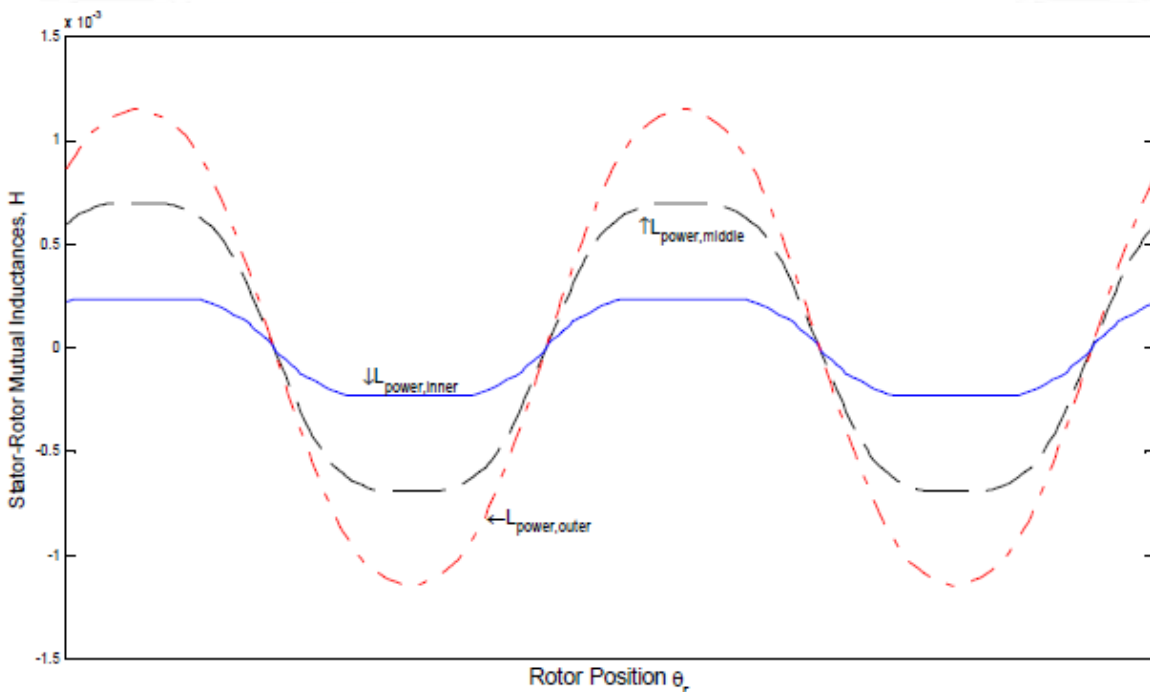
شکل ۳-۱۰: تابع توزیع سیم پیچی را برای حلقه شماره n از $nest$ شماره k روتور نشان می دهد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۳-۱۰: تابع توزیع هادی یک حلقه روتور

اندوکتانس های متقابل بین فاز مرجع سیم پیچ های توان و کنترل ماشین با حلقه های *nest* مرجع روتور بترتیب در شکل های ۳-۱۱ و ۳-۱۲ رسم شده است که تابعی از موقعیت نسبی استاتور و روتور می باشند.



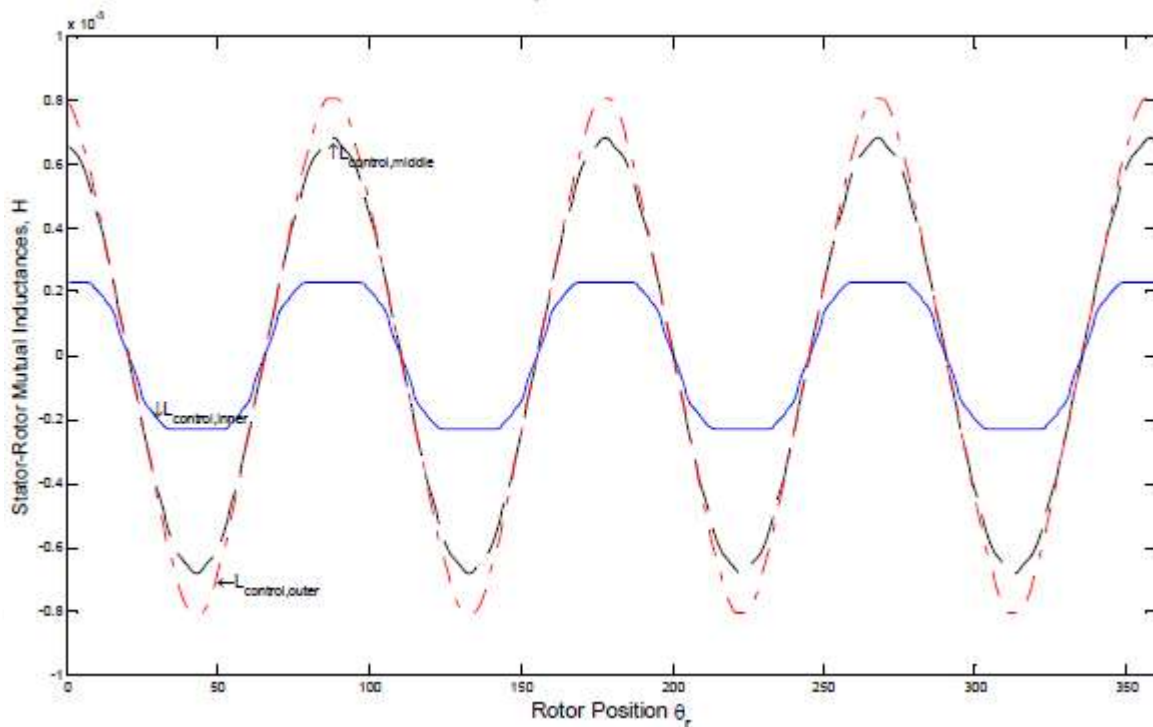
شکل ۳-۱۱: امپدانس متقابل بین فاز A سیم پیچ توان با حلقه های واقع در *nest* مرجع روتور

خط ممتد: امپدانس متقابل بین فاز A سیم پیچ توان با حلقه داخلی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

خط چین :امپدانس متقابل بین فاز A سیم پیچ توان با حلقه وسط

خط-نقطه :امپدانس متقابل بین فاز A سیم پیچ توان با حلقه خارجی



شکل ۳-۱۲: امپدانس متقابل بین فاز A سیم پیچ کنترل با حلقه های واقع در *nest* مرجع روتور

خط ممتد :امپدانس متقابل بین فاز A سیم پیچ توان با حلقه داخلی

خط چین :امپدانس متقابل بین فاز A سیم پیچ توان با حلقه وسط

خط-نقطه :امپدانس متقابل بین فاز A سیم پیچ توان با حلقه خارجی

شکل موج های بدست آمده از شبیه سازی ماشین در حالت بدون خطا در شکل ۳-۱۳ آورده شده است .

دامنه ولتاژهای فازی سیم پیچ توان و کنترل ماشین بترتیب 200 V و 100 V و فرکانس آنها نیز بترتیب

50 Hz و 30 Hz انتخاب شده است. تحریک سیم پیچ های استاتور با فرکانس های ذکر شده، موجب قرار

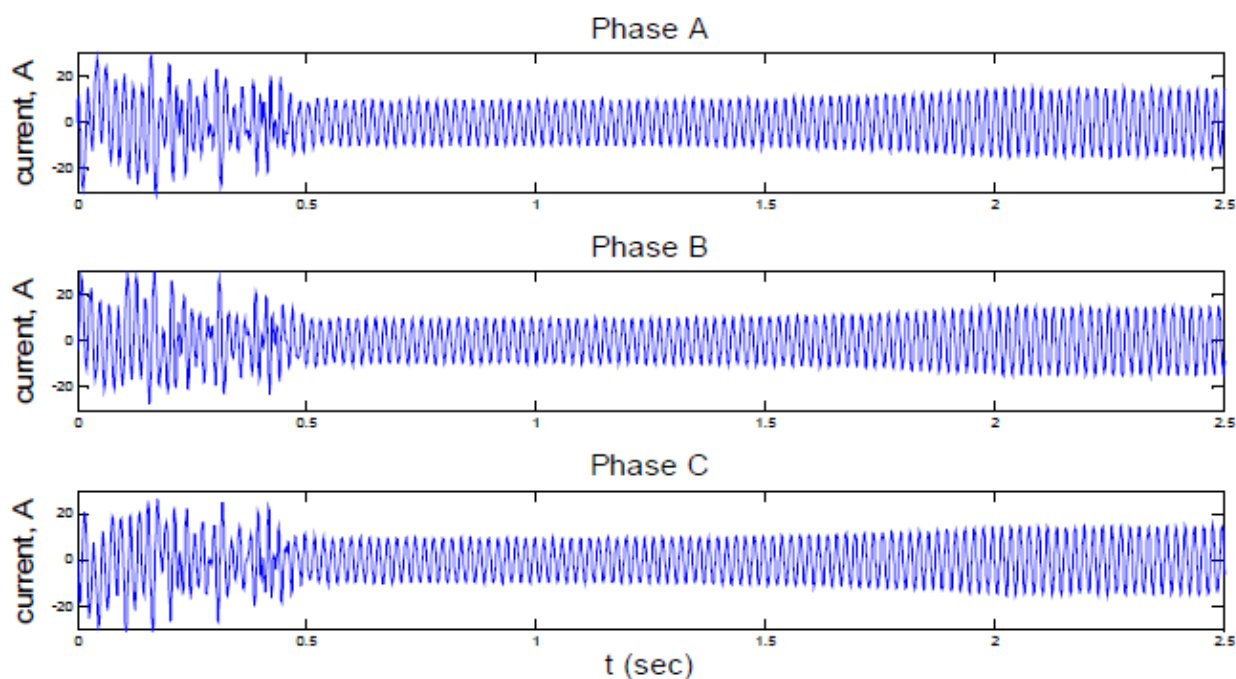
گرفتن ماشین در سرعت سنکرون 800 Rpm می گردد. ماشین در شرایط بدون بار شروع به چرخش می

کند و سپس از $t_0=1\text{ s}$ گشتاور بار بصورت خطی به آن اعمال شده تا اینکه در مدت ۱ ثانیه گشتاور Nm

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۵۰ بار بطور کامل روی ماشین قرار می گیرد. با اعمال گشتاور بار، جریان های سیم پیچ های استاتور و

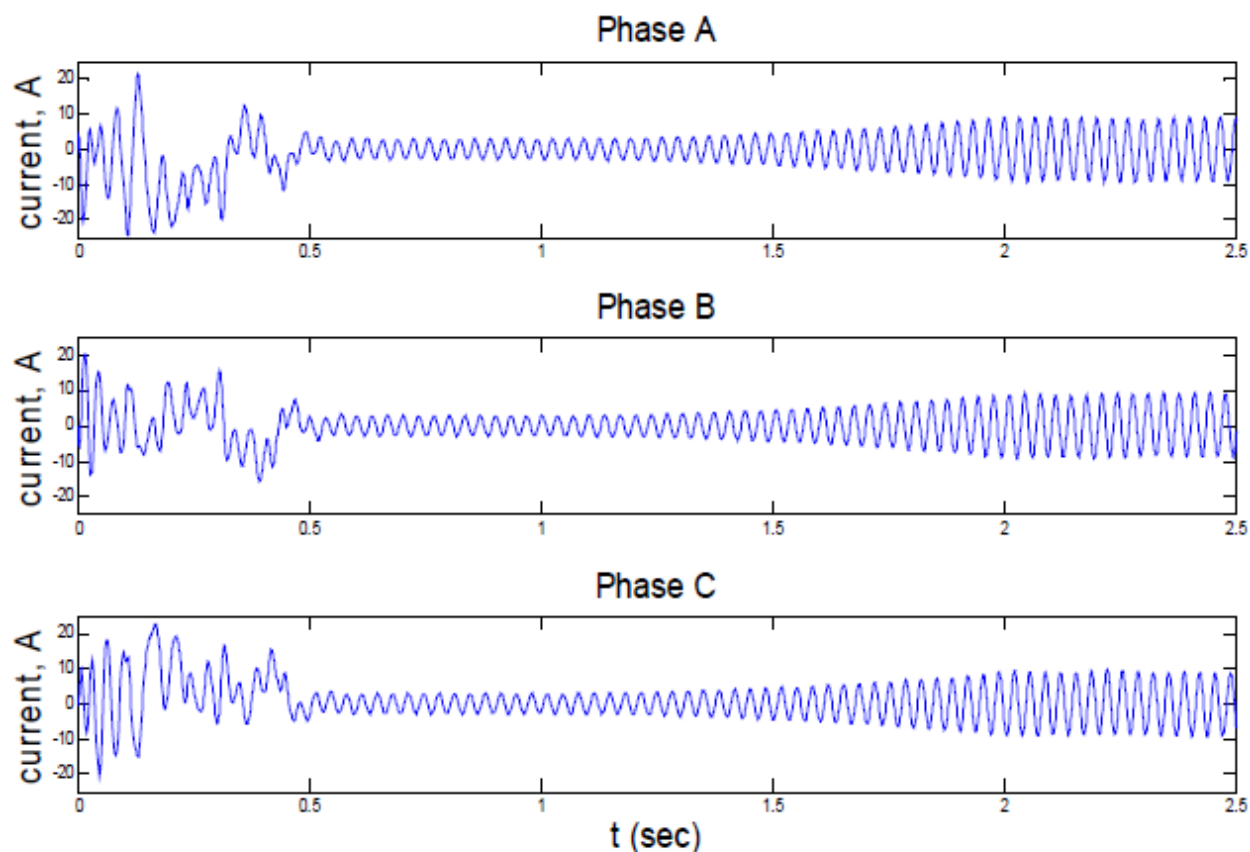
حلقه های روتور افزایش یافته اند تا توان بیشتری را به خروجی منتقل کنند.



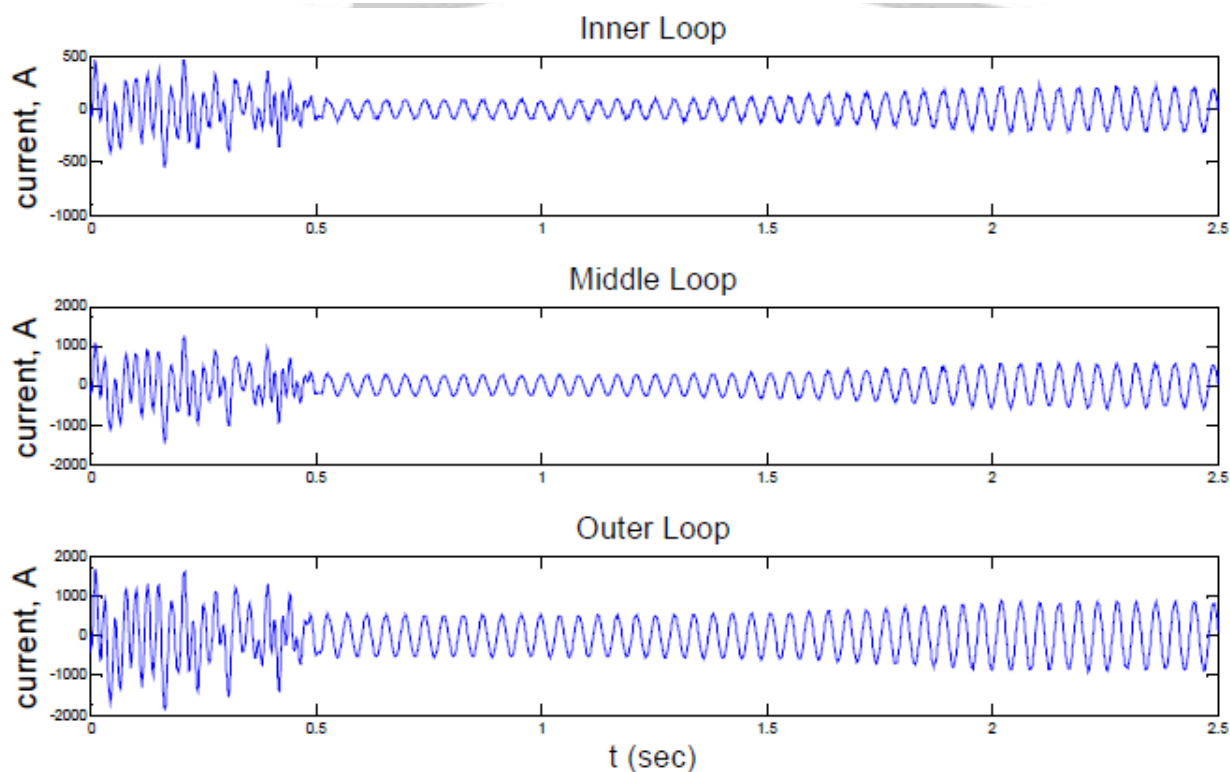
(الف) جریان های فازی سیم پیچ توان

WikiPower.ir

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

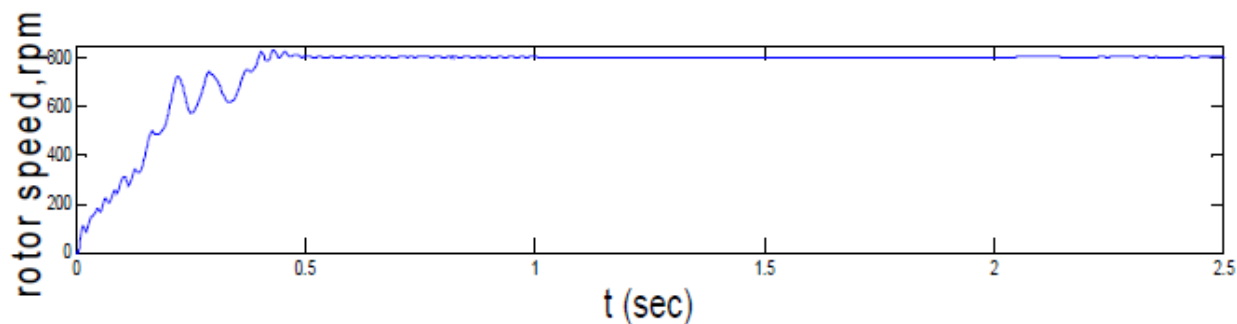


(ب) جریان های فازی سیم پیچ کنترل

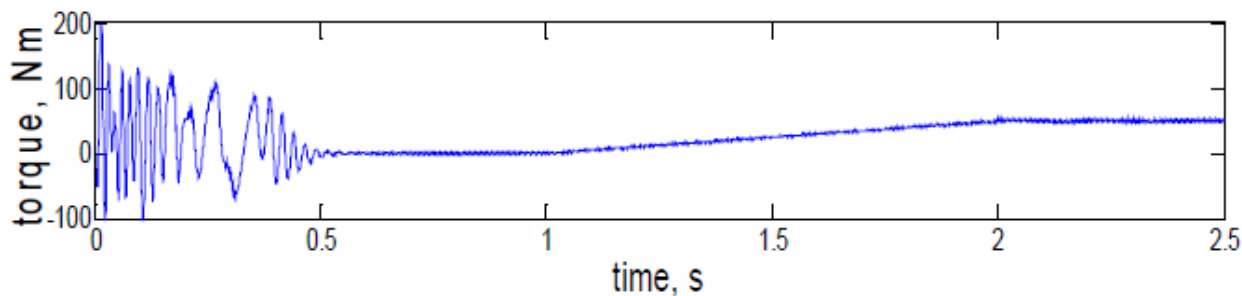


(پ) جریان حلقه های *nest* مرجع روتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



(ت) سرعت روتور



(ت) گشتاور الکترومکانیکی

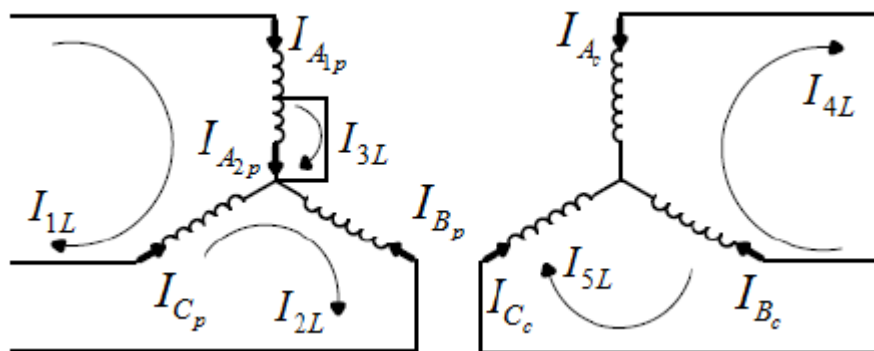
شکل ۳-۱۳: نتایج شبیه سازی در وضعیت بدون خطا

اکنون شبیه سازی های مربوط به خطاهای استاتور در حالت عملکرد سنکرون و شرایط تحریک ذکر شده در قسمت قبل آورده شده است. سه نوع از خطاهای استاتور و همچنین وضعیت عدم تعادل در ولتاژهای تحریک، توسط مدل استخراج شده برای حالت عملکرد سنکرون مورد بررسی قرار گرفته است. خطاهای استاتور شامل خطای فاز به خنثی، فاز به فاز و خطای مدار باز می شود. آرایش سیم پیچ های ماشین و اتصالات کوپل های آن در ادامه توصیف شده است.

خطای فاز به خنثی: برای شبیه سازی این وضعیت فرض شده است که نیمی از کوپل های فاز A

سیم پیچ توان با نقطه خنثی سیم پیچی اتصال کوتاه شده اند. دیاگرام مداری و اتصالات کوپل های این خطا بترتیب در شکل ۳-۱۴ و جدول ۳-۳ آمده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



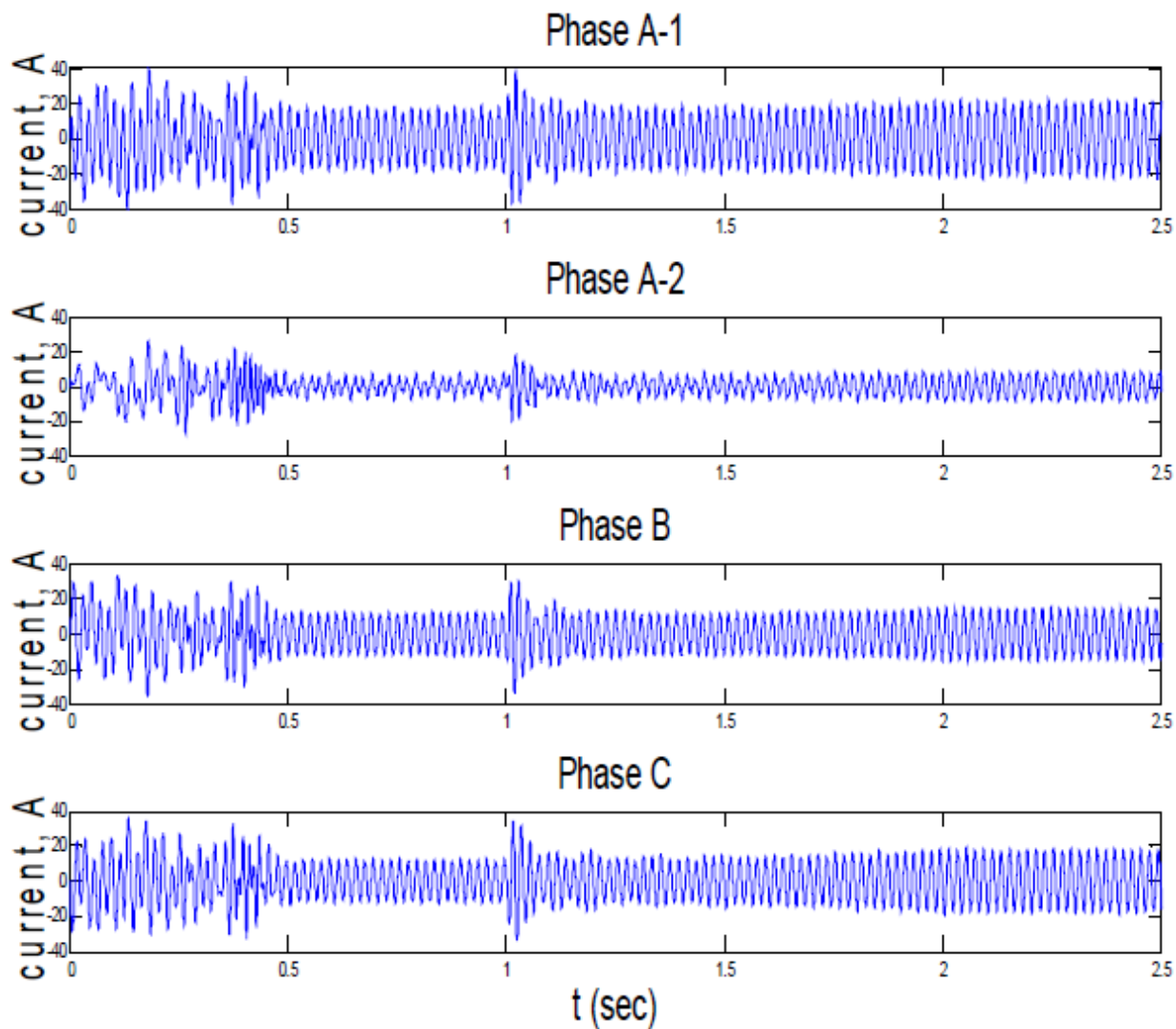
شکل ۳-۱۴: دیاگرام مداری سیم پیچ های ماشین در وضعیت خطای فاز به خنثی

جدول ۳-۳: نحوه اتصال کویل های سیم پیچ های استاتور در وضعیت خطای فاز به خنثی

اتصالات کویل های سیم پیچی	نام سیم پیچ
1, 2, 3, 4, -13, -14, -15, -16	A_{1p}
25, 26, 27, 28, -37, 38, -39, -40	A_{2p}
-9, -10, -11, -12, 21, 22, 23, 24, -33, -34, -35, -36, 45, 46, 47, 48	B_p
5, 6, 7, 8, -17, -18, -19, -20, 29, 30, 31, 32, -41, -42, -43, -44	C_p

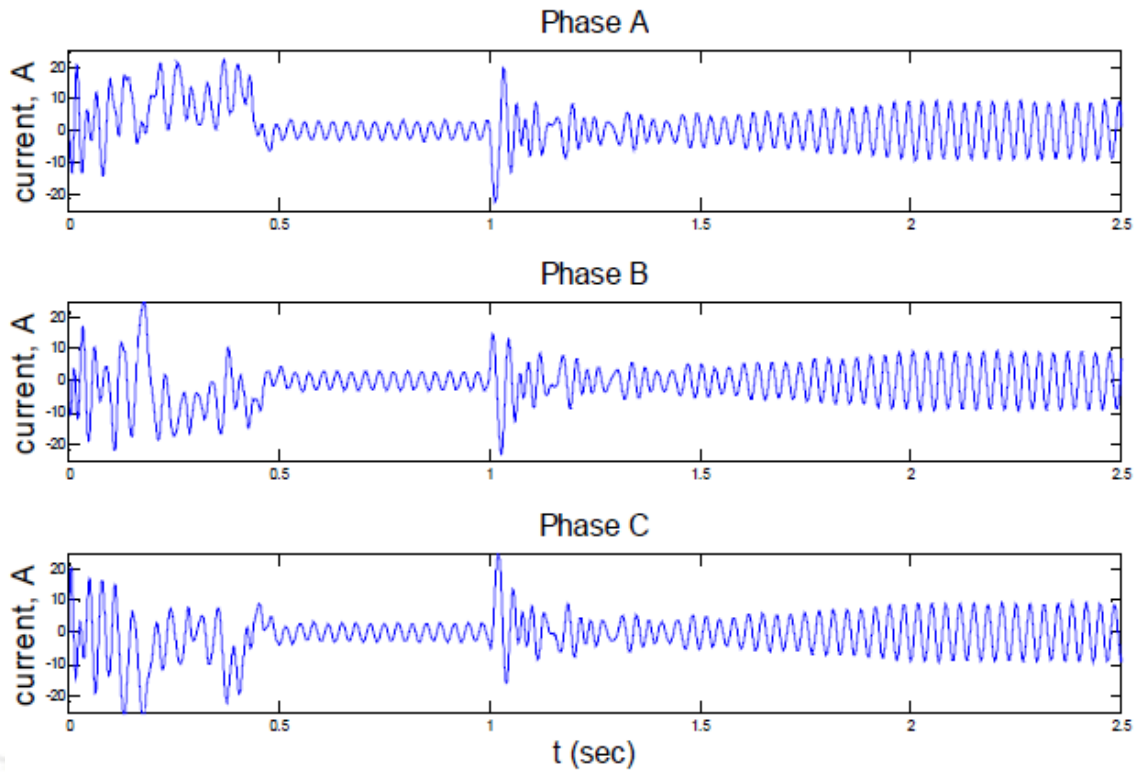
WikiPower.ir

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

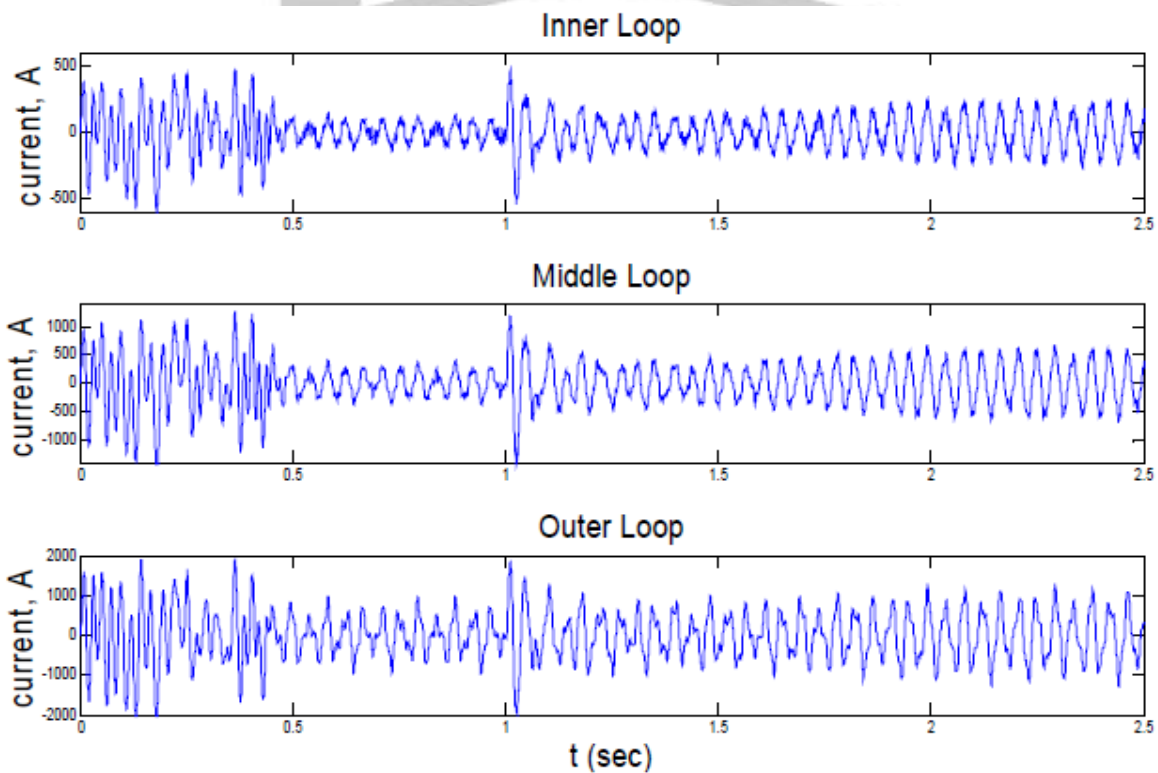


(الف) جریان های فازی سیم پیچ توان

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

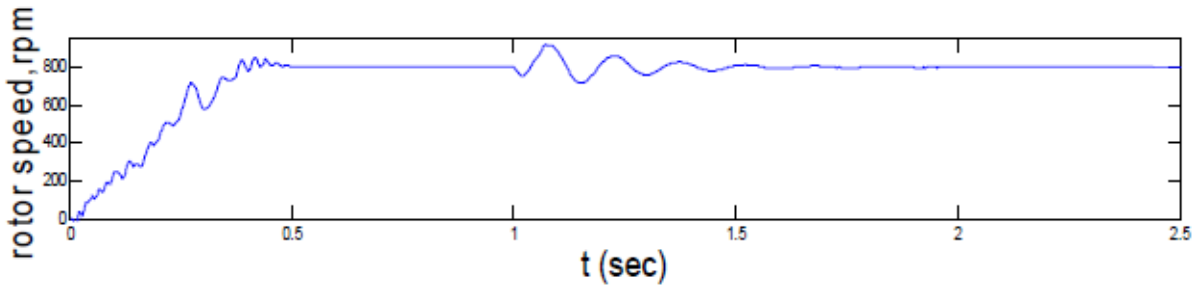


(ب) جریان های فازی سیم پیچ کنترل

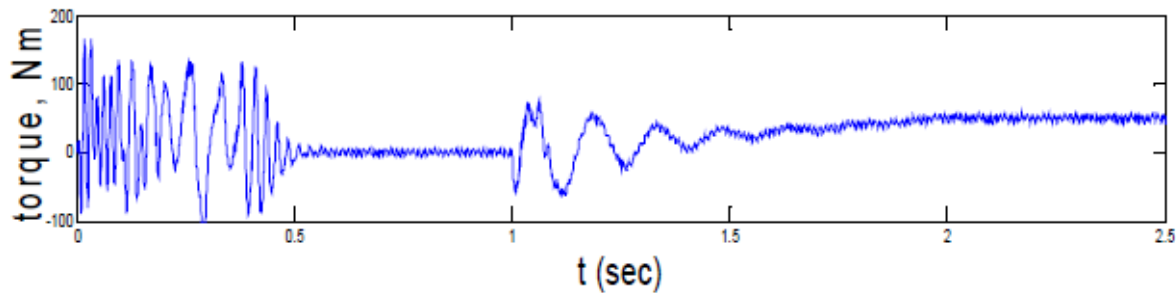


(پ) جریان حلقه های *nest* مرجع روتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



(ت) سرعت روتور



(ث) گشتاور الکترومکانیکی

شکل ۳-۱۵: نتایج شبیه سازی هنگام وجود خطای فاز به خنثی در سیم پیچ توان

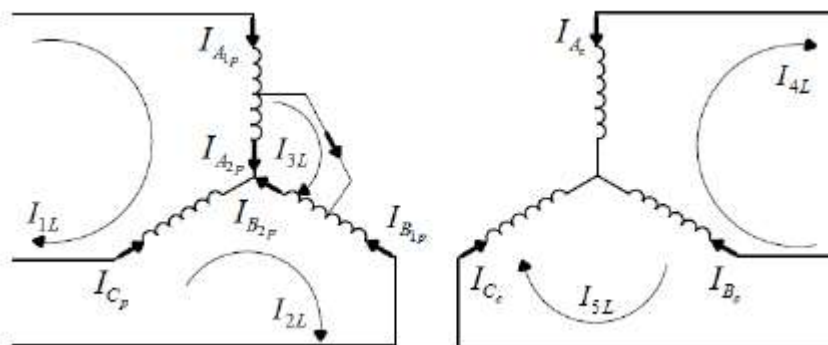
نتایج شبیه سازی بوضوح بیان می کنند که دامنه و محتوی هارمونیک جریان سیم پیچ های استاتور و حلقه های روتور افزایش یافته است. همچنین زمان نشست^۱ یعنی زمان لازم جهت رسیدن یک کمیت به مقدار نهایی خود، برای تمامی شکل موج ها و از جمله سرعت چرخش، افزایش یافته است. هنگامیکه گشتاور بار به ماشین اعمال می شود، شکل موج ها دچار نوسانات شدیدی شده اند و سرعت به سمت ناپایداری پیش رفته است اما نهایتاً کنترل کننده سبب پایداری سیستم گردیده است. از شکل موج گشتاور الکترومکانیکی ماشین در حالت پایدار دیده می شود که گشتاور تولیدی ماشین هنگام وقوع خطا دارای ریپل های با دامنه نسبتاً بزرگ است. دلیل ایجاد این ریپل ها، مؤلفه های هارمونیک جریان های استاتور و روتور هستند که در اثر وقوع خطا افزایش دامنه یافته اند. البته ریپل های گشتاور منبع مهم دیگری نیز دارند.

¹ Settling time

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

خطای فاز به فاز: برای شبیه سازی این وضعیت فرض شده است که نیمی از کویل های فاز **A** سیم

پیچ توان با نیمی از کویل های فاز **B** این سیم پیچ اتصال کوتاه شده اند. دیاگرام مداری و اتصالات کویل های این خطا بترتیب در شکل ۳-۱۶ و جدول ۳-۴ آمده است. شرایط تحریک و بار شبیه بررسی قبل است با این تفاوت که در $t=5s$ فرکانس سیم پیچ کنترل از 30 Hz به 0 Hz تغییر یافته است و انتظار می رود که سرعت چرخش از 800 rpm به 500 rpm کاهش یابد. با این کار هم عملکرد دینامیکی سیستم تحلیل گردیده و هم حالت عملکرد القایی ساده هنگام وجود خطا شبیه سازی گردیده است. شکل موج های یکی از فازهای دچار خطا و همچنین شکل موج سرعت در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده اند.

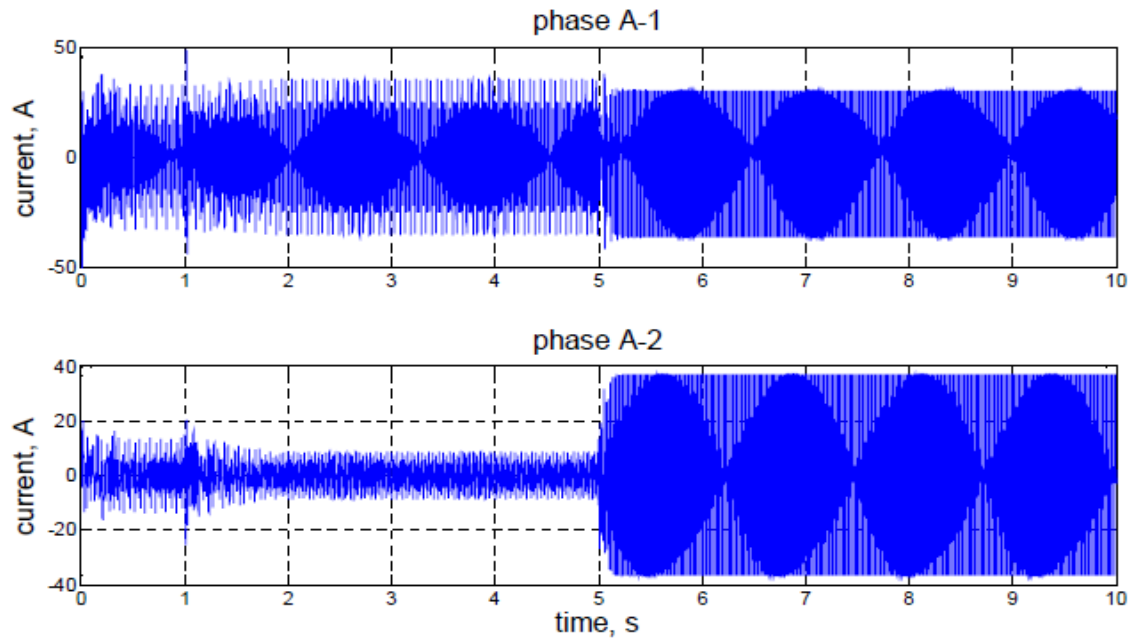


شکل ۳-۱۶: دیاگرام مداری سیم پیچ های استاتور در وضعیت خطای فاز به فاز

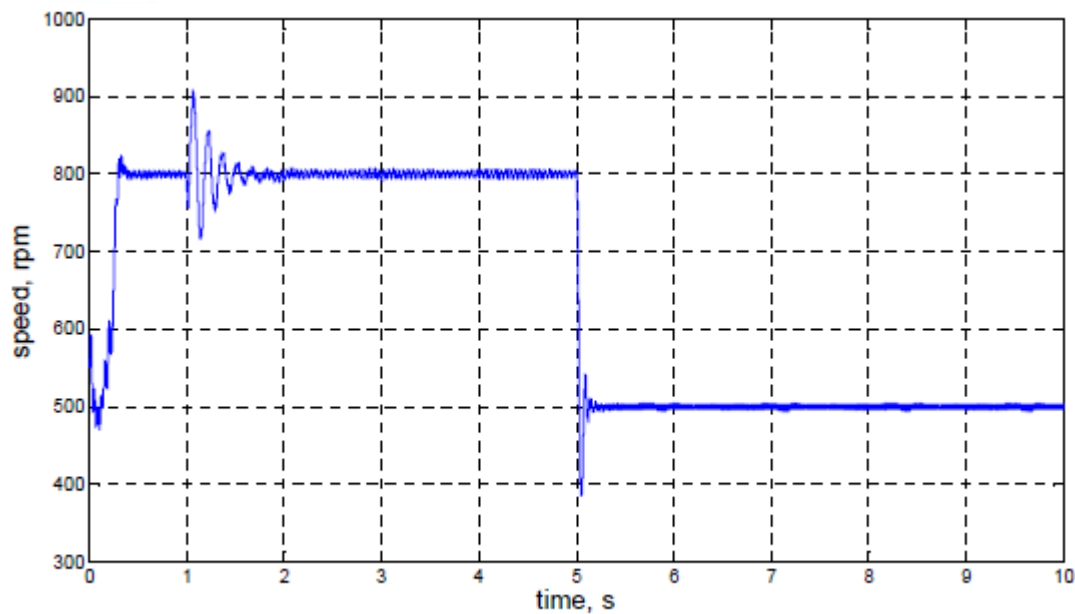
جدول ۳-۴: نحوه اتصالات کویل های سیم پیچ توان با وجود خطای فاز به فاز

اتصالات کویل های سیم پیچی	نام سیم پیچ
1, 2, 3, 4, -13, -14, -15, -16	A_{1p}
25, 26, 27, 28, -37, 38, -39, -40	A_{2p}
-9, -10, -11, -12, 21, 22, 23, 24	B_{1p}
-33, -34, -35, -36, 45, 46, 47, 48	B_{2p}
5, 6, 7, 8, -17, -18, -19, -20, 29, 30, 31, 32, -41, -42, -43, -44	C_p

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



(الف) جریان قسمت ۱ و ۲ فاز A سیم پیچ توان



(ب) سرعت روتور

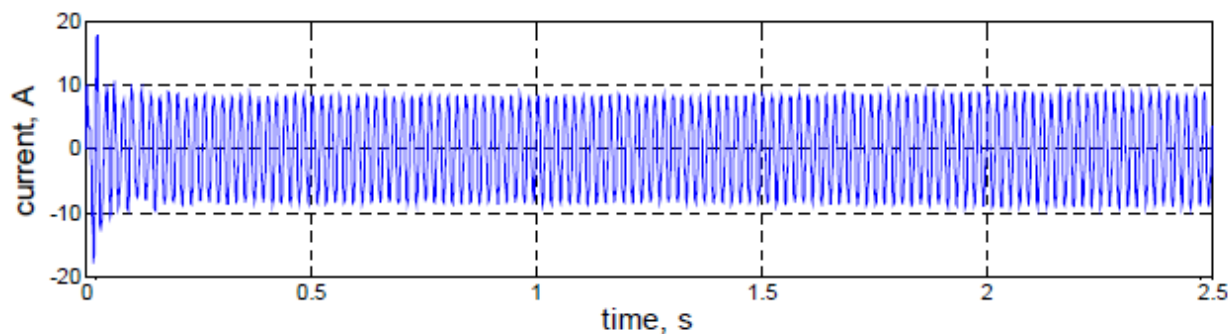
شکل ۳-۱۷: نتایج شبیه سازی هنگام وجود خطای فاز به فاز در سیم پیچ توان و تغییر سرعت سنکرون

خطای مدار باز: برای شبیه سازی این وضعیت خطا فرض شده است که فاز A از سیم پیچ توان

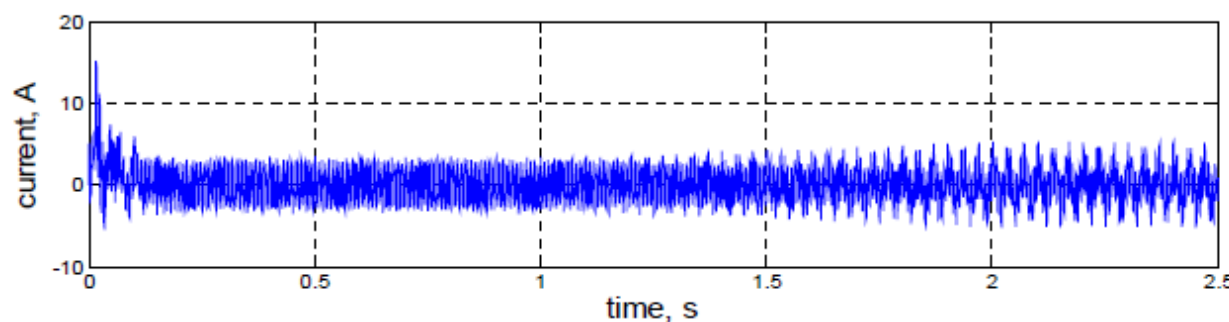
ماشین مدار باز است. شکل موج جریان فاز سیم پیچ توان و کنترل به همراه سرعت سیستم در شکل زیر

نشان داده شده است.

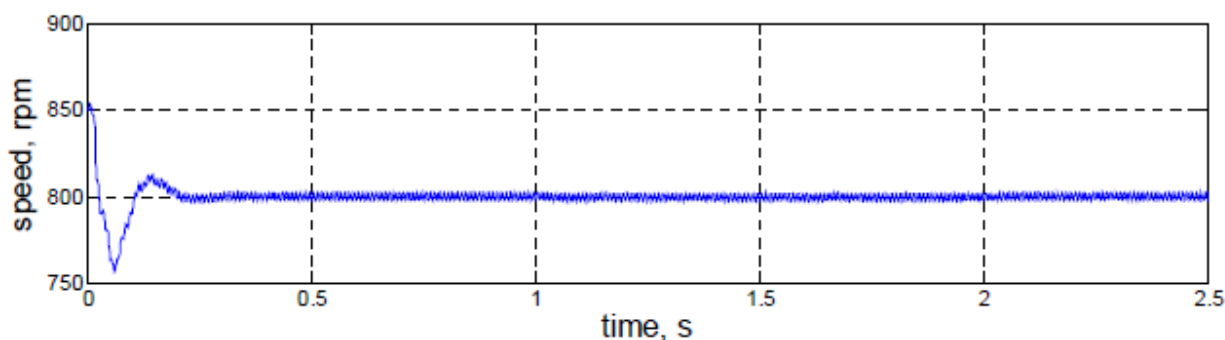
برای دریافت فایل word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



(الف) جریان فازی سیم پیچ توان



(ب) جریان فازی سیم پیچ کنترل



(پ) سرعت روتور

شکل ۳-۱۸: نتایج شبیه سازی هنگام وجود خطای مدار باز در سیم پیچ توان

عدم تعادل در ولتاژهای تحریک: در این قسمت نتایج شبیه سازی رفتار دینامیکی ماشین

هنگام وجود عدم تعادل در ولتاژهای تحریک بعنوان آخرین مورد از شبیه سازی ها، آورده شده است. شرایط

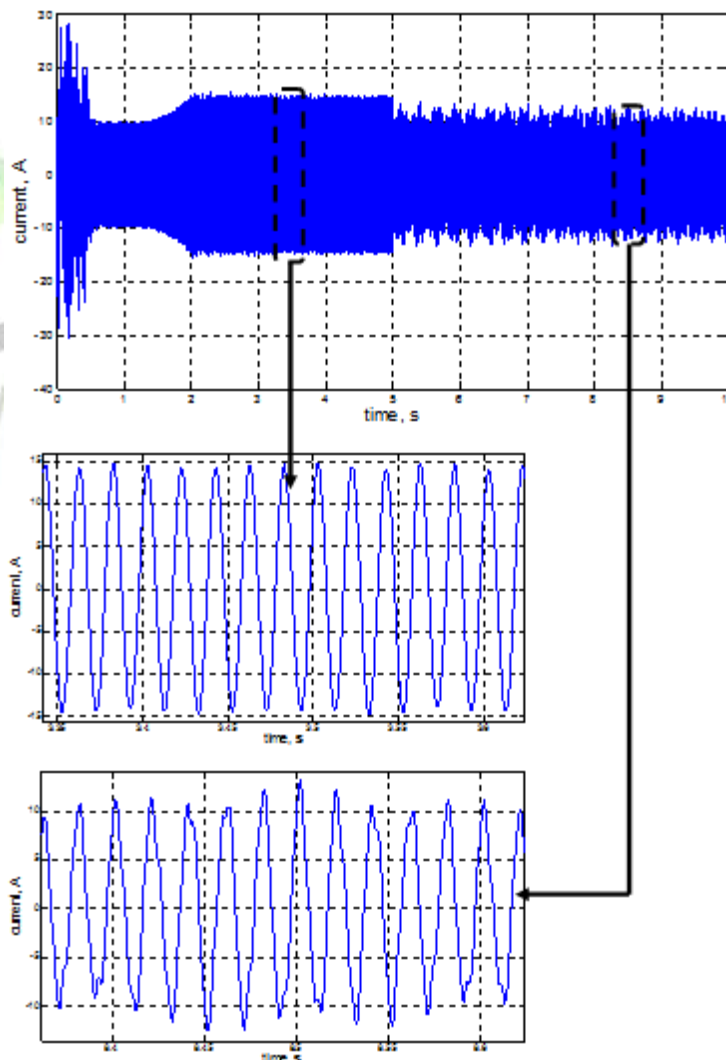
تحریک و بار مشابه آنچه برای شبیه سازی ماشین در حالت بدون خطا گفته شد، می باشد با این تفاوت که

در لحظه $t=5s$ ولتاژ فاز **A** از سیم پیچ توان به $0/8$ مقدار اولیه خود کاهش می یابد. شکل های ۳-۱۹ تا

۳-۲۴ بترتیب جریان فاز **A** و **B** سیم پیچ توان، جریان فاز **A** سیم پیچ کنترل، جریان حلقه داخلی از **nest**

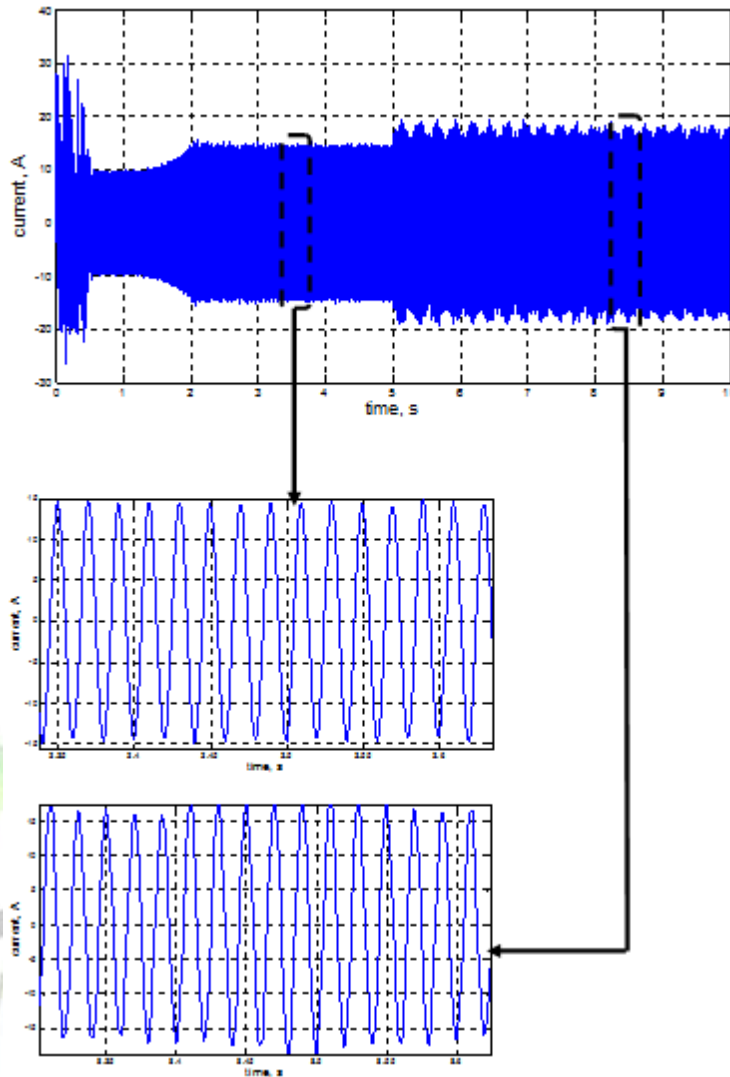
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

مرجع روتور، سرعت و گشتاور الکترومکانیکی ماشین را در چنین شرایطی نشان می دهد. مشاهده می گردد که جریان فاز A سیم پیچ توان با کاهش ولتاژ فاز، کاهش یافته در حالیکه جریان فازهای دیگر این سیم پیچ و همچنین جریان های فازی سیم پیچ کنترل و جریان حلقه های روتور افزایش پیدا کرده اند و تمامی شکل موج های با وقوع عدم تعادل در تحریک دچار نوسان شده اند و محتوای هارمونیک آنان افزایش یافته است. چرخش ماشین پس از ایجاد خطای عدم تعادل در ولتاژ تحریک با نوساناتی با دامنه قابل توجه صورت گرفته است و ریپل های گشتاور تولیدی ماشین افزایش یافته است.

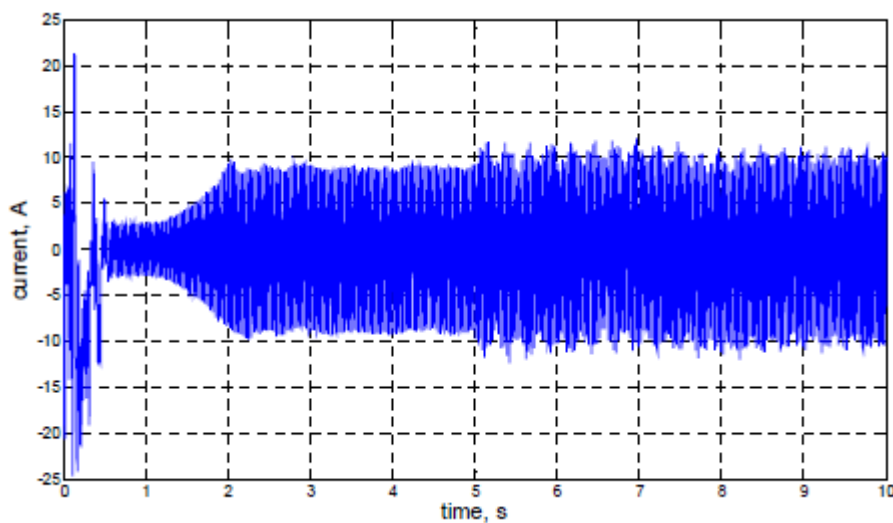


شکل ۳-۱۹: جریان فاز A از سیم پیچ توان هنگام وجود عدم تعادل در ولتاژهای تحریک

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی‌پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

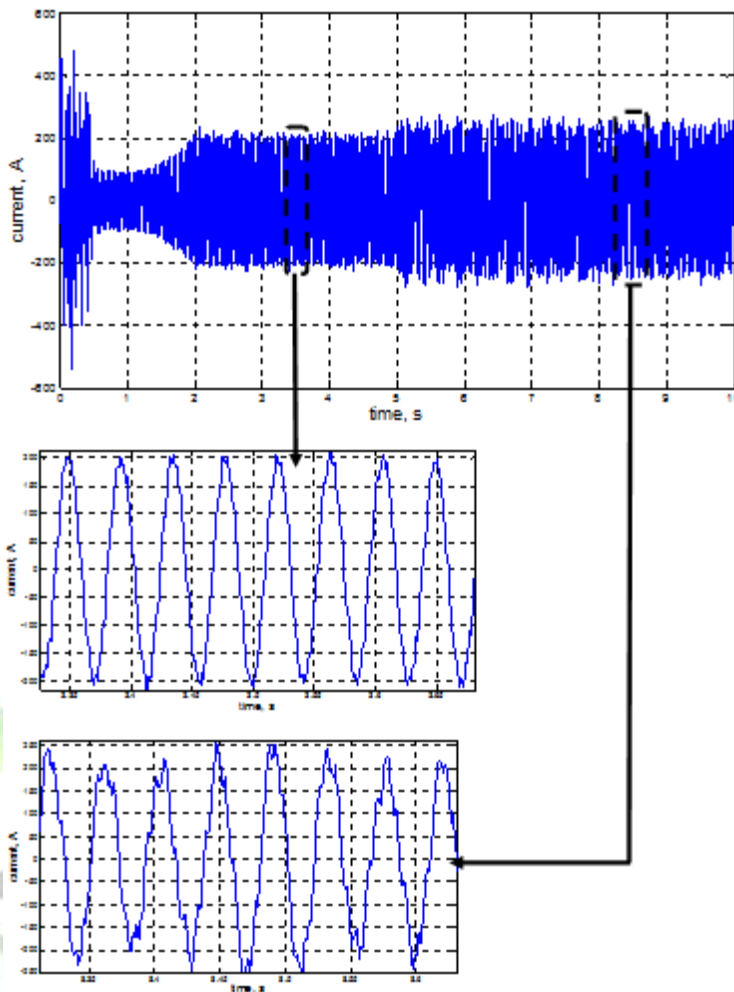


شکل ۳-۲۰: جریان فاز B از سیم پیچ توان هنگام وجود عدم تعادل در ولتاژهای تحریک

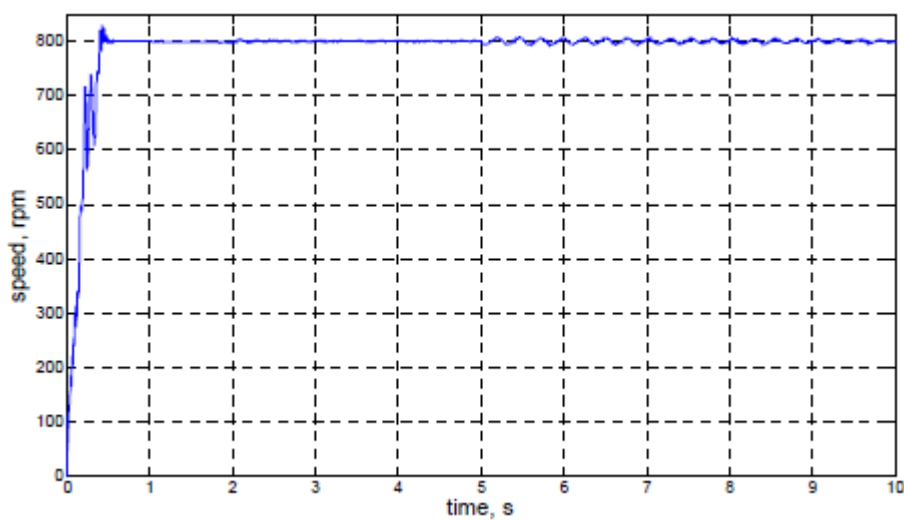


شکل ۳-۲۱: جریان فاز A از سیم پیچ کنترل هنگام وجود عدم تعادل در ولتاژهای تحریک

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

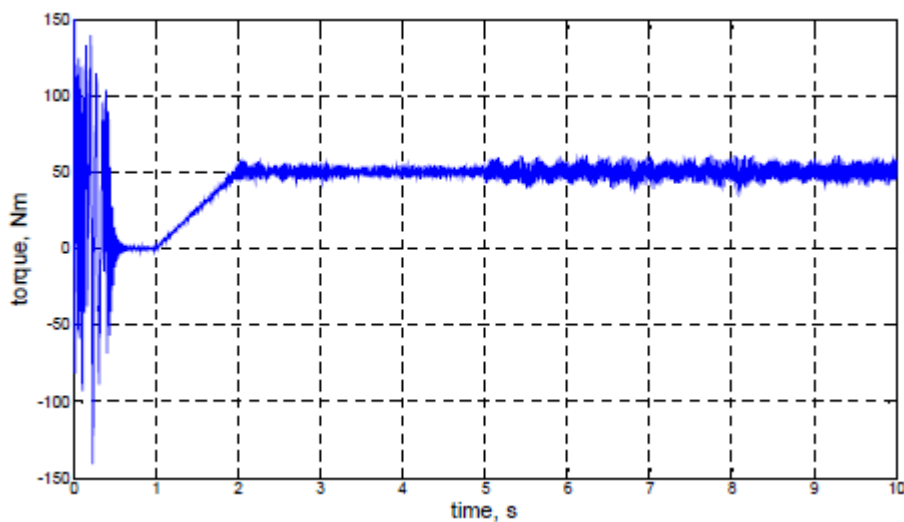


شکل ۳-۲۲: جریان حلقه داخلی از *nest* مرجع روتور هنگام وجود عدم تعادل در ولتاژهای تحریک



شکل ۳-۲۳: سرعت چرخش ماشین هنگام وجود عدم تعادل در ولتاژهای تحریک

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۳-۲۴: گشتاور الکترومکانیکی تولیدی ماشین هنگام وجود عدم تعادل در ولتاژهای تحریک



فصل ۴- مدلسازی اجزای محدود

۴-۱- مقدمه

فصل حاضر به تحلیل اجزای محدود موتور دوتحریکه بدون جاروبک در شرایط عادی عملکرد و همچنین هنگامیکه خطاهای سیم پیچی استاتور در ماشین به وقوع می پیوندد، اختصاص یافته است.

در مطالب این فصل، ساختار پیچیده ماشین با استفاده از معادلات ماکسول برای یافتن روابط رفتار میدانی در یک دامنه دو بعدی مدل شده است و سپس از روش اجزای محدود برای گسسته سازی دامنه استفاده گردیده است. در معادلات از پتانسیل برداری مغناطیسی بعنوان متغیر استفاده شده و روش گالرکین برای تشکیل معادلاتی که باید بصورت عددی حل شوند، بکار گرفته شده است. عبارات شامل مشتقات توسط روش بازگشتی اولر گسسته شده اند و ویژگی غیر خطی مواد مغناطیسی با اعمال روش تقریبات بازگشتی و روش نیوتن-رافسون در نظر گرفته شده است. روابط میدانی مربوط به هادی های استاتور و روتور با تعاریف جداگانه ای که برای آنها انجام شده، بطور متفاوت صورت گرفته است تا به چگالی جریان در هادی های روتور اجازه تغییر در سطح مقطع داده شود (اثر پوستی^۱). آرایش خاص معرفی شده در فصول قبل با عنوان آرایش **nested loop** با تمام پیچیدگی های آن مبنای استخراج روابط میدانی میله های روتور قرار گرفته است. چرخش روتور توسط روش لایه متحرک مدلسازی شده است و از معادله تانسور تنش ماکسول به همراه معادله نوسانات مکانیکی برای ارتباط بین کمیت های الکتریکی و مکانیکی ماشین بهره گرفته شده است. تمامی موارد ذکر شده، یک تحلیل کامل مغناطیسی - دینامیکی را به روش اجزای محدود محقق می سازد که دقیقترین روش برای شبیه سازی رفتار ماشین های الکتریکی است. اما مشابه تمامی تحلیل های عددی در ابعاد بزرگ، عیب این نوع مدلسازی زمانی بسیار طولانی انجام محاسبات در مقایسه با دیگر مدل های ماشین است. این مشکل بویژه هنگامیکه هدف تحلیل شبیه سازی حالت های

¹ Skin effect

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

خطا باشد جدی تر بروز میکند زیرا در این موارد دیگر نمی توان تقارن های موجود در ساختار بصورت تکرار نواحی پاسخ بشکل تناوبی ۱ یا معکوس تناوبی ۲ در تقلیل میدان لازم برای انجام محاسبات استفاده کرد.

۴-۲- استخراج معادلات بر اساس پتانسیل برداری مغناطیسی

مدلسازی سیستم الکترومکانیکی ماشین با استفاده از پتانسیل برداری مغناطیسی بعنوان متغیر انجام شده است زیرا پتانسیل مغناطیسی رابطه مستقیمی با شار دارد (توضیحات بیشتر در [۳۹] آمده است). این نحوه تشکیل معادلات منتهی به یک راه آسان برای اتصال مدارات الکتریکی با معادلات میدان مغناطیسی می شود.

میدان مغناطیسی و پتانسیل برداری با رابطه ۴-۱ با یکدیگر پیوند دارند.

$$\vec{B} = \text{curl} \vec{A} \quad (1-4)$$

رابطه میدان الکتریکی با میدان مغناطیسی نیز به شکل رابطه ۴-۲ است.

$$\text{curl} \vec{B} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2-4)$$

پس رابطه ۴-۳ را می توان برای توصیف ارتباط بین میدان الکتریکی و پتانسیل برداری مغناطیسی نوشت.

$$\text{curl} \left(E + \frac{\partial A}{\partial t} \right) = 0 \quad (3-4)$$

از رابطه ۴-۳ نتیجه می شود که حاصل جمع درون پراونتز را می توان بصورت گرادیان یک اسکالر که در واقع همان پتانسیل الکتریکی است، بیان کرد.

$$E + \frac{\partial A}{\partial t} = -\nabla V \quad (4-4)$$

با انجام محاسبات ذکر شده در روابط ۴-۵، ۴-۶ و ۴-۷، معادله کلی معرف یک سیستم الکترومکانیکی به

شکل رابطه ۴-۸ بدست می آید.

¹ Periodicity

² Anti-periodicity

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$J = J_s + \sigma \left(-\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \right) \quad (۵-۴)$$

$$\text{curl} \vec{H} = J \quad (۶-۴)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (۷-۴)$$

$$\text{curl}(v \cdot \text{curl} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla V - J_s = 0 \quad (۸-۴)$$

۴-۳- استخراج معادلات در دامنه های دوبعدی

بطور طبیعی ماشین های الکتریکی هندسه پیچیده ای را معرفی می کنند و برای تحلیل آنها حتی با وجود کامپیوترهای پیشرفته باید فرضیاتی در مورد پدیده های الکترومکانیکی انجام داد. در فضای مدلسازی دو بعدی تغییرات میدان مغناطیسی تنها در صفحه xy فرض می شود و در نتیجه پتانسیل برداری مغناطیسی و چگالی جریان تنها دارای مؤلفه های محوری هستند، یعنی:

$$\vec{A} = A \hat{k} \quad (۹-۴)$$

$$\vec{J} = J \hat{k} \quad (۱۰-۴)$$

که در این روابط \hat{k} بردار واحد در جهت مثبت محور Z می باشد. با این فرضیات معادله ۸-۴ به شکل رابطه ۱۱-۴ تبدیل می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V + J_s = 0 \quad (۱۱-۴)$$

۴-۴- روش اجزای محدود

در این بخش بطور مختصر به معرفی روش اجزای محدود پرداخته می شود و جنبه های کاربردی و مفاهیم این روش بگونه ای ذکر می شود تا بتوان از آنها مستقیماً جهت تحلیل ساختار مورد نظر در این رساله استفاده کرد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تکامل روش اجزای محدود وابستگی زیادی به پیشرفت در زمینه مهندسی و علوم کامپیوتر دارد. کاربرد آن در زمینه علوم گوناگون بویژه علوم هسته ای، فضایی و صنایع حمل و نقل بدلیل درجه بالای دقت این روش در مدل کردن مسائل پیچیده است. حل می شود.

در مسائل الکترومغناطیسی عموماً FEM توسط روش های **variational** یا **residual** حل می شود. در مورد روش اول، روند عددی حل معادله بر پایه تابعی بنیان گذارده می شود که کمینه شده است. برای هر مسئله یک تابع ویژه باید تعریف گردد. برای مسائل دو بعدی کلاسیک، این توابع مشهورند اما در مورد پدیده های نامعمول تر، تحقیق جهت یافتن یک تابع لازم است که در بعضی موارد می تواند یک کار مشکل باشد. بعلاوه در این روش معادلات فیزیکی مربوطه مستقیماً بکار گرفته نمی شوند بلکه همراه با تابع کمینه شده استفاده می شوند. بر خلاف این روش، روش های باقیمانده مستقیماً از معادلاتی که باید حل شوند، استخراج می گردند. این یک مزیت مهم در مقایسه با روش های **variational** است زیرا نسبتاً ساده تر و قابل فهم ترند و کاربرد آنها نیز آسان تر است. این مزایا دلیل اصلی بکارگیری روش باقیمانده در اکثر کارهای FEM است که امروزه انجام می شود. روش گالرکین شکل خاصی از روش های باقیمانده است که بطور گسترده در مسائل الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار می گیرد. استخراج معادلات در این روش ساده و کاربردی است و بطور معمول نتایج دقیقی بدست می دهد. [۳۹]

۴-۴-۱- مثلث مرتبه اول

در FEM، ناحیه مورد نظر برای یافتن جواب به زیرنواحی کوچکی تقسیم یا گسسته می گردد که "اجزای محدود" نامیده می شوند. برای مثال در کاربردهای دوبعدی، ناحیه می تواند به نواحی محدود و بهم پیوسته ای مانند مثلث ها گسسته شود. نقاطی که مثلث ها را تعریف می کنند، "گره ۲" ها یا "درجه

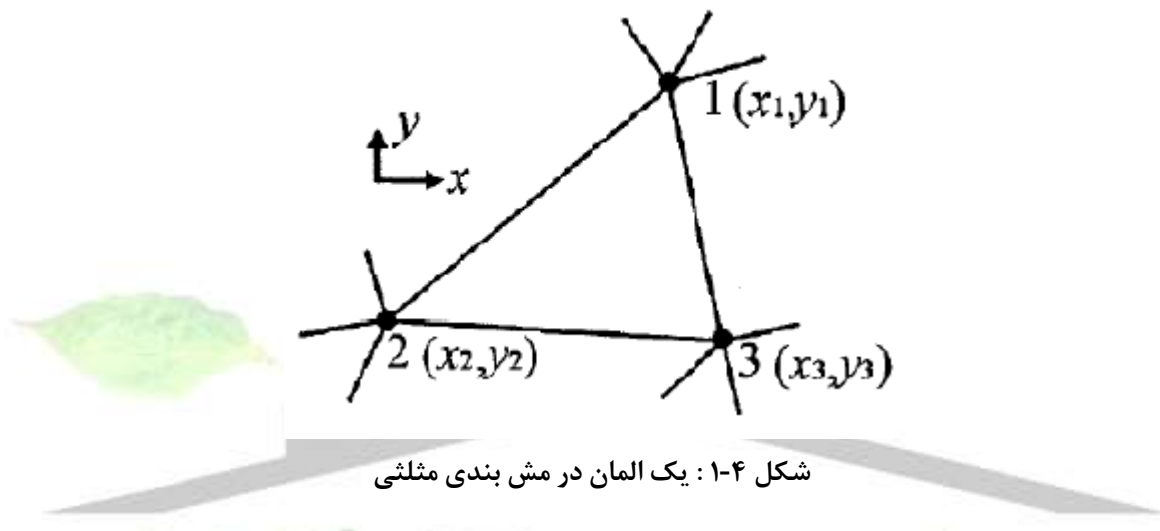
¹ Finite element

² Node

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی‌پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

آزادی ۱ و مثلث‌ها " عنصر ۲ " خوانده می شوند. با کنار یکدیگر قرار گرفتن عناصر، " مش ۳ " بوجود می آید.

در شکل ۱-۴ یک مثلث نوعی نشان داده شده است. چون این مثلث یک عنصر مرتبه اول است، پتانسیل مغناطیسی بطور خطی درون آن تغییر می کند. برای این نوع عناصر، معادله پتانسیل برداری بصورت رابطه ۱۳-۴ نوشته می شود.



$$A = a_1 + a_2x + a_3y \quad (13-4)$$

این رابطه باید در گره ها نیز برقرار باشد، پس در گره های مثلث می توان روابط ۱۴-۴ تا ۱۶-۴ را نوشت.

$$A_1 = a_1 + a_2x_1 + a_3y_1 \quad (14-4)$$

$$A_2 = a_1 + a_2x_2 + a_3y_2 \quad (15-4)$$

$$A_3 = a_1 + a_2x_3 + a_3y_3 \quad (16-4)$$

از این سه معادله مقادیر a_1 ، a_2 و a_3 مورد نیاز برای محاسبه دترمینان های ۱۷-۴ تا ۲۰-۴ مشخص

می شود.

¹ Degree of Freedom

² Element

³ Mesh

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی‌پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$a_1 = \det \left(\frac{1}{D} \begin{bmatrix} A_1 & x_1 & y_1 \\ A_2 & x_2 & y_2 \\ A_3 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \right) \quad (۱۷-۴)$$

$$a_2 = \left(\frac{1}{D} \begin{bmatrix} 1 & A_1 & y_1 \\ 1 & A_2 & y_2 \\ 1 & A_3 & y_3 \end{bmatrix} \right) \quad (۱۸-۴)$$

$$a_3 = \det \left(\frac{1}{D} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & A_1 \\ 1 & x_2 & A_2 \\ 1 & x_3 & A_3 \end{bmatrix} \right) \quad (۱۹-۴)$$

$$D = \det \left(\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \right) \quad (۲۰-۴)$$

مقدار D دو برابر مساحت سطح المان است که این مسئله مستقیماً قابل اثبات است. با جایگذاری روابط

a_1, a_2 و a_3 در رابطه ۴-۱۳ و ساده کردن آن، عبارت ۴-۲۱ برای پتانسیل مغناطیسی حاصل می شود.

$$A(x, y) = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^3 (p_i + q_i x + r_i y) A_i \quad (۲۱-۴)$$

که عبارات p_i, q_i و r_i در رابطه ۴-۲۱ مطابق رابطه ماتریسی ۴-۲۲ محاسبه می شوند.

$$\begin{bmatrix} p_1 & q_1 & r_1 \\ p_2 & q_2 & r_2 \\ p_3 & q_3 & r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 y_3 - x_3 y_2 & y_2 - y_3 & x_3 - x_2 \\ x_3 y_1 - x_1 y_3 & y_3 - y_1 & x_1 - x_3 \\ x_1 y_2 - x_2 y_1 & y_1 - y_2 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \quad (۲۲-۴)$$

چون $\vec{B} = \text{curl} \vec{A}$ ، پس رابطه ۴-۲۳ در مورد میدان مغناطیسی برقرار خواهد بود.

$$\vec{B} = \frac{\partial A}{\partial y} \hat{i} - \frac{\partial A}{\partial x} \hat{j} = \frac{1}{D} [(r_1 A_1 + r_2 A_2 + r_3 A_3) \hat{i} - (q_1 A_1 + q_2 A_2 + q_3 A_3) \hat{j}] \quad (۲۳-۴)$$

عبارت ۴-۲۱ می تواند بصورت معادله ۴-۲۴ نیز نوشته شود.

$$A(x, y) = \sum_{i=1}^3 \phi_i(x, y) A_i \quad (۲۴-۴)$$

در این رابطه توابع $\phi_i(x, y)$ ، "توابع قالب" خوانده می شوند و دارای رابطه ۴-۲۵ هستند.

$$\phi_i(x, y) = \frac{1}{D} (p_i + q_i x + r_i y) \quad (۲۵-۴)$$

¹ Shape function

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

چون مقدار تابع پتانسیل در گره ها باید با پتانسیل گره برابر باشد، روابط زیر را در مورد توابع قالب بسرعت قابل استدلال است.

$$\phi_i(x, y) = 1 \quad \text{if } x = x_i \text{ \& } y = y_i \quad (26-4)$$

$$\phi_i(x, y) = 0 \quad \text{o.w.}$$

زیرا برای مثال، $A_1 = 1A_1 + 0A_2 + 0A_3$. بعلاوه ϕ_1 بطور خطی از مقدار ۱ در گره ۱ تا مقدار ۰ در

گره های ۲ و ۳ تغییر می کند. [۳۹]

۴-۲- کاربرد روش باقیمانده وزن دار

اکنون باید با استفاده از تکنیکی بین پاسخ دقیق (V_e) و پاسخ بدست آمده از روش اجزای محدود (V)،

تفاوت گذارده شود. در اینجا بمنظور سادگی فرض می شود که معادله میدان به صورت $\nabla \epsilon \nabla V - \rho = 0$

است. نشان داده می شود که رابطه ۴-۸ برای سیستم های الکترومکانیکی نیز به این شکل قابل بیان

است. برای پاسخ دقیق رابطه ۴-۲۷ برقرار است.

$$\nabla \epsilon \nabla V_e - \rho = 0 \quad (27-4)$$

در حالیکه پاسخ بدست آمده از FEM یک تقریب است و با جواب دقیق اختلاف دارد. هنگامیکه این پاسخ

در معادله سیستم جایگذاری می شود، یک باقیمانده (R) تولید می شود.

$$\nabla \epsilon \nabla V_e - \rho = R \quad (28-4)$$

برای بنیان نهادن یک روش عددی لازم است که R با استفاده از عملیات ریاضی زیر صفر شود.

$$\int_{\Omega} w R d\Omega = 0 \quad (29-4)$$

که w یک تابع وزنی است و Ω ناحیه ای را که در آن این شرط اعمال می شود، توصیف می کند. با

جایگذاری رابطه ۴-۲۸ در رابطه ۴-۲۹، معادله انتگرالی ۴-۳۰ حاصل می شود.

$$\int_{\Omega} w [\nabla \epsilon \nabla V - \rho] d\Omega = 0 \quad (30-4)$$

از سوی دیگر، رابطه انتگرالی ۴-۳۱ برای متغیر اسکالر U و متغیر برداری A برقرار است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$\int_{\Omega} U \nabla \cdot A d\Omega = \int_{\Omega} \nabla U A d\Omega - \int_{\Omega} A \cdot \nabla U d\Omega = \oint_{s(\Omega)} U A \cdot ds - \int_{\Omega} A \cdot \nabla U d\Omega \quad (31-4)$$

در این رابطه $s(\Omega)$ سطحی است که ناحیه Ω را می بندد. با جایگذاری روابط $U = w, A = \varepsilon \nabla V$ در رابطه ۳۱-۴، رابطه ۳۲-۴ نتیجه می شود.

$$\int_{\Omega} w [\nabla \varepsilon \nabla V - \rho] d\Omega = \oint_{s(\Omega)} w \varepsilon \nabla V \cdot ds - \int_{\Omega} \varepsilon \nabla V \cdot \nabla w d\Omega + \int_{\Omega} w \rho d\Omega \quad (32-4)$$

حاصل این رابطه باید برابر صفر باشد. عبارت اول در سمت راست رابطه ۳۲-۴ مربوط به شرایط مرزی مسئله است و بزودی بحث خواهد شد. در اینجا تنها ذکر می شود که چون روش عددی صفر شدن مجموع انتگرال ها را روی ناحیه Ω تحمیل کرده است، انتگرال گیری روی $s(\Omega)$ نیز باید صفر باشد. معادله ۳۲-۴ عموماً "فرم ضعیف" معادله خوانده می شود. منشأ این اصطلاح از آنجاست که در معادله ۲۷-۴ مشتقات درجه ۲ وجود دارند در حالیکه در معادله ۳۲-۴ تنها مشتقات درجه اول وجود دارند که یک مرتبه ضعیف تر از مشتقات را نتیجه می دهد و در برخورد با تکنیک های عددی ساده تر است. در ادامه ارتباط بین گسسته سازی و مفهوم باقیمانده وزنی توضیح داده می شود.

اگر توابع وزنی w برابر توابع قالب ϕ_i انتخاب شوند (رابطه ۳۳-۴) رابطه ۳۲-۴ روی Ω برای یک ناحیه گسسته شده، آن را به رابطه ۳۲-۴ تبدیل می کند.

$$w = \phi_i(x, y) = [\phi_1(x, y) \quad \phi_2(x, y) \quad \phi_3(x, y)] \quad (33-4)$$

$$\sum_{i=1}^N \int_{\Omega} (\varepsilon \nabla V \cdot \nabla \phi_n - \rho \phi_n) d\Omega = 0 \quad (34-4)$$

که در رابطه ۳۴-۴، n معرف یک عنصر نوعی است و N تعداد کل عناصر در ناحیه مورد نظر است. در ادامه محاسبات برای یک عنصر آورده می شود.

$$\nabla V = \nabla \left(\phi_i(x, y) \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \right) = \nabla(\phi_i(x, y)) \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (35-4)$$

$$\nabla \phi_i(x, y) = \frac{1}{D} (q_i \hat{i} + r_i \hat{j}) \quad (36-4)$$

¹ Weak formulation

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

چون معادلات ۳۵-۴ و ۳۶-۴ ثابت هستند، عبارت اول در رابطه ۴-۳۴ را برای گره ۱ می توان بصورت رابطه ۴-۳۷ نوشت.

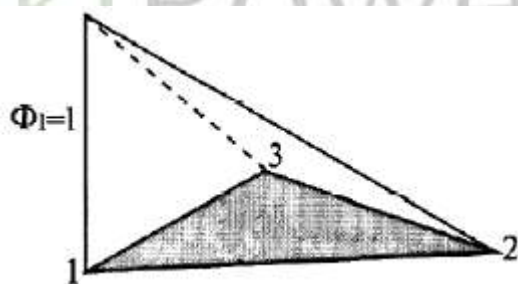
$$\frac{\epsilon}{D^2} (q_1 \hat{i} + r_1 \hat{j}) [(q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3) \hat{i} + (r_1 V_1 + r_2 V_2 + r_3 V_3) \hat{j}] \int_{S_n} ds \quad (37-4)$$

نتیجه انتگرال گیری روی S_n برابر مساحت المان n ام یعنی $D/2$ می باشد. با انجام انتگرال روی گره های ۲ و ۳ ماتریس سختی ۱ عنصر بدست می آید.

$$\frac{\epsilon}{2D} \begin{bmatrix} q_1 q_1 + r_1 r_1 & q_1 q_2 + r_1 r_2 & q_1 q_3 + r_1 r_3 \\ q_1 q_2 + r_1 r_2 & q_2 q_2 + r_2 r_2 & q_2 q_3 + r_2 r_3 \\ q_1 q_3 + r_1 r_3 & q_2 q_3 + r_2 r_3 & q_3 q_3 + r_3 r_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = S_n \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (38-4)$$

جایگذاری ماتریس سختی عناصر در ماتریس سختی سیستم مستلزم آنست که عبارت این ماتریس در سطرها و ستون های مربوط به شماره گره هادر مش بندی عمومی، قرار گیرند. اکنون ترم دوم رابطه ۴-

۳۲ محاسبه می شود. هر یک از توابع ϕ_i در گره برابر ۱ است و بصورت خطی تا صفر در $\int_{S_n} \rho \phi_n ds$ گره های دیگر آن المان کاهش می یابد. این مسئله برای ϕ_1 در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: تابع ϕ_1 برای یک المان مثلثی

محاسبه انتگرال مورد نظر در واقع محاسبه حجم هرم با ارتفاع ۱ است که در شکل بالا نشان داده شده است. نتیجه انتگرال گیری برابر خواهد بود با:

¹ Stiffness matrix

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$\int_{S_n} \rho \phi_n ds = \frac{1}{3} \rho \frac{D}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (39-4)$$

عبارت بدست آمده از نتیجه انتگرال گیری، " بردار منبع " نامیده می شود و باید در سمت راست معادله سیستم بعنوان کمیت های معلوم معادله جایگذاری شوند زیرا به پتانسیل های نامعلوم وابسته نیستند. اگر $\rho = 0$ باشد، میدان تنها در اثر شرایط دیریشله در مرزهای سیستم تولید می شود. [۳۹]

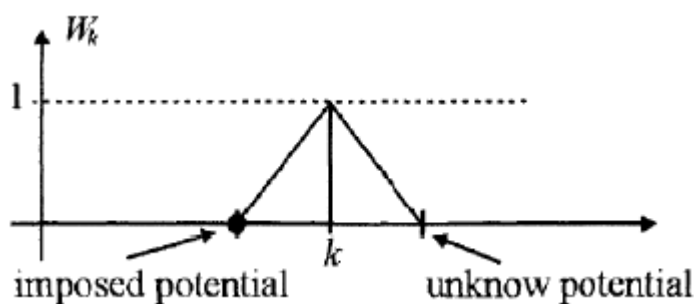
۴-۳-۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی در ارتباط با عبارت اول در سمت راست معادله ۴-۳۲ می باشد که در مسائل دو بعدی به صورت رابطه ۴-۴۰ است و مقدار آن برابر صفر می باشد.

$$\oint_{L(s)} w \varepsilon \nabla V \cdot dL = 0 \quad (40-4)$$

دو نوع شرایط مرزی وجود دارد که در اینجا لازم است به آنها پرداخته شود.

شرایط مرزی دیریشله: اگر در ساختار فیزیکی مسئله مورد نظر، پتانسیل ها روی بخش S_i از مرز معلوم باشند، به آنها شرایط مرزی دیریشله گفته می شود. هنگامیکه معادلات سیستم برای یافتن متغیر مجهول در گره های مش نوشته می شود، توابع وزنی w_k تنها برای گره هایی از مش که داخل ناحیه سیستم قرار دارند، نوشته می شود زیرا این توابع در گره های مرزی برابر صفر هستند.



شکل ۴-۳: الگوی شرایط مرزی دیریشله (مسئله 1 بعدی)

¹ Source vector

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

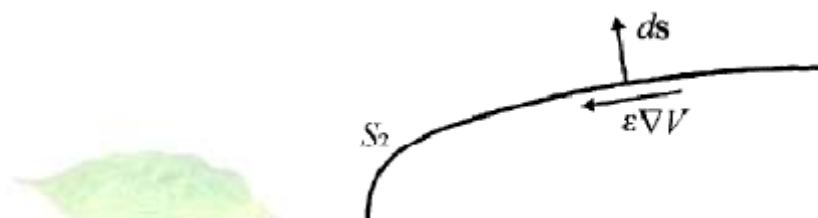
شرایط مرزی نیومان: در بعضی از موارد، روی بخشی از مرز $S_2 = L(S) - S_1$ در شکل ۴-۴،

مقادیر پتانسیل ها نامعلومند. برای این بخش از مرز، رابطه ۴-۳۲ باید نوشته شود و توابع وزنی در گره های مرزی صفر نیستند. بعلاوه چون حاصل انتگرال رابطه ۴-۴۰ صفر نیست، معادله ۴-۴۱ برای این بخش از مرز معتبر است.

$$\epsilon \nabla V \cdot ds = 0 \quad (4-41)$$

رابطه ۴-۴۱ یک حاصل ضرب نقطه ای است و از برابر صفر بودن آن می توان نتیجه گرفت که

$$E = -\nabla V \quad \text{باید مماس بر مرز } S_2 \text{ باشد که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. [۳۹]}$$



شکل ۴-۴: الگوی شرایط مرزی نیومان

۴-۴-۴- کاربرد های غیر خطی

عموماً نفوذپذیری مغناطیسی^۱ و هدایت الکتریکی^۲ ثابت فرض می شوند، اما نفوذپذیری مغناطیسی به شدت میدان مغناطیسی وابسته است. رفتار مواد فرومغناطیسی با منحنی $B(H)$ آنان مشخص می شود و نفوذپذیری ماده بستگی به مکان نقطه کار روی این منحنی دارد.

برای تشکیل ماتریس سختی سیستم، به مقادیر معلوم نفوذپذیری (μ) در هر عنصر نیاز است. اما چگونه می توان مقدار μ را قبل از حل سیستم بدست آورد؟ پاسخ این است که چون سیستم غیر خطی است، برای یافتن پاسخ لازم است تا یک روند تکرار شونده و بازگشتی بنیان گذارده شود.

¹ Magnetic permeability

² Electrical conductivity

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

روش تقریب های متوالی: این روش بسیار ساده است و می توان همان روند محاسباتی را که برای

سیستم های خطی طی می شد، به صورت تکراری در آن استفاده کرد. روند کلی این روش مطابق موارد

توضیحی زیر است:

۱. یک تقریب اولیه $\mathbf{A}=\mathbf{0}$ را برای تمامی گره ها در نظر بگیرید.
۲. با این تقریب برای \mathbf{A} ، میدان مغناطیسی \mathbf{B} را در تمامی عناصر محاسبه کنید.
۳. با استفاده از مقادیر \mathbf{B} در مرحله قبل، $V = \frac{1}{\mu}$ را از منحنی $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ برای مواد فرومغناطیسی موجود در ساختار بیابید.
۴. ماتریس سختی و بردار منبع را برای هر عنصر محاسبه کنید.
۵. ماتریس سختی و بردار منبع هر عنصر را با توجه به شماره گره های آن عنصر بترتیب در ماتریس سختی و بردار منبع سیستم جایگذاری نمایید.
۶. شرایط مرزی دیریشه را اعمال کنید.
۷. معادلات ماتریسی سیستم $([\mathbf{S}]^*[\mathbf{A}]=[\mathbf{Q}])$ را برای یافتن بردار پتانسیل های مغناطیسی گره های مش بندی حل کنید.
۸. بردار \mathbf{A} را با بردار \mathbf{A} مرحله قبل مقایسه کنید. اگر اختلاف آندو بیش از حد مجاز است به مرحله ۲ بروید.
۹. این روند را تکرار کنید تا خطا در محدوده مجاز قرار گرفته و معادلات همگرا شوند.

مراحل ۲ تا ۷ در واقع همان مراحل راه حل خطی هستند. واضح است که اگر نفوذپذیری ثابت باشد، جواب در یک مرحله همگرا می شود. اما اگر مواد بکار رفته خاصیت غیر خطی داشته باشند، پاسخ پس از چند مرحله تکرار همگرا می شود. عموماً این روش همگرا می شود اما در بعضی موارد، سرعت همگرایی پایین است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

روش نیوتن-رافسون: این روش در حقیقت توسعه روش نیوتن برای حل معادلات ماتریسی است. در مقایسه با روش تقریبات بازگشتی، پاسخ ها در این روش با سرعت بیشتری همگرا می شوند زیرا در آن جواب توسط توابع تانژانت یافت می شود تا اینکه توسط خطی سازی ساده منحنی $B(H)$ اساس این روش بر پایه بسط تیلور معادلات غیرخطی قرار دارد و در آن تنها از دو جمله اول این بسط استفاده شده است.

برای ماتریس P که تابعی از بردار X است، در مرحله n ام روش نیوتن-رافسون، سری تیلور قطع شده مربوط به سمت مجهولات معادله بشکل رابطه ۴-۴۲ است.

$$P|_{X(n)} + JP|_{X(n)} * (X_{(n+1)} - X_{(n)}) \quad (42-4)$$

که در این رابطه $JP|_{X(n)}$ ماتریس ژاکوبین به ازای مقادیر بردار X در مرحله قبل است. با داشتن بردار سمت راست معادله (معلومات)، معادله حل شده و جواب ها در هر مرحله بسمت پاسخ های نهایی همگرا می شوند. در [۴۰] اثبات می شود که عناصر ماتریس ژاکوبین ماتریس سختی S از رابطه ۴-۴۳ بدست می آید.

$$JS(i, j) = S(i, j) + \frac{4}{D\mu^2} \left(\frac{\partial \mu}{\partial B^2} \right) (\sum_{l=1}^3 S(i, l) A_l) (\sum_{l=1}^3 S(j, l) A_l) \quad (43-4)$$

در این رابطه مقدار $\frac{\partial \mu}{\partial B^2}$ از منحنی $B(H)$ ماده فرومغناطیسی محاسبه می شود [۴۰]

۴-۵- پیاده سازی روش اجزای محدود در مدلسازی BDFM

ساختار یک ماشین الکتریکی و بطور ویژه ماشین دوتحریکه بدون جاروبک که در این رساله مد نظر است را جهت انجام تحلیل اجزای محدود می توان به چهار حوزه مختلف تقسیم بندی کرد که معادلات میدان در عناصر مربوط به هر حوزه، مشابه است. این حوزه ها بصورت زیر دسته بندی می شوند:

الف) هسته استاتور و هسته روتور که تشکیل دهنده حوزه شماره ۱ هستند.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

ب) فاصله هوایی و نواحی داخل شیارهای استاتور و روتور به غیر از نواحی پر شده توسط هادی ها حوزه

شماره ۲

پ) هادی های روتور که در دسته هایی به نام *nest* حول محیط روتور قرار گرفته اند و حوزه شماره ۳ را

تشکیل می دهند.

ت) هادی های سیم پیچ های استاتور که در مورد ماشین دوتحریکه بدون جاروبک در هر شیار، هادی

های مربوط به هر دو سیم پیچ توان و کنترل حضور دارند. این هادی ها حوزه ۴ را ایجاد می کنند.

اجرای روش اجزای محدود در حوزه شماره ۱: در نواحی این حوزه، توابع تحریک مستقل

بصورت منابع ولتاژ یا جریان وجود ندارند. پس با توجه به رابطه ۴-۸، معادله میدانی که باید در عناصر حل

شود، مطابق رابطه ۴-۴۴ خواهد بود.

$$\text{curl}(v \text{curl} A) + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4-44)$$

با فرض دو بعدی بودن ساختار و اینکه پتانسیل برداری تنها مؤلفه در جهت محور Z دارد و سپس اعمال

قانون دیورژانس، رابطه ۴-۴۴ به معادله ۴-۴۵ تبدیل می شود.

$$\nabla(v \nabla \cdot \vec{A}) - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0 \quad (4-45)$$

پس از اعمال روش گالرکین و روش گسسته سازی مشتقات اولر، معادله انتگرالی ۴-۴۶ تا ۴-۴۹ برای

نواحی قرار گرفته در حوزه ۱ حاصل می شود.

$$\int_{s_i} \phi^T \nabla(v \nabla \cdot \vec{A}) ds = \int_{s_i} \nabla(\phi^T v \nabla \cdot \vec{A}) d\Omega - \int_{s_i} \nabla \phi^T v \nabla \cdot \vec{A} d\Omega \quad (4-46)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$\int_{s_i} \phi^T \nabla(v \nabla \cdot \bar{A}) d\Omega = \oint_{L(s_i)} \phi^T v \nabla \cdot \bar{A} d\Omega - \int_{s_i} \nabla \phi^T v \nabla \cdot \bar{A} d\Omega = \quad (47-4)$$

$$\int_{s_i} \nabla \phi^T v \nabla \cdot \bar{A} d\Omega = \frac{v}{2D} \begin{bmatrix} q_1 q_1 + r_1 r_1 & q_1 q_2 + r_1 r_2 & q_1 q_3 + r_1 r_3 \\ q_1 q_2 + r_1 r_2 & q_2 q_2 + r_2 r_2 & q_2 q_3 + r_2 r_3 \\ q_1 q_3 + r_1 r_3 & q_2 q_3 + r_2 r_3 & q_3 q_3 + r_3 r_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{(t+\Delta t)} = [S_{z1}] * [A]^{(t+\Delta t)}$$

$$\frac{\sigma}{\Delta t} \int_{s_i} \phi^T A^{(t+\Delta t)} ds = \frac{\sigma}{\Delta t} \int_{s_i} \phi^T \phi ds \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{(t+\Delta t)} = \frac{\sigma D}{12 \Delta t} \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{(t+\Delta t)} = [Q_{z1}] * [A]^{(t+\Delta t)} \quad (48-4)$$

$$\frac{\sigma}{\Delta t} \int_{s_i} \phi^T A^{(t)} ds = \frac{\sigma}{\Delta t} \int_{s_i} \phi^T \phi ds \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{(t)} = \frac{\sigma D}{12 \Delta t} \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}^{(t)} = [Q_{z1}] * [A]^{(t)} \quad (49-4)$$

بنابراین معادله ماتریسی ۴-۵۰ برای عناصر قرار گرفته در این حوزه برقرار است.

$$(S_{z1} + Q_{z1}) * A^{(t+\Delta t)} = Q_{z1} * A^{(t)} \quad (50-4)$$

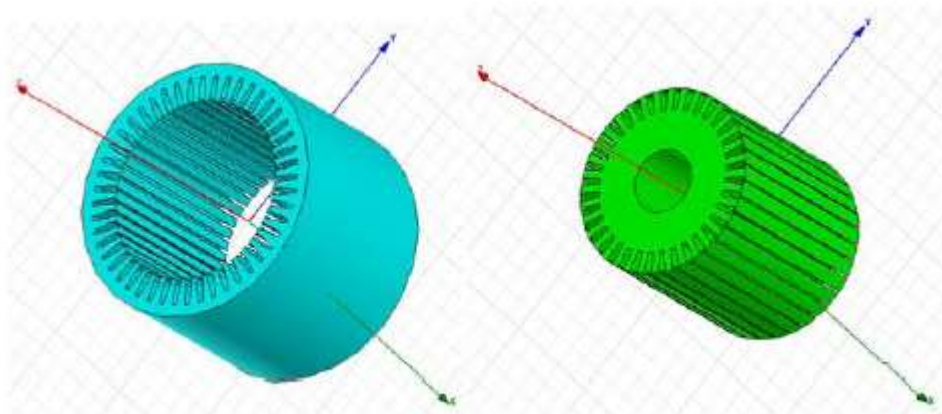
اما برای عناصر این حوزه باید خواص غیر خطی آهن استاتور و روتور را در نظر گرفت و از روش های بازگشتی برای محاسبه پتانسیل های مغناطیسی گره ها استفاده نمود. در محاسبات انجام شده از این روش استفاده شده که ابتدا در $t=0$ ، روش تقریبات بازگشتی در ۵ مرحله انجام شده و نتیجه بدست آمده بعنوان حدس اولیه برای مقادیر پتانسیل های برداری در این زمان قرار داده شده است و برای پله های زمانی بعدی، مقادیر جواب در پله زمانی قبلی بعنوان حدس اولیه روش نیوتن-رافسون مورد استفاده قرار گرفته است.

بر این اساس معادله بازگشتی روش نیوتن-رافسون که باید در نواحی این حوزه حل شود، مطابق رابطه

۴-۵۱ تشکیل می شود.

$$(JS_{z1} + Q_{z1}) \left(A_{(n+1)}^{(t+\Delta t)} - A_{(n)}^{(t+\Delta t)} \right) = Q_{z1} A^{(t)} - (S_{z1} + Q_{z1}) A_{(n)}^{(t)}, \quad A_{(n=0)}^{(t+\Delta t)} = A^{(t)} \quad (51-4)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۴-۵: ساختار استاتور و روتور ماشین مورد استفاده در شبیه سازی بترتیب با 48 و 36 شیار

اجرای روش اجزای محدود در حوزه شماره ۲: تفاوت معادله میدانی عناصر این حوزه با

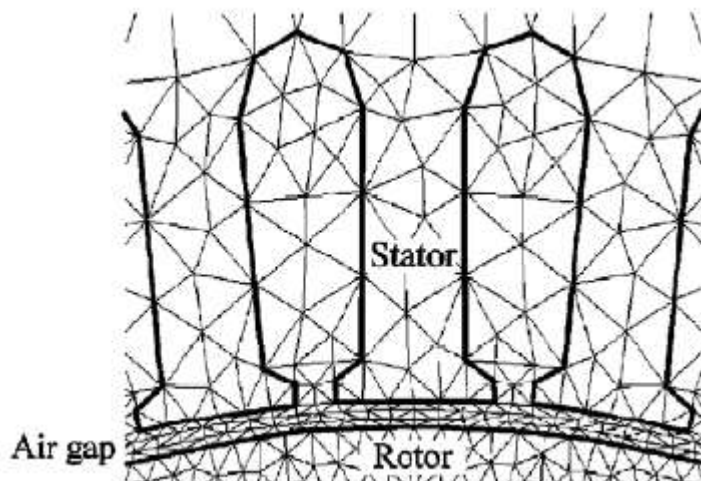
حوزه قبل آنست که نواحی مربوط به این حوزه خطی هستند و نفوذپذیری مغناطیسی آنها ثابت و برابر نفوذپذیری هوا فرض می شود. بعلاوه هدایت الکتریکی در نواحی حوزه 2 صفر است و بنابراین عبارت مربوط به جریان القایی در روابط میدانی آنان وجود ندارد. پس صورت ماتریسی معادلاتی که برای عناصر قرار گرفته در این حوزه باید حل شوند، بصورت رابطه ۴-۵۲ است.

$$S_{z2} * A(t+\Delta t) = 0 \quad (۴-۵۲)$$

که در رابطه بالا ماتریس سختی همانند ماتریس سختی عناصر حوزه ۱ تشکیل می شود.

اما نکته مهم درباره این حوزه، قرار گرفتن لایه مش بندی متحرک در آن است که برای در نظر گرفتن چرخش تعبیه شده است. برای لحاظ نمودن چرخش باید دو سیستم مرجع انتخاب شود، اولی در ارتباط با سیستم ثابت است و دیگری مربوط به قسمت متحرک می باشد. فاصله هوایی یک مکان مناسب برای در نظر گرفتن حرکت نسبی است چون دارای خاصیت فرومغناطیسی نیست و هدایت الکتریکی ندارد و هیچ منبعی نیز در آنجا موجود نیست. شکل ۴-۶ قسمتی از مش بندی را بویژه در فاصله هوایی نشان می دهد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

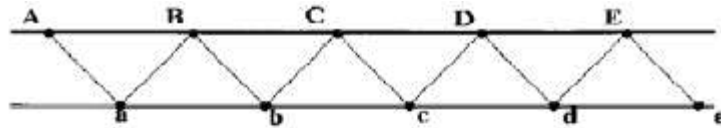


شکل ۴-۶: قسمتی از مش بندی اطراف فاصله هوایی با المان های مثلثی [۴۰]

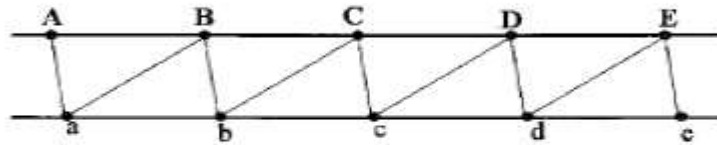
اعمال روش لایه متحرک شامل شکستن فاصله هوایی به سه ناحیه می باشد که ناحیه قرار گرفته در وسط همان لایه متحرک است. برای کمینه کردن تغییر شکل عناصر با وجود چرخش قسمت هایی از ساختار، تنها عناصر لایه متحرک در هر پله زمانی دوباره مش بندی می شوند و گره ها در المان های سایر نواحی متحرک تنها به اندازه زاویه چرخش در پله قبلی و بدون تغییر جابجا می شوند. چگونگی مش بندی دوباره با چرخش روتور در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. فرض شده است که روتور در خلاف جهت عقربه های ساعت می چرخد. هنگامیکه جابجایی کوچک است، عناصر باند متحرک به همان میزان در جهت چرخش جابجا می شوند (شکل ۴-۷ ب). اما هنگامیکه جابجایی بزرگتر از اندازه عنصر باشد، عناصر باند متحرک مطابق شکل ۴-۷ پ) دوباره مش بندی می شوند. با این روش می توان عملکرد ماشین را در

هر سرعتی و بدون ایجاد تغییرات زیادی در مش بندی اولیه تحلیل کرد [۴۲و۴۱و۳۹]

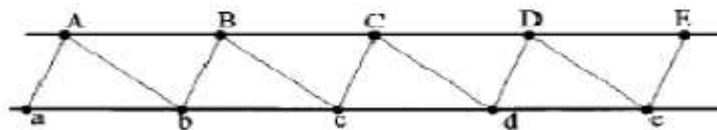
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



(الف) مش بندی اولیه



(ب) تغییر مش بندی در اثر جابجایی کوچک

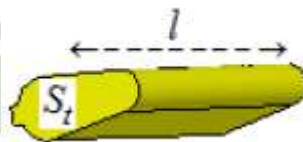


(ب) تغییر مش بندی در اثر جابجایی بزرگ

شکل ۴-۷: مش بندی دوباره لایه متحرک با چرخش روتور

اجرای روش اجزای محدود در حوزه شماره ۳: هادی های روتور عناصر موجود در این حوزه

را تشکیل می دهند. شکل ۴-۸ یکی از میله های روتور را با سطح مقطع S_t و طول l نشان می دهد.



شکل ۴-۸: یک هادی روتور

برای این هادی رابطه $\nabla \cdot J = 0$ برقرار است و تنها در جهت Z مولفه دارد. پس:

$$\nabla \cdot \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \hat{k} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0 \quad (۵۳-۴)$$

بر اساس رابطه ۴-۵۳ می توان پتانسیل الکتریکی را توسط رابطه ۴-۵۴ بیان کرد.

$$V = V_1 z + V_0 \quad (۵۴-۴)$$

ولتاژ U_t دو سر هادی از رابطه ۴-۵۵ بدست می آید.

$$U_t = \int_0^l -\nabla V \cdot dl = -V_1 l \quad (۵۵-۴)$$

جریان عبوری از هادی ها با انتگرال گیری از چگالی جریان روی سطح مقطع S_t بدست می آید.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$I_t = \int_{s_t} J \cdot ds = - \int_{s_t} \sigma \frac{\partial A}{\partial t} ds + \int_s \sigma \frac{U_t}{l} ds \quad (۵۶-۴)$$

مقاومت dc هادی با رابطه ۵۶-۴ تعریف می شود.

$$R_t = \frac{l}{\sigma s_t} \quad (۵۷-۴)$$

با این تعریف، معادله ۵۶-۴ را می توان به شکل رابطه ۵۸-۴

$$I_t = \frac{U_t}{R_t} - \int_{s_t} \sigma \frac{\partial A}{\partial t} ds \quad (۵۸-۴)$$

در نهایت برای هادی های روتور می توان معادله کمکی ارتباط بین کمیت های الکتریکی و مغناطیسی

را بصورت رابطه ۵۹-۴ بیان کرد.

$$U_t = R_t I_t + R_t \int \sigma \frac{\partial A}{\partial t} ds \quad (۵۹-۴)$$

گسسته سازی این رابطه، معادله ماتریسی ۶۰-۴ را نتیجه می دهد که ماتریس ها و بردارهای آن در

روابط ۶۱-۴ تا ۶۳-۴ تعریف شده اند.

$$Q'_{z2} * A^{(t+\Delta t)} + R' * I_t^{(t+\Delta t)} = U_t^{(t+\Delta t)} + Q'_{z2} * A^{(t)} \quad (۶۰-۴)$$

$$Q'_{z2} = \frac{R_t \sigma D}{6} [1 \ 1 \ 1] \quad (۶۱-۴)$$

$$R' = [R_{to} \ R_{tm} \ R_{ti}] \quad (۶۲-۴)$$

$$I_t = [I_{to} \ I_{tm} \ I_{ti}]^T \quad (۶۳-۴)$$

از این رابطه استنباط می شود که افت ولتاژ روی یک هادی روتور ناشی از افت ولتاژ روی مقاومت dc آن

در اثر عبور جریان خود هادی و جریان های گردابی القایی است.

معادله میدانی که باید در عنصر متعلق به ناحیه هادی های روتور حل شود در رابطه ۶۴-۴ داده شده

است.

$$\text{curl}(v \text{curl} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V = 0 \quad (۶۴-۴)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

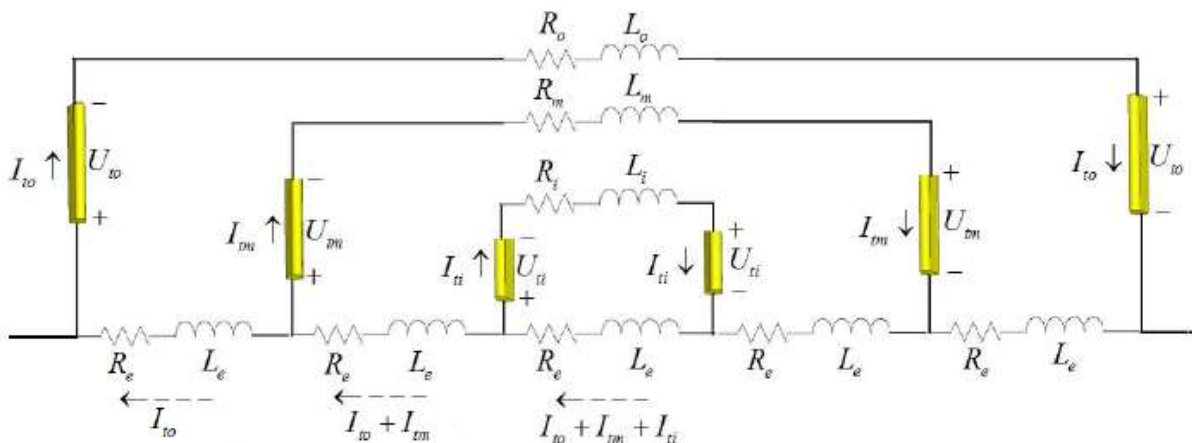
با اعمال روش گالرکین جهت گسسته سازی معادله و روش اولر به منظور گسسته سازی عبارات شامل مشتق، معادله ماتریسی ۴-۶۵ برای عناصر واقع در حوزه ۲ تقسیم بندی بدست می آید.

$$(S_{z2} + Q_{z2}) * A^{(t+\Delta t)} - P' * U_t^{(t+\Delta t)} = Q_{z2} * A^{(t)} \quad (۶۵-۴)$$

ماتریس های S_{z2} و Q_{z2} در رابطه بترتیب همانند S_{z1} و Q_{z1} محاسبه می شوند. نحوه محاسبه و رابطه بردار P' نیز در رابطه ۴-۶۶ آمده است.

$$P' = \int_{s_1} \frac{\sigma}{l} \phi^T ds = \frac{\sigma D}{6l} [1 \quad 1 \quad 1]^T \quad (۶۶-۴)$$

اما برای حل معادله میدان در عناصر این حوزه، با توجه به مجهول بودن I_t و U_t ، A نیاز به سه معادله بر حسب این مجهولات است. تا کنون دو معادله در روابط ۴-۶۰ و ۴-۶۵ ذکر گردید. معادله سوم از رابطه بین ولتاژها و جریان های هادی های روتور بر اساس ساختار خاص آن بدست می آید. شکل ۴-۹ نحوه اتصال هادی های روتور را برای یک *nest* نشان می دهد. مقاومت ها و اندوکتانس های نشان داده شده در شکل برای در نظر گرفتن بعد سوم هندسه ساختار لحاظ شده اند.



شکل ۴-۹: ساختار هادی های یک *nest* روتور به همراه ولتاژها و جریان ها در بخش های مختلف آن

با نوشتن روابط مداری برای ساختار شکل ۴-۹ و دسته بندی متغیرهای معادلات، معادله ماتریسی ۴-

۶۷ بدست می آید.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$(R_r + C_1)I_t^{(t+\Delta t)} + C_2U_t^{(t+\Delta t)} = C_1I_t^{(t)} \quad (۶۷-۴)$$

عبارات ماترسی این رابطه در روابط ۴-۶۸ تا ۴-۷۲ تعریف شده اند.

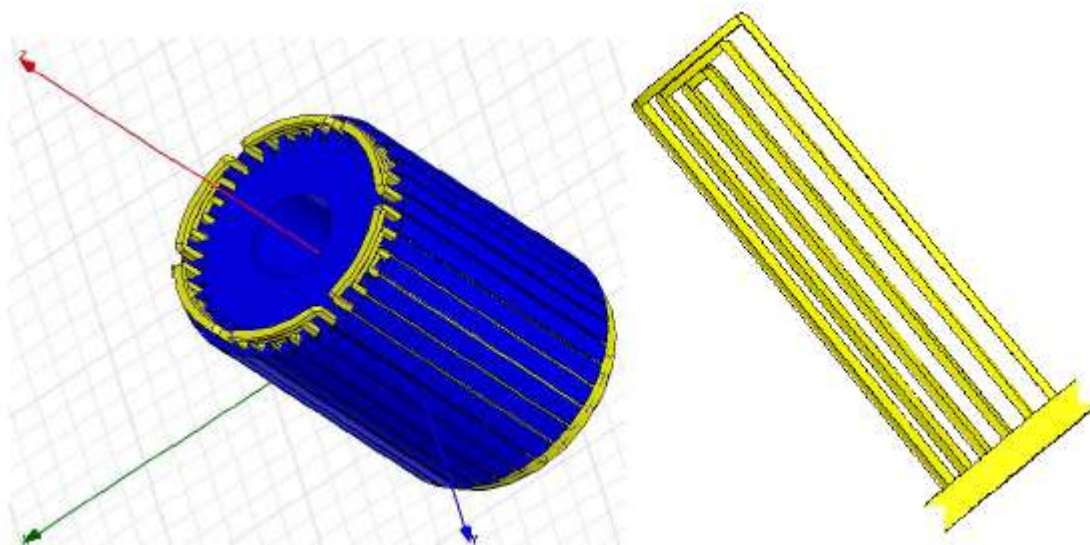
$$R_r = \begin{bmatrix} R_o + 2R_e & R_m & 0 \\ 2R_e & R_m + 2R_e & R_i \\ R_e & R_e & R_i + R_e \end{bmatrix} \quad (۶۸-۴)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} \frac{L_o+2L_e}{\Delta t} & \frac{L_m}{\Delta t} & 0 \\ \frac{2L_e}{\Delta t} & \frac{L_m+2L_e}{\Delta t} & \frac{L_i}{\Delta t} \\ \frac{L_e}{\Delta t} & \frac{L_e}{\Delta t} & \frac{L_i+L_e}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (۶۹-۴)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 \\ 0 & 2 & -2 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (۷۰-۴)$$

$$I_t = [I_{to} \quad I_{tm} \quad I_{ti}]^T \quad (۷۱-۴)$$

$$U_t = [U_{to} \quad U_{tm} \quad U_{ti}]^T \quad (۷۲-۴)$$



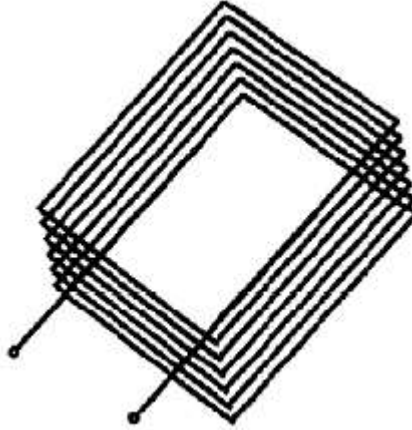
شکل ۴-۱۰: ساختار هادی های روتور و نحوه قرار گرفتن آنها در شیارهای روتور ماشین مورد استفاده برای شبیه سازی

اجرای روش اجزای محدود در حوزه ۴: این حوزه نواحی مربوط به سیم پیچ های استاتور را

شامل می شود. شکل ۴-۱۱ یک کوئل ساخته شده از N_{co} دور از هادی های نازک با سطح مقطع s را

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

نشان می دهد. در این نوع هادی ها، چگالی جریان در سطح مقطع یکنواخت فرض می شود. معادله میدان در نواحی کویل ها برای مدل دو بعدی بصورت رابطه ۴-۷۳ خواهد بود.



شکل ۴-۱۱: یک کویل در سیم پیچی استاتور که از تعدادی دور تشکیل شده [۳۹]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{I_f}{s} + \frac{1}{s} \int_s \sigma \frac{\partial A}{\partial t} ds = 0 \quad (۷۳-۴)$$

چون چگالی جریان القایی $\left(\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \right)$ روی سطح مقطع s ثابت است، پس می توان نوشت:

$$\frac{1}{s} \int_s \sigma \frac{\partial A}{\partial t} ds = \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (۷۴-۴)$$

با جایگذاری رابطه ۴-۷۴ در رابطه ۴-۷۳ عبارات مشابه حذف شده و این رابطه به رابطه ۴-۷۵ تبدیل

می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{I_f}{s} = 0 \quad (۷۵-۴)$$

سطح مقطع کلی کویل بصورت $S_f = N_{co} s$ است، بنابراین رابطه میدانی برای نواحی مربوط به سیم

پیچ ها با استفاده از سطح مقطع کویل به صورت معادله ۴-۷۶ در می آید.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{N_{co}}{S_f} I_f = 0 \quad (۷۶-۴)$$

ولتاژ U_f در دو سر ترمینال های کویل، با رابطه ۴-۷۷ به جریان عبوری از آن وابسته است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$U_f = R_f I_f + R_f N_{co} \int_{S_f} \sigma \frac{\partial A}{\partial t} ds \quad (77-4)$$

که در این رابطه R_f مقاومت کوپل است و دارای رابطه ۷۸-۴ می باشد.

$$R_f = N_{co} \frac{l}{\sigma s} \quad (78-4)$$

عبارت اول در رابطه ۷۷-۴ مربوط به افت ولتاژ روی مقاومت R_f در اثر جریان کوپل و عبارت دوم نیز افت ولتاژ ناشی از جریان القایی در کوپل را نشان می دهد. با اعمال روش گالرکین به معادلات ۷۴-۴ و ۷۷-۴، معادلات ماتریسی گسسته برای عناصر حوزه ۴ بصورت دو رابطه ۷۹-۴ و ۸۰-۴ حاصل می شود.

$$S_{z4} * A^{(t+\Delta t)} - P I_f^{(t+\Delta t)} = 0 \quad (79-4)$$

$$Q_{z4} A^{(t+\Delta t)} + \left(R_f + \frac{L_f}{\Delta t} \right) I_f^{(t+\Delta t)} = U_f^{(t+\Delta t)} + Q_{z4} A^{(t)} + \frac{L_f}{\Delta t} I_f^{(t)} \quad (80-4)$$

ماتریس S_{z4} همانند ماتریس سختی عناصر حوزه های دیگر تعریف می شود. سایر ماتریس ها در روابط ۸۱-۴ و ۸۲-۴ تعریف شده اند.

$$P = \int_s \frac{N_{co}}{S_f} \phi^T ds = \frac{N_{co} D}{6 S_f} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (81-4)$$

$$Q_{z4} = \int_s \frac{N_{co} l}{S_f} \phi ds = \frac{N_{co} l D}{6 S_f} [1 \quad 1 \quad 1] \quad (82-4)$$

اما در ساختاری که تحلیل خواهد شد، سیم پیچ های استاتور دارای اتصال ستاره زمین نشده هستند. این ویژگی سبب می شود که جریان یکی از فازها را بتوان براساس جریان دو فاز دیگر نوشت. برای جلوگیری از تعریف متغیر اضافی و افزایش حجم معادلات ماتریس F جهت ارتباط بین بردار جریان های فازی و بردار جریان های فازی مستقل، بصورت رابطه ۸۳-۴ تعریف می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$I_f = \begin{bmatrix} I_{pA} \\ I_{pB} \\ I_{pC} \\ I_{cA} \\ I_{cB} \\ I_{cC} \end{bmatrix} = FI_f^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{pA} \\ I_{pB} \\ I_{cA} \\ I_{cB} \end{bmatrix} \quad (۸۳-۴)$$

با تعریف بردار جریان های مستقل، روابط ۷۹-۴ و ۸۰-۴ بترتیب به شکل رابطه ۸۴-۴ و ۸۵-۴ اصلاح می شوند.

$$S_{z4} * A^{(t+\Delta t)} - PFI_f^{*(t+\Delta t)} = 0 \quad (۸۴-۴)$$

$$Q_{z4}A^{(t+\Delta t)} + \left(R_f + \frac{L_f}{\Delta t}\right)FI_f^{*(t+\Delta t)} = U_f^{(t+\Delta t)} + Q_{z4}A^{(t)} + \frac{L_f}{\Delta t}FI_f^{*(t)} \quad (۸۵-۴)$$

محاسبه گشتاور، سرعت زاویه ای و جابجایی: با استفاده از معادلات ماتریسی ذکر شده در

بخش های پیشین، در هر پله زمانی معادلات سیستم بطور کامل بر اساس مقادیر جدید برای پارامترها تنظیم و تشکیل می شود و سپس معادلات حل شده و از مقادیر پتانسیل های مغناطیسی بدست آمده برای گره ها گشتاور الکترومغناطیسی لحظه ای از روش تانسور تنش ماکسول محاسبه می شود. تانسور تنش ماکسول به معنی نیرو در امتداد خطی واقع در فاصله هوایی است. گشتاور الکترومکانیکی از رابطه ۸۶-۴ و سرعت زاویه ای جدید و جابجایی روتور نیز بترتیب مطابق روابط ۸۷-۴ و ۸۸-۴ بدست می آیند [۴۳]

$$T_e = W \sum_i \{ \vec{r}_i * \left[\frac{1}{\mu_0} (\vec{B}_i \cdot \hat{r}) \vec{B}_i - \frac{1}{2\mu_0} B_i^2 \hat{r} \right] \} r_i \Delta \varphi_i \quad (۸۶-۴)$$

$$\omega_r^{(t+\Delta t)} = \omega_r^{(t)} + \frac{T_e - T_l - \Gamma \omega_r^{(t)}}{J} \Delta t \quad (۸۷-۴)$$

$$\theta^{(t+\Delta t)} = \theta^{(t)} + \omega_r^{(t+\Delta t)} \Delta t \quad (۸۸-۴)$$

بردارهای \vec{B}_i ، \vec{r}_i و \hat{r} در رابطه ۸۶-۴ بترتیب با روابط ۸۹-۴، ۹۰-۴ و ۹۱-۴ محاسبه می شوند.

$$\vec{r}_i = x_i \hat{i} + y_i \hat{j} \quad (۸۹-۴)$$

$$\vec{B}_i = B_{ix} \hat{i} + B_{iy} \hat{j} = \frac{A_i - A_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \hat{i} - \frac{A_i - A_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \hat{j} \quad (۹۰-۴)$$

$$\hat{r} = \hat{i} \cos \varphi_i + \hat{j} \sin \varphi_i, \quad \varphi_i = \tan^{-1} \frac{y_i}{x_i} \quad (۹۱-۴)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

با جایگذاری روابط بالا و ساده کردن عبارت رابطه ۴-۸۶ ، رابطه ۴-۹۲ برای محاسبه گشتاور الکترومکانیکی حاصل می شود. متغیرهای a_i و b_i در این رابطه بترتیب در روابط ۴-۹۳ و ۴-۹۴ تعریف شده اند

$$T_e = W \sum_i (x_i b_i - y_i a_i) \sqrt{(x_i^2 + y_i^2)} (\varphi_i - \varphi_{i-1}) \quad (۹۲-۴)$$

$$a_i = \frac{1}{\mu_0} B_{ix} (B_{ix} \cos \varphi_i + B_{iy} \sin \varphi_i) - \frac{1}{2\mu_0} \cos \varphi_i \sqrt{B_{ix}^2 + B_{iy}^2} \quad (۹۳-۴)$$

$$b_i = \frac{1}{\mu_0} B_{iy} (B_{ix} \cos \varphi_i + B_{iy} \sin \varphi_i) - \frac{1}{2\mu_0} \sin \varphi_i \sqrt{B_{ix}^2 + B_{iy}^2} \quad (۹۴-۴)$$

تفاوت مدلسازی اجزای محدود با و بدون وجود خطاهای استاتور: در شرایط متعادل و

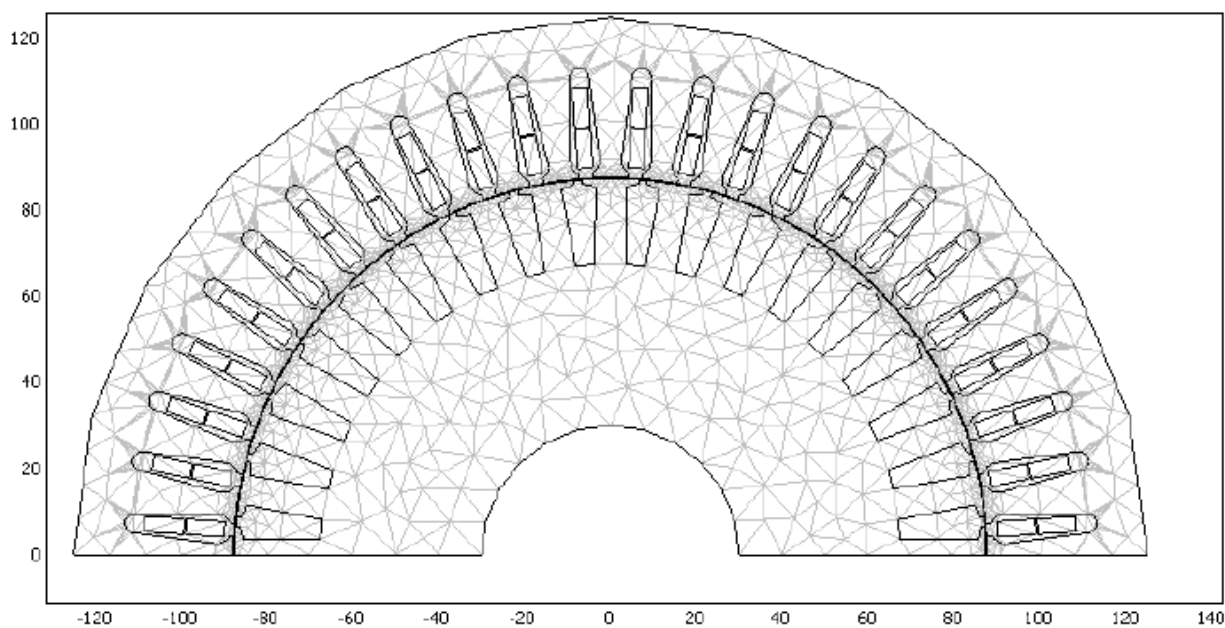
بدون خطا می توان با استفاده از تقارن های موجود در ساختار ماشین، ناحیه مورد بررسی را تقلیل داد. بطور مثال ناحیه مورد بررسی برای ماشینی که از آن در شبیه سازی ها استفاده گردیده است، باندازه یک زیرناحیه ۱۸۰ درجه ای از ناحیه کلی است. اما در صورت وقوع خطاهای استاتور، دیگر هیچگونه تقارنی در توزیع شکل موج های ماشین وجود ندارد و باید کل ناحیه مش بندی و تحلیل گردد. این امر موجب افزایش ابعاد ماتریس ها و حجم معادلات می گردد و زمان لازم جهت تحلیل ساختار را افزایش می دهد.

تفاوت دوم، در استخراج معادلات عناصر واقع در ناحیه سیم پیچ های استاتور (حوزه شماره ۴) می باشد. در مدلسازی با وجود خطا، تقارن سیم پیچ ها از بین رفته است و دیگر افت ولتاژ روی هر کوئل مشخص نیست. بنابراین ولتاژ کوئل ها نیز تبدیل به متغیر می گردند. پس علاوه بر روابط ۴-۷۹ و ۴-۸۰ رابطه دیگری برای حل سیستم معادلات لازم است. این رابطه از برابر قرار دادن مجموع ولتاژهای حلقه ها در دیگرام مداری سیم پیچ با ولتاژ حلقه که معلوم است، حاصل می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی‌پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۶-۴- نتایج شبیه سازی

ناحیه دوبعدی برای شبیه سازی ماشین در حالت بدون خطا براساس تعداد قطب های دو سیم پیچ استاتور و روتور برای تکرار نتایج، باندازه نیمی از دامنه کلی است. سطح مقطع دو بعدی ماشین در نرم افزار *Autocad* رسم گردیده و سپس در نرم افزار *FEMLAB* وارد^۱ شده است. این نرم افزار قادر است ناحیه را در قالب عناصر مثلثی مش بندی کرده و مختصات گره های مش، شماره نقاط هر عنصر و شماره ناحیه ای را که هر عنصر به آن تعلق دارد بصورت یک فایل *txt* به خروجی بدهد. ازاطلاعات خروجی مستقیماً بعنوان ورودی کد نوشته شده در نرم افزار *MATLAB* استفاده شده است. شکل ۴-۱۲ مش بندی ناحیه مورد بررسی جهت شبیه سازی حالت بدون خطا را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۲: مش بندی ناحیه مورد بررسی در وضعیت بدون خطا

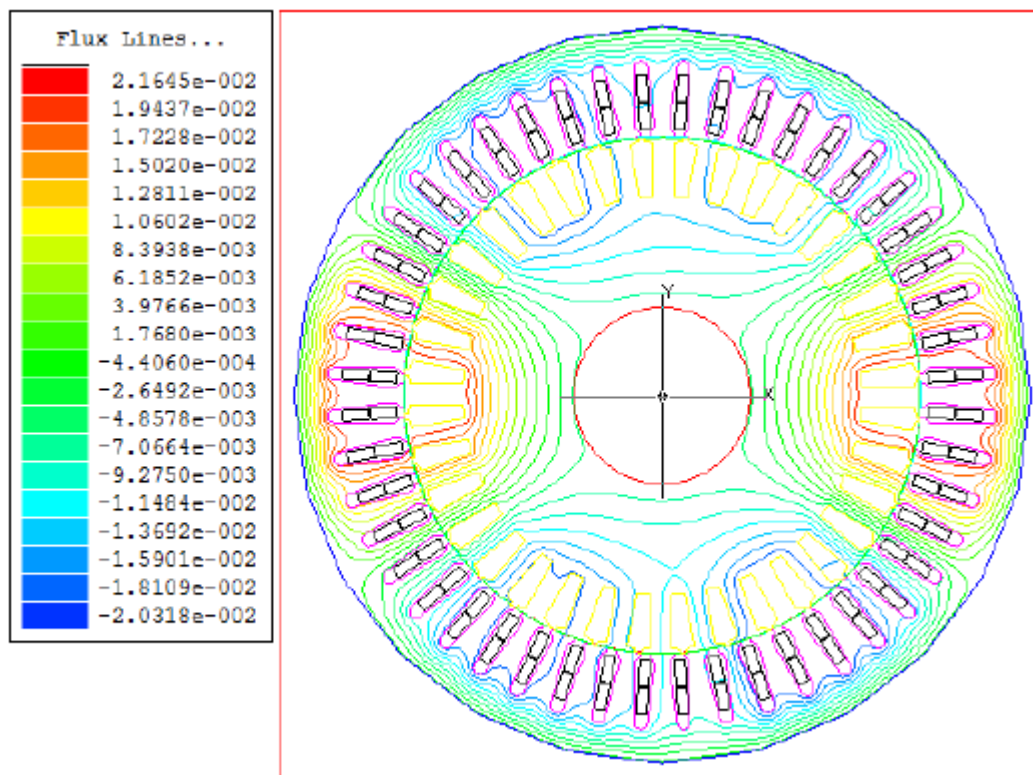
این مش بندی شامل ۳۳۵۴ گره و ۶۶۱۲ عنصر می باشد. زمان کلی شبیه سازی شده برابر ۲/۵ ثانیه در پله هایی به اندازه $5 * 10^{-4}$ ثانیه انتخاب شده است. شکل های ۴-۱۳ تا ۴-۱۵ ترتیب توزیع های شار مغناطیسی را ناشی از استاتور، روتور و هردو آنها در سطح مقطع ماشین و برای چرخش ماشین در حالت

¹ Import

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

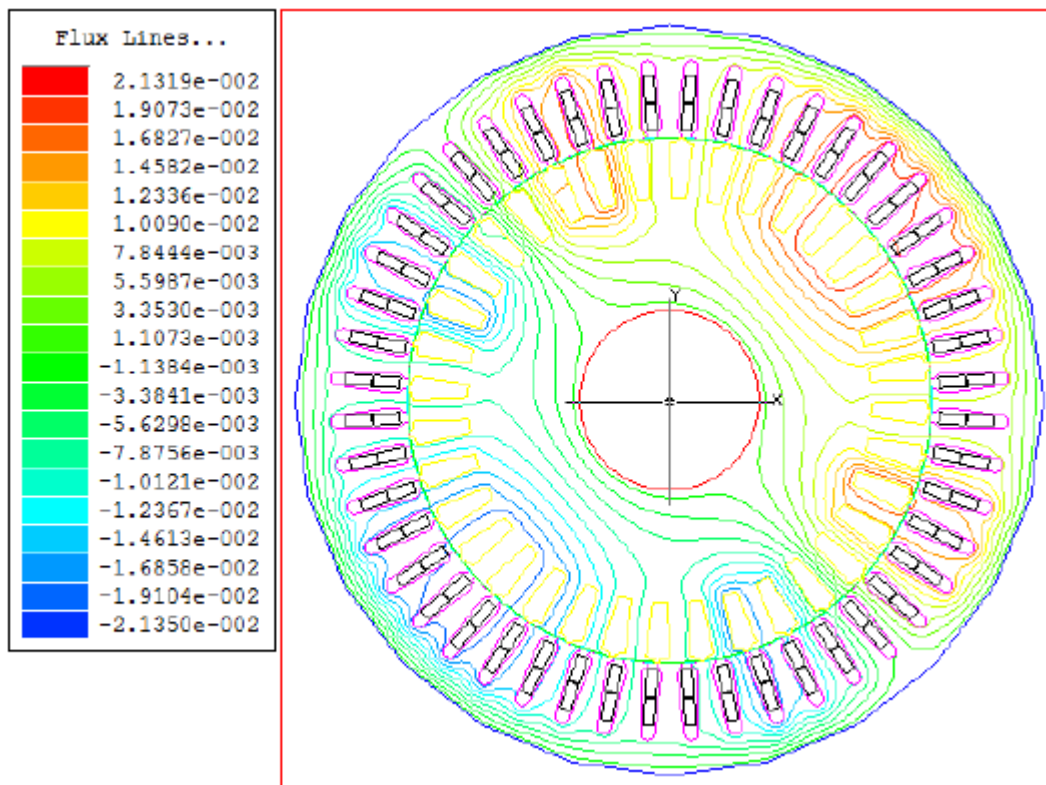
پایدار با سرعت 800 rpm نشان می دهند. همانطور که مشاهده می گردد شار تولیدی استاتور و روتور و

شار کلی ماشین کاملاً متقارن است.

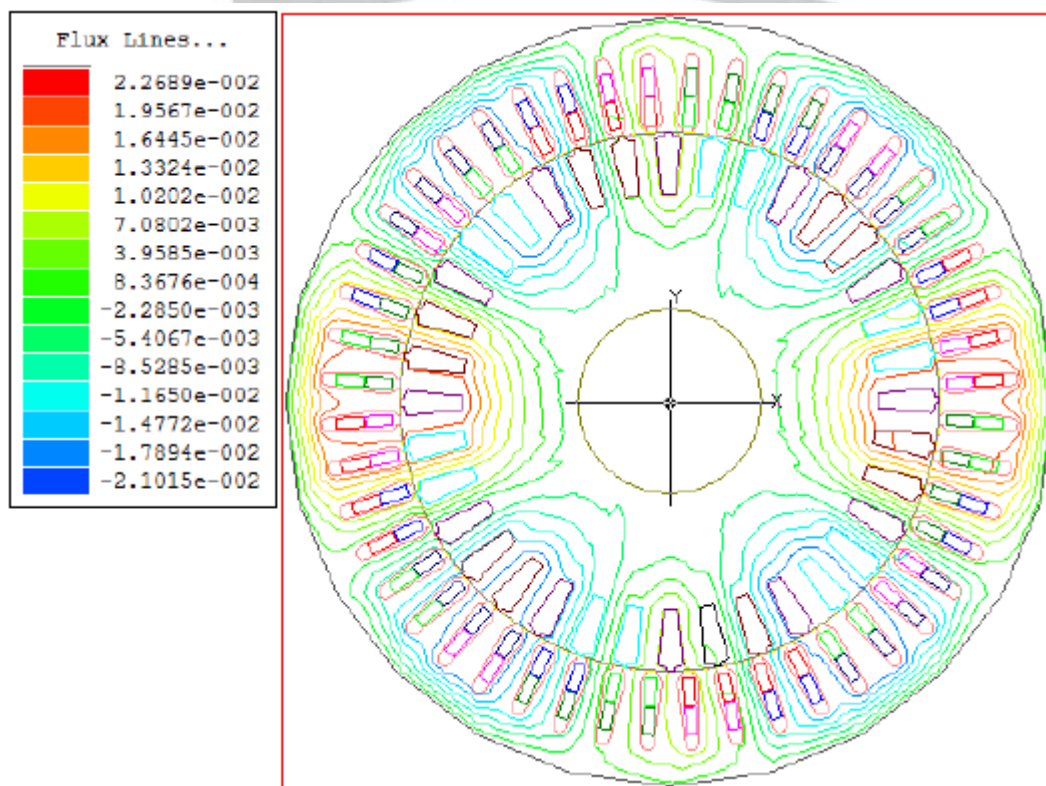


شکل ۴-۱۳: توزیع شار تولیدی استاتور در حالت پایدار و بدون خطا

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی‌پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



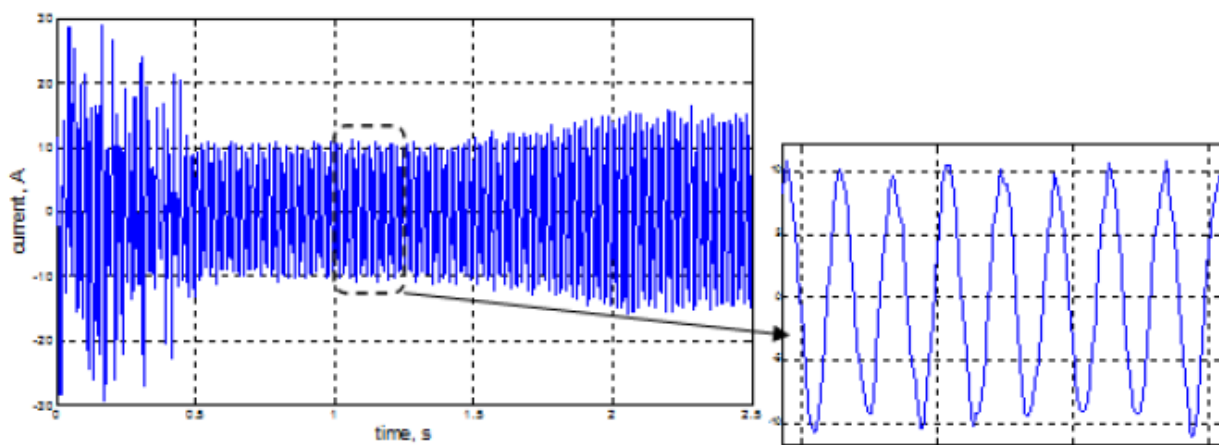
شکل ۴-۱۴: توزیع شار تولیدی روتور در حالت پایدار و بدون خطا



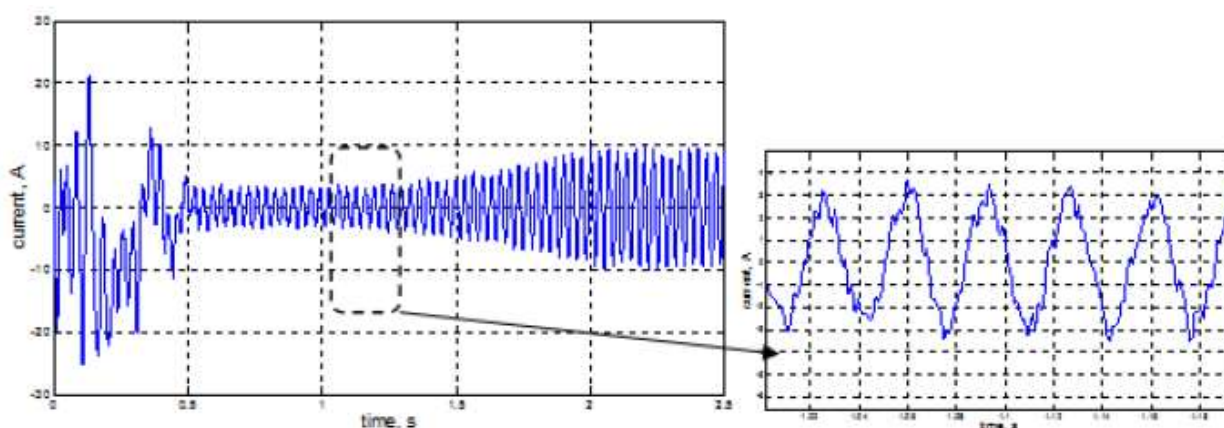
شکل ۴-۱۵: توزیع شار ماشین در حالت پایدار و بدون خطا

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل های ۴-۱۶ تا ۴-۲۰ نشان داده شده است. مقایسه این شکل موج ها با شکل موج هایی که در فصل قبل با استفاده از مدل دینامیکی پیشنهادی برای وضعیت بدون خطا بدست آمده، نشان دهنده وجود مطابقت بسار خوبی است که بر درستی مدل پیشنهادی در فصل قبل صحت می گذارد. اختلافات بین نتایج این دو مدل می تواند ناشی از عواملی همچون عدم دقت کافی در محاسبه امپدانس های نشتی استاتور و روتور، نادیده گرفتن اثر شیاربندی سطوح استاتور و روتور در استخراج امپدانس ها در مدل دینامیکی، چشم پوشی از اثر اشباع مغناطیسی و اثر پوستی و بینهایت فرض کردن نفوذپذیری مغناطیسی آهن استاتور و روتور در انجام تحلیل های مدل دینامیکی و ... دانست.

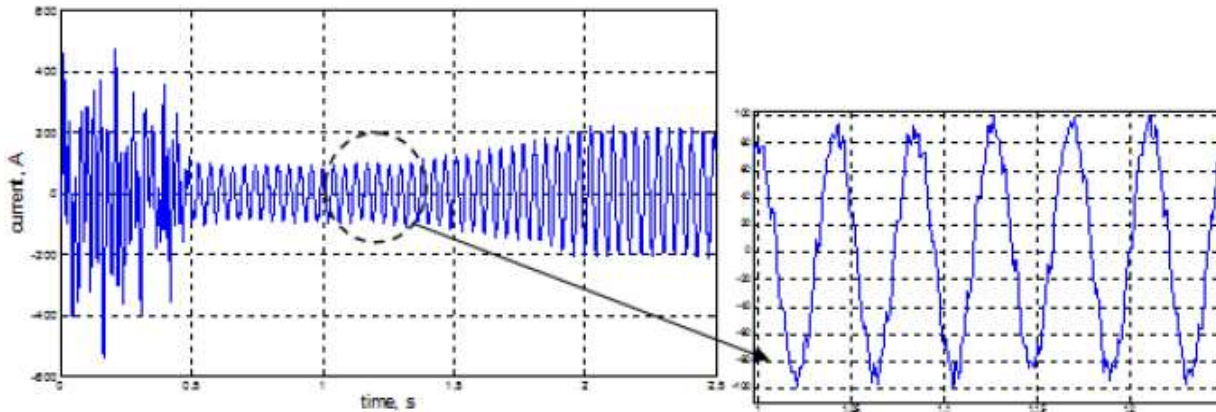


شکل ۴-۱۶: جریان فاز A سیم پیچ توان

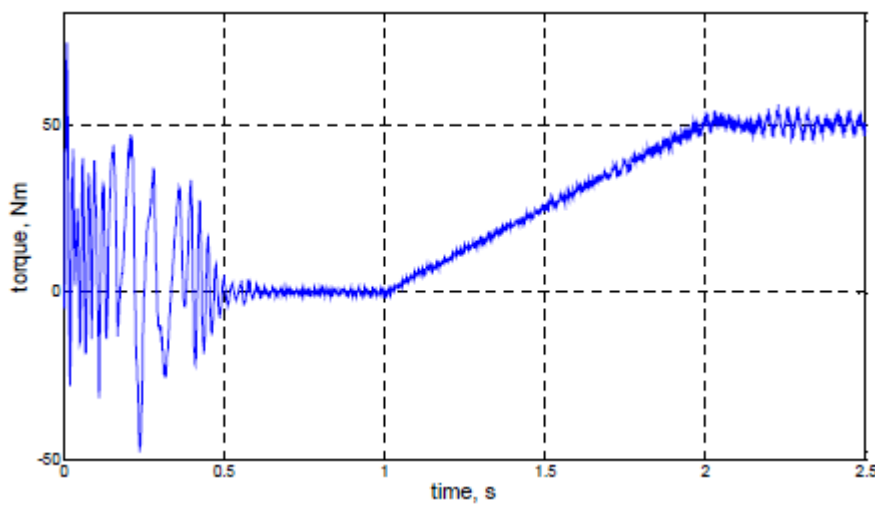


شکل ۴-۱۷: جریان فاز A سیم پیچ کنترل ماشین سالم (مدل اجزای محدود)

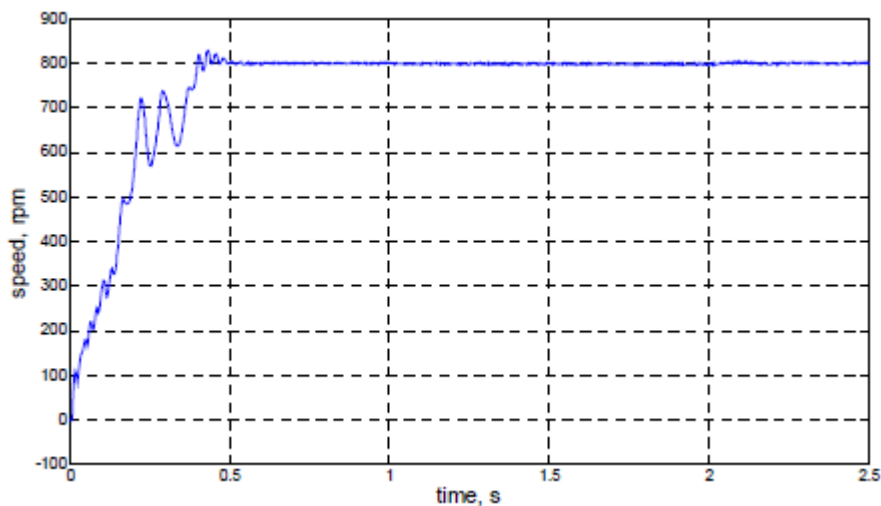
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی‌پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۴-۱۸: جریان حلقه داخلی واقع در nest مرجع روتور ماشین سالم (مدل اجزای محدود)



شکل ۴-۱۹: گشتاور الکترومکانیکی ماشین سالم (مدل اجزای محدود)



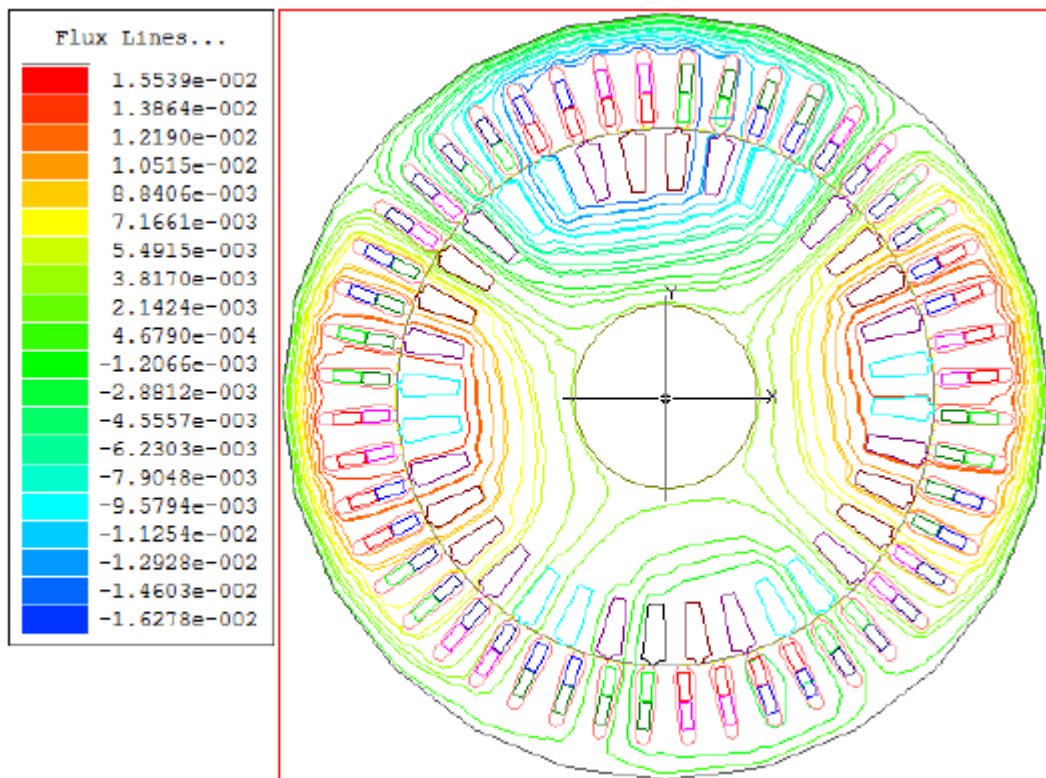
شکل ۴-۲۰: سرعت روتور ماشین سالم (مدل اجزای محدود)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

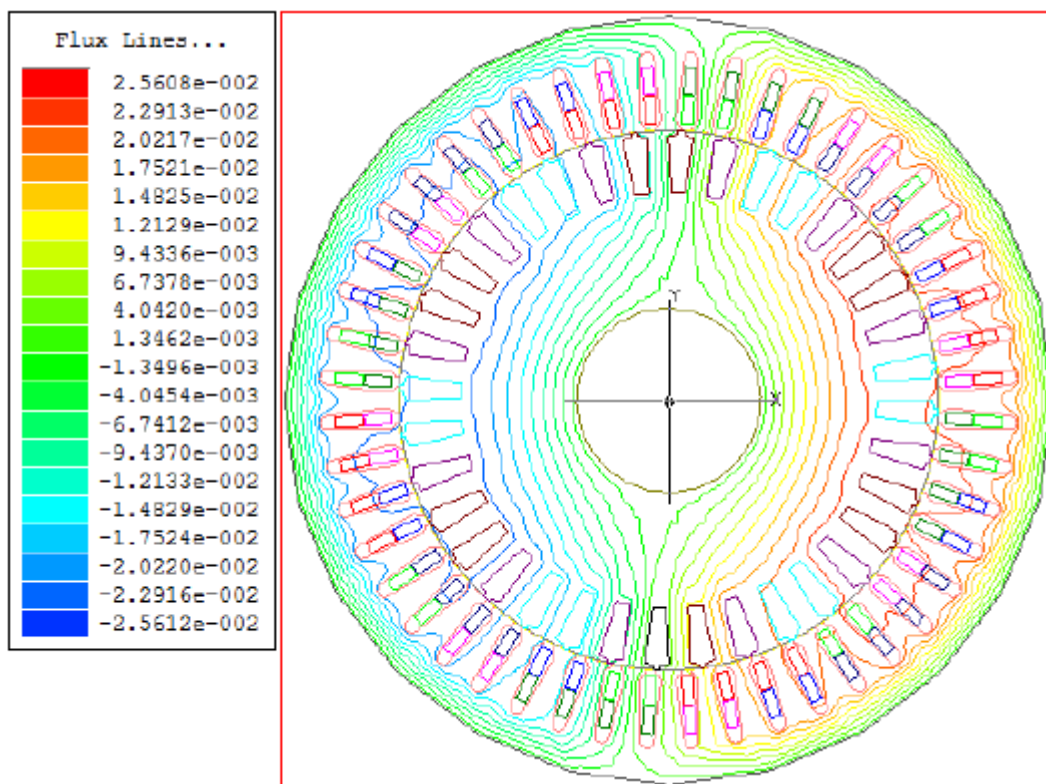
خطای سیم پیچی فاز به فاز که در فصل قبل بررسی گردید، بمنظور شبیه سازی حالت های خطا توسط مدل اجزای محدود انتخاب گردیده است. همانطور که گفته شد، هنگام وجود خطاها بدلیل از بین رفتن تقارن های سیستم، تمام دامنه سطح مقطع دو بعدی باید تحلیل شود. مش بندی این دامنه با ویژگی های مش بندی شکل ۴-۱۲ شامل ۱۵۸۶۵ گره و ۳۱۶۱۰ عنصر است. بدلیل محدودیت های رایانه مورد استفاده، کار کردن با ماتریس هایی با این ابعاد امکان پذیر نبود. برای رفع این مشکل، کیفیت مش بندی کاهش داده شد که این بمعنای افزایش خطای نتایج حاصله می باشد همچنین زمان شبیه سازی نسبت به حالت بدون خطا به ۱ ثانیه کاهش داده شد. با این وجود نتایج حاصله هماهنگی خوبی با نتایج بدست آمده در فصل قبل دارد. شکل های ۴-۲۱ تا ۴-۲۳ بترتیب توزیع شارهای تولیدی استاتور و روتور و توزیع شار کلی را در سطح مقطع ماشین برای حالت پایدار کارکرد و وجود خطای فاز به فاز در سیم پیچ های استاتور نشان می دهند. مشاهده می شود که توزیع شار تولیدی استاتور همانطور که انتظار می رفت نامتقارن است و توزیع شار کلی ماشین نیز دارای هارمونیک های مکانی است.

توزیع کمیت های دیگر ماشین در شرایط خطای فاز به فاز در شکل های ۴-۲۴ تا ۴-۲۷ نشان داده شده اند.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

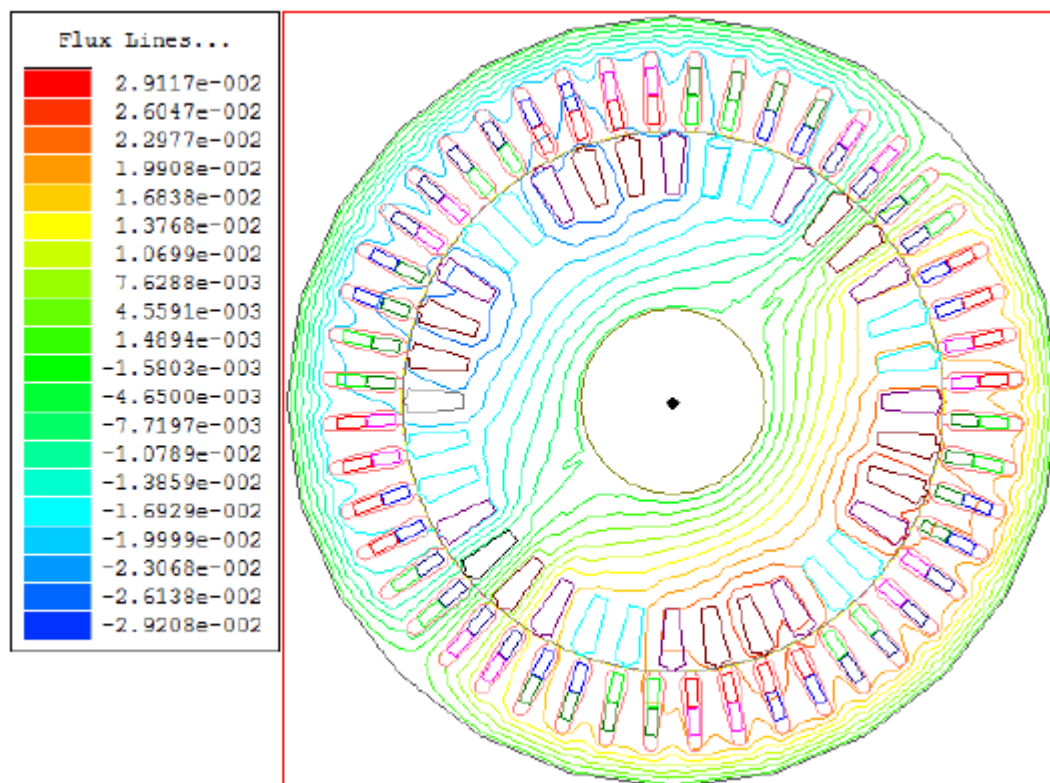


شکل ۴-۲۱: توزیع شار تولیدی استاتور در حالت پایدار و با وجود خطای فاز به فاز در سیم پیچ های استاتور

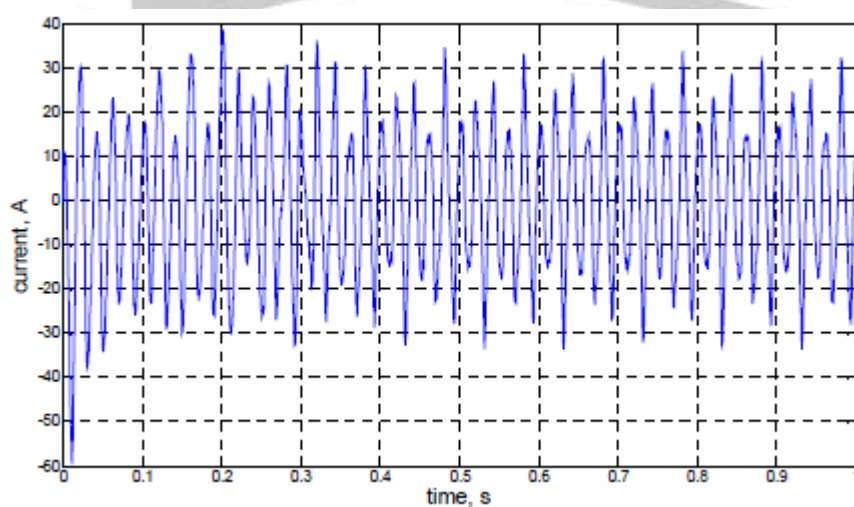


شکل ۴-۲۲: توزیع شار تولیدی روتور در حالت پایدار و با وجود خطای فاز به فاز در سیم پیچ های استاتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

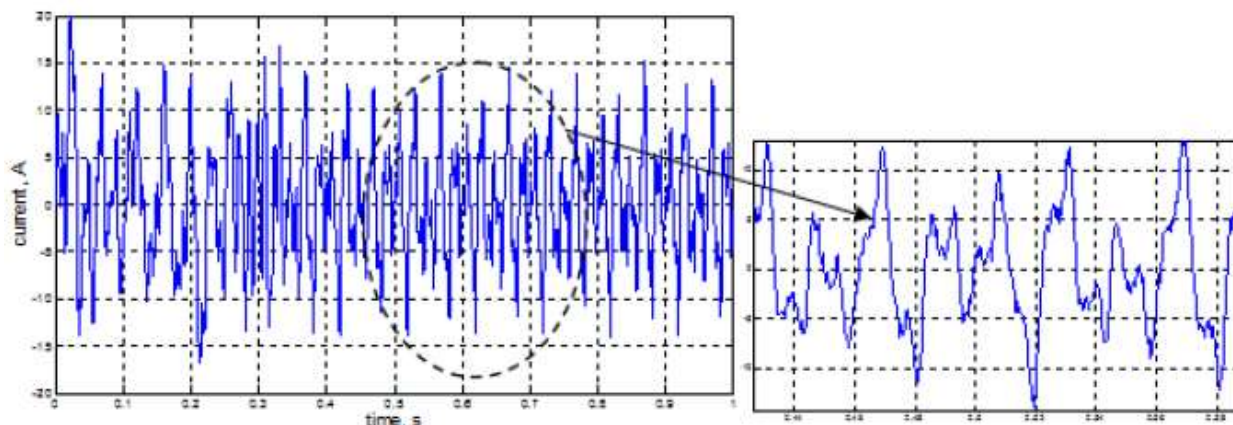


شکل ۴-۲۳: توزیع شار ماشین در حالت پایدار و با وجود خطای فاز به فاز در سیم پیچ های استاتور

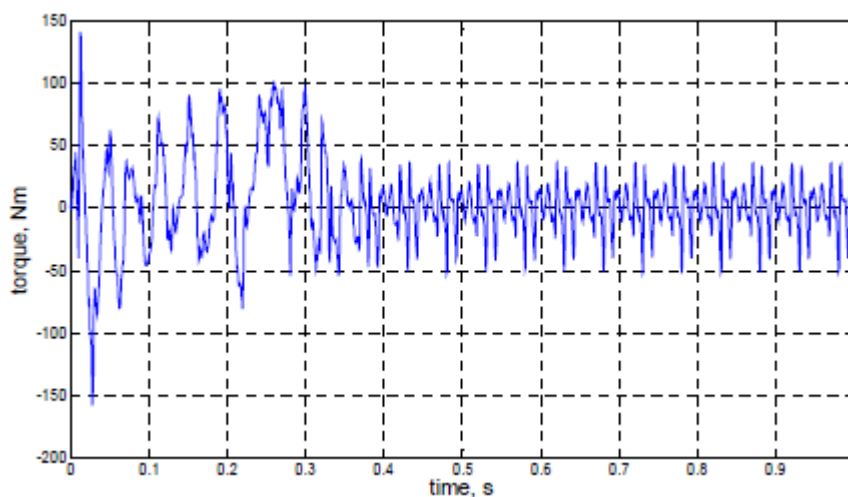


شکل ۴-۲۴: جریان قسمت ۱ از فاز A سیم پیچ توان در شکل ۳-۱۶ (مدل اجزای محدود)

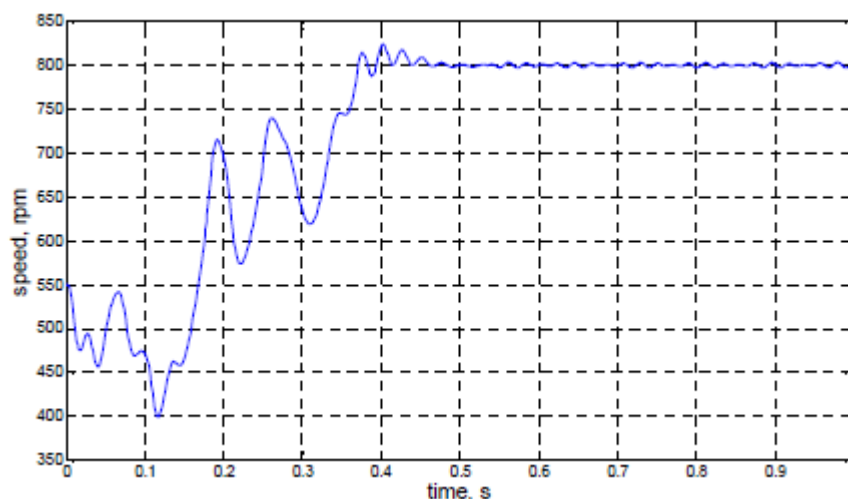
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۲۵-۴: جریان قسمت ۲ از فاز A سیم پیچ توان در شکل ۳-۱۶ (مدل اجزای محدود)



شکل ۲۶-۴: گشتاور الکترومکانیکی ماشین دچار خطای فاز به فاز (مدل اجزای محدود)



شکل ۲۷-۴: سرعت روتور ماشین دچار خطای فاز به فاز (مدل اجزای محدود)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

نتیجه گیری و پیشنهادها

در این پایان نامه به جنبه های مدلسازی و تحلیل موتور دوتحریکه بدون جاروبک پرداخته شد . خطاهای سیم پیچی استاتور بر طبق آمارهای رسمی، از معمول ترین انواع خطاهای ماشین های الکتریکی هستند . اثر وقوع خطای سیم پیچی در مورد ماشین دوتحریکه بدون جاروبک بسیار جدی تر از سایر ماشین های الکتریکی است زیرا سبب ایجاد کوپلاژ مغناطیسی مستقیم بین سیم پیچ های استاتور می گردد و می تواند در اثر وارد شدن نیروی مستقیم به یک کوپل از جانب کوپل های دیگر، صدمات فیزیکی جبران ناپذیری را به سیم پیچ ها وارد آورد.

اما در میان مدل هایی که تاکنون برای ماشین استخراج گردیده بود، مدلی که بتواند رفتار حالت های مختلف عملکرد ماشین را با وجود خطاهای استاتور توصیف کند و مبنایی برای استخراج الگوریتم های حفاظتی قرار گیرد، وجود نداشت . در این کار پژوهشی، مدلی با این ویژگی استخراج گردید و صحت آن توسط مدل اجزای محدود، اثبات گردید . مدل اجزای محدود نیز برای اولین بار برای ماشینی با توپولوژی ماشین معرفی شده در این گزارش، استخراج شد .

اولین و ملموس ترین نتیجه وقوع خطاهای استاتور، افزایش جریان های فازی و افزایش قابل توجه محتوای هارمونیک آنها است . در وضعیت خطا نوسانات سرعت و بویژه رپل های گشتاور نیز افزایش محسوسی پیدا می کنند که این موارد از نتایج شبیه سازی قابل مشاهده است . از دیگر نتایج وقوع خطا می توان به افزایش زمان لازم برای رسیدن کمیت به مقدار حالت پایدار خود اشاره کرد . با اعمال گشتاور بار به ماشینی که دچار خطای سیم پیچی استاتور گردیده، مشاهده می شود که ماشین دچار نوسانات شدید در سرعت چرخش می شود و سپس کنترل کننده دوباره ماشین را به سرعت سنکرون برمی گرداند.

نتایج حاصله از شبیه سازی مدل اجزای محدود و همچنین مشاهدات عملی، بیانگر وجود رپل های گشتاور در مورد ماشین با طراحی کنونی آن می باشد که مانع از راه اندازی شدن موفق ماشین در بعضی از

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

موارد می گردد. ریپل های گشتاور بصورت کامل و جامع بررسی گردید و تاثیر مورب کردن شیارهای استاتور و روتور بر کاهش دامنه آنها با روابط تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفت. بر پایه مطالعات انجام شده، مورب ساختن شیارها و حلقه های روتور برای غلبه بر مشکل وجود ریپل های گشتاور در ماشین توصیه می گردد زیرا مواردی از قبیل مقدار مؤلفه های هارمونیک مکانی چگالی شار فاصله هوایی و اغتشاش شکل موج نیرومحرکه الکتریکی برگشتی، با مورب ساختن شیارهای روتور وضعیت مطلوب تری نسبت به مورب ساختن شیارهای استاتور پیدا می کنند.

پیشنهاداتی که برای ادامه کار به نظر نگارنده می رسد، به شرح زیر است:

۱- استخراج مدل دینامیکی برای توصیف عملکرد ماشین هنگام وجود خطاهای اتصال کوتاه دور به دور در سیم پیچی استاتور و/یا خطاهای ناشی از شکستگی میله های روتور.

۲- استخراج الگوریتم تشخیص موقعیت برای تشخیص نوع خطا و مکان یابی آن با استفاده از شبکه های عصبی و تبدیل wavelet

۳- در بررسی خطاهای استاتور با آرایش های سیم پیچی متفاوت، مشاهده گردید که با وجود اینکه تعداد کوپل های شرکت کننده در خطا برای یک وضعیت خاص کمتر از وضعیت دیگر است، اما با اعمال گشتاور بار، سیستم ناپایدار می شود. دو حدس در مورد دلیل این مسئله می تواند متصور باشد: اول اینکه پایداری سیستم بستگی به اندوکتانس کوپلاژ متقابل بین سیم پیچ های توان و کنترل دارد. پس در بعضی از موارد بدلیل ناچیز بودن مقدار این اندوکتانس با توجه به آرایش خاص سیم پیچ های دچار خطا با وجود اینکه خطا شدیدتر بنظر می رسد، اما پایداری سیستم حفظ می شود در حالیکه در موقعیت دیگر سیستم از حالت سنکرون خارج شده و ناپایدار می گردد. دلیل دیگر را می توان نوع کنترل کننده و توانایی آن در پایداری سازی سیستم مربوط دانست. پس بررسی نقش کنترل کننده مورد استفاده بر عملکرد سیستم هنگام وقوع خطا می تواند بسیار سودمند باشد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۴- بکارگیری روش مورب ساختن شیارها جهت کاهش میزان ریپل های گشتاور نیاز به مطالعه تاثیر آن بر تلفات سیستم شامل تلفات مس و آهن دارد که مدل اجزای محدود معرفی شده در این گزارش بهترین ابزار برای تحقیق درباره مطلب فوق خواهد بود.



منابع و مراجع

1. A. K. Wallace, R. Spee, G. C. Alexander, "The brushless doubly-fed machine: Its advantages, applications and design methods", IEE 6th International Conference on Electrical Machines and Drives, Conference Publication 376, pp.511-517, 1993.
2. L. Xu, Y. Tang, L. Ye, "Comparison study of rotor structures of doubly excited brushless reluctance machine by finite element analysis", IEEE-EC Trans., v.9, n.1, pp.165-171, 1994.
3. B. Hopfensperger, and D. J. Atkinson, "Doubly-fed a.c. machines: Classification and Comparison", Proceeding of 9th European Conference on Power Electronics and Applications, August 2001.
4. P. C. Roberts, "A study of brushless doubly-fed (induction) machines", Ph.D. dissertation, University of Cambridge, 2005.
5. Ortmeier, T.H.: "CDFM generator steady state operating characteristics", IEEE 1986 National Aerospace and Electronics Conference, Dayton, Ohio, pp.312-319, 1986.
6. A. R.W. Broadway, L. Burbridge, "Self-cascaded machine: a low-speed motor or high-frequency brushless alternator", IEE Proc., v.117, n.7, pp.1277-1290, 1970.
7. A. Kusko, C. B. Somuah, "Speed control of a single frame cascade induction motor with slip power pump back", IEEE-IA Trans., v.14, n.2, pp.97-105, 1978.
8. Antriebstechnik, "SD-motors", Göppingen, Germany.
9. C. S. Brune, R. Spee, A. K. Wallace, "Experimental evaluation of a variable-speed doubly-fed wind power generation system", IEEE-IA Trans., v.30, n.3, pp.648-655, 1994.
10. Ernesto wiedenburg, Michael S. Boger, Alan K. Wallace, and Dean Patterson, "Electromagnetic Mechanism of Synchronous Operation of the Brushless Doubly-Fed machine", IEEE, 1995.
11. S. Williamson, A.C. Ferreira, A. K. Wallace, "Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 1: analysis", IEE Proc. on Electr. Power Appl., v.144, n.2, pp.111-122, 1997.
12. Ehsan Abdi-Jalebi, "Modeling and Instrumentation of Brushless Doubly-Fed (Induction) Machines", Ph.D. dissertation, University of Cambridge, 2006.
13. A. R. W. Broadway, "Cageless induction machine", IEE, vol. 118, no. 11, pp. 1593-1600, 1971.
14. L. Xu, F. Wang, "Comparative study of magnetic coupling of a doubly-fed brushless machine with reluctance and cage rotors", IEEE-IAS annual meeting, pp.326-332, 1997.
15. Smith, B.H.: "Theory and performance of a twin stator induction machine", IEEE-PAS Trans., v.85, n.2, pp.123-131, 1966.
16. Siemens Brothers&Co. Ltd. and Francis Lydall, "Improvements in polyphase induction motors", British Patent No.: 16839, July 1902.
17. Louis J. Hunt, "A new type of induction motor", Institution of Electrical Engineers, Journal, pages 648.677, 1907.
18. Louis J. Hunt, "The 'cascade' induction motor", Institution of Electrical Engineers, Journal, pages 406.434, 1914.
19. F. Creedy, "Some developments in multi-speed cascade induction motors", Institution of Electrical Engineers, Journal, pages 511.537, 1920.
20. B. H. Smith, "The theory and performance of a twin stator induction machine", IEEE

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

- Transactions on Power Apparatus and Systems, 85(2):123.131, February 1966.
21. B. H. Smith, "Synchronous behavior of doubly-fed twin stator induction machine", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 86(10):1227.1236, 1967.
 22. Yuefeng Liao, "Design of a brushless doubly-fed induction motor for adjustable speed drive applications", In Proc. IEEE Industry App. Soc. Annual Mtg., pages 850.855. IEEE, 6-10 October 1996.
 23. R. Spée, A. K. Wallace, and H. K. Lauw, "Performance simulation of brushless doubly-fed adjustable speed drives", In Conference record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, San Diego, CA, 1989.
 24. A. K. Wallace, R. Spée, and H. K. Lauw, "Dynamic modelling of brushless doubly-fed machines", In Conference record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, San Diego, CA, 1989.
 25. Ruqi Li, Alan Wallace, and René Spée, "Dynamic simulation of brushless doubly-fed machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, 6(3):445.452, 1991.
 26. Ruqi Li, Alan Wallace, and René Spée, "Two-axis model development of cage-rotor brushless doubly-fed machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, 6(3):453.460, 1991.
 27. R. A. McMahon, P. C. Roberts, X. Wang, and P. J. Tavner, "Performance of bdfm as generator and motor", Electrical Power Applications, IEE Proceedings, 153(2):289-299, March 2006.
 28. D. Zhou, R. Spée, and A. K. Wallace, "Laboratory control implementations for doubly-fed machines", In Proceedings of the IECON '93, volume 2, pages 1181.1186, IEEE Conf. on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993. 15-19 Nov 1993.
 29. Shiyi Shao, Ehsan Abdi, and Richard McMahon, "Stable operation of the Brushless Doubly-Fed Machine", IEEE PEDS 2007.
 30. S. Williamson, "Power-factor improvement in cage-rotor induction motors", IEE PROC., Vol. 130, Pt. B, No. 2, MARCH 1983.
 31. J. Sprooten, "Finite element and electrical circuit modeling of faulty induction machines-study of internal effects and fault detection techniques", Ph.D. dissertation, University of Libre de Bruxelles, 2007.
 32. A. H. Bonnett & G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, no. 4, pages 921- 937, July - Aug. 1992.
 33. S. M. A. Cruz & A. J. Marques Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach", In IEEE Industry Applications Conference, volume 1, pages 395- 401, Oct. 2000.
 34. Z. Jianzhong, J. Xinghua & Y. Zeyuan, "Vibration measurement of the generator stator end windings and precautions against insulation wearing", In International Conference on Power System Technology (PowerCon), volume 2, pages 1021- 1024, Aug 1998.
 35. V. Kogan, B. Nindra, "Investigation of high voltage stator winding vibrations in full-scale slot model", In Electrical Insulation Conference, pages 155-166, Sept 1997.
 36. C. Neacsu, P. Bidan, T. Lebey & M. Valentin, "Presentation of a new on line test procedure for low voltage rotating machines fed by adjustable speed drives (ASD)", IEEE International Power Electronics Congress, pages 9- 14, Oct 2002.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

37. S. Djurovic, S. Williamson, A. Renfrew, "Dynamic model for doubly-fed induction generators with unbalanced excitation, both with and without winding fault", IET Electr. Power Appl., Vol. 3, Iss. 3, pp. 171-177, 2009.
38. B. Adkins, "The general theory of electrical machines", London: Chapman and Hall, 1964.
39. J. Pedro, A. Bastos, and N. Sadowski, "Electromagnetic Modeling by Finite Element Method", 1st Ed. New York, Marcel Dekker, 2003.
40. P. P. Silvester and M. V. K. Chari, "Finite element solution of saturable magnetic field problems", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 89, 1970, pp. 1642-1651.
41. Chang Eob Kim, J. K. Sykulski, "Harmonic analysis of output voltage in synchronous generator using finite element method taking account of the movement", IEEE Transaction on magnetic, Vol. 38, No. 2, March 2002.
42. A. M. Oliveira, P. Kuo-Peng, N. Sadowski, M. S. de Andrade, and J. P. A. Bastos, "A non a priori approach to analyze electrical machines modeled by FEM connected to static converters", IEEE Trans. Magn., vol. 38, pp. 933-936, Mar 2002.
43. A. M. Oliveira, P. Kuo-Peng, N. Sadowski, F. Rñncos, R. Carlson, and P. Dular, "Finite-Element Analysis of a Double-Winding Induction Motor With a Special Rotor Bars Topology", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 40, NO. 2, MARCH 2004.
44. D. C. Hanselman, "Effect of skew, pole count and slot count on brushless motor radial force, cogging torque and back EMF", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 144, No. 5, September 1997.
45. J. F. Gieras, "Analytical approach to cogging torque calculation of PM brushless motors", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 40, No. 5, Sept./Oct. 2004.
46. Heller, and V. Hamata, "Harmonic Field Effects in Induction Machines", Elsevier Scientific Publishing Co., pp. 54-101, 1977.