

جابجایی محور رتور در ماشینهای الکتریکی

۱-۱- مقدمه

اهمیت خروج از مرکزیت و اثرات مخرب آن در عملکرد ماشینهای الکتریکی، مهندسان را بر آن می دارد تا با تشخیص به موقع این خطا در ماشین از گسترش خطا و بروز صدمات دیگر به ماشین جلوگیری کنند. لذا بررسی خطای خروج از مرکزیت بسیار حائز اهمیت است. در این فصل به بررسی این خطا پرداخته می شود. بدین منظور ابتدا تعریف مشخصی از این خطا و انواع مختلف آن صورت می گیرد، سپس عوامل موثر در ایجاد این پدیده و اثراتی که این پدیده بر عملکرد ماشینهای الکتریکی می گذارد بررسی می شود.

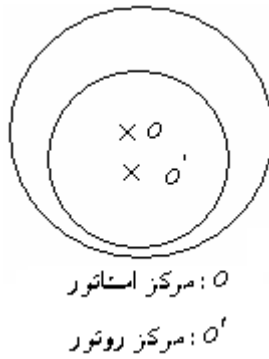
۱-۲- تعریف خروج از مرکزیت رتور

بر اثر خطاهای مربوط به بلبرینگها و اتصالات فاصله هوایی بین استاتور و رتور، صرف نظر از اثر شیارها، از حالت یکنواخت خارج می گردد. در صورت بروز این گونه خطاها انطباق محور رتور از مرکز ماشین از بین می رود. در این شرایط اگر محور رتور با محور استاتور موازی باقی بماند، این پدیده را خروج از مرکزیت^۱ گویند. پدیده خروج از مرکزیت رتور به سه نوع تقسیم بندی می شود [۲۸].

اگر موقعیت محور رتور از دید ناظر ساکن، همواره ساکن باشد، یعنی مقدار و محل وقوع کمترین فاصله هوایی در ماشین مقادیر ثابتی باشند، به آن خروج از مرکزیت ایستا^۲ می گویند. در شکل زیر پدیده خروج از مرکزیت محور رتور در وضعیت خروج از مرکزیت ایستا نشان داده شده است.

^۱ Eccentricity

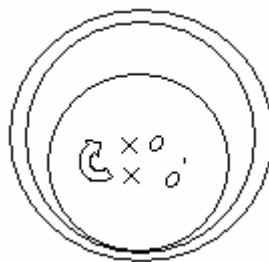
^۲ Static Eccentricity



شکل ۱-۱- خروج از مرکزیت ایستا در ماشین القایی

خروج از مرکزیت ایستا ممکن است به علت قرار گیری نامناسب بلبرینگها، بیضوی شدن سطح داخلی استاتور یا عدم همراستایی محور بار و محور رتور ایجاد شود. در حالت خروج از مرکز نیروهای شعاعی یکدیگر را خنثی نمی کنند و برآیند آنها نیروی بسیار بزرگی ایجاد می کند که آن را کشش نامتعادل مغناطیسی می نامند، که به نوع و درجه خروج از مرکزیت وابسته است.

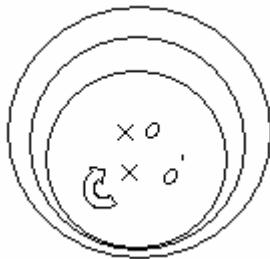
این پدیده باعث ایجاد لرزش، نویز، سر و صدا و نوسان بار می گردد و با ادامه این وضعیت باعث صدمه به بلبرینگها، محور، اتصالات و در نتیجه خروج از مرکزیت پویا^۱ می شود. در این نوع خروج از مرکزیت زاویه موقعیت کوتاه ترین فاصله هوایی با چرخش رتور تغییر می کند خروج از مرکزیت پویا می تواند به خاطر جهتداری مغناطیسی ورقه های هسته یعنی تفاوت نفوذ پذیری مغناطیسی ورقه ها در جهات مختلف و همچنین تفاوت ضخامت و نایکنواختی هادی تزریق شده در شیارهای مختلف رتور قفس سنجابی به خاطر مسائل و مشکلات ریخته گری، و در نتیجه عدم تعادل قفس نیز به وجود آید. در شکل زیر خروج از مرکزیت پویای محور رتور نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- خروج از مرکزیت پویا

^۱ Dynamic Eccentricity

هنگامی که خروج از مرکزیت ایستا و پویا تواما ایجاد گردند، خروج از مرکزیت مرکب^۱ بوجود می آید، در این حالت محور رتور بر روی دایره ای با سرعت زاویه ای رتور در حال تغییر موقعیت است. در تمام این حالات محور رتور موازی محور استاتور باقی می ماند. در شکل زیر پدیده خروج از مرکزیت محور رتور در وضعیت خروج از مرکزیت مرکب نشان داده شده است.



شکل ۱-۳- خروج از مرکزیت مرکب

برای مشخص شدن خروج از مرکزیت باید پارامترهای خروج از مرکزیت مشخص شوند. این پارامترها ضریب مشخص کننده میزان خروج از مرکزیت رتور (δ) و موقعیت زاویه ای محل کوتاه ترین فاصله هوایی (ϕ_0) می باشد.

۱-۳- عوامل ایجاد خروج از مرکزیت در ماشینهای الکتریکی [23]

خطای خروج از مرکزیت از دسته عیوب مکانیکی در ماشینهای الکتریکی می باشد که باعث تغییر مدار مغناطیسی در ماشین می گردد. برخی عوامل غیر مکانیکی نیز که دارای اثر مشابهی در تغییر نفوذ پذیری مغناطیسی فاصله هوایی ماشین می باشند می توانند خروج از مرکزیت را تشدید کنند. البته در این میان نقش خطاهای مکانیکی از اهمیت بالایی برخوردار است.

قرار گیری نامناسب بلبرینگها و یاتاقانها، عدم تعادل بار یا عدم همراستایی محور بار و محور رتور ایجاد شود. از عوامل خروج از مرکزیت ایستا هستند. خروج از مرکزیت تقارن شکاف هوایی را به هم می زند و در نتیجه باعث کشش نامتعادل مغناطیسی در جهت شعاعی بین سطح داخلی استاتور و سطح خارجی رتور می شود. برآیند نیروی کشش نامتعادل مغناطیسی در جهتی است که تمایل به کاهش بیشتر فاصله هوایی در نقاط با فاصله کم دارد. یعنی این نیرو در جهت افزایش بیشتر فاصله

^۱ Mixed Eccentricity

محورهای رتور و استاتور است. نتیجه این که خروج از مرکزیت و کشش نامتعادل مغناطیسی همدیگر را تقویت می کنند. در نتیجه بلبرینگها به مرور زمان آسیب می بینند و در نهایت باعث سایش سطح داخلی استاتور با سطح خارجی رتور و آسیب جدی به ماشین و توقف کار آن می شود.

همچنین تفاوت ضخامت و نایکنواختی هادی تزریق شده در شیارهای مختلف رتور قفس سنجابی به خاطر مسائل و مشکلات ریخته گری و در نتیجه عدم تعادل قفس از اهم مسائل و مشکلات مکانیکی در بروز خروج از مرکزیت موثر می باشند.

مسائل و مشکلات دانش فنی ساخت هسته ماشینهای الکتریکی باعث می شود، ورقه های هسته دقیقا به صورت دلخواه بریده نشوند و تقارن دلخواه ورقه در برش حفظ نگردد. این موضوع می تواند باعث بروز حالتی چون بیضوی شدن هسته گردد. این پدیده ها نیز باعث تغییر فاصله هوایی می گردند. به علاوه جهتداری مغناطیسی ورقه های هسته، به عبارتی تفاوت نفوذ پذیری مغناطیسی ورقه ها در جهات مختلف، به طور فیزیکی با تغییر رلوکتانس هسته در موقعیتهای متفاوت در مسیر شار عبوری، عملا به صورت تغییر فاصله هوایی ظاهر می شود، لذا می توان این پدیده را با تغییر فاصله هوایی، در تحلیل مدل سازی کرد [11].

۱-۵- عملکرد ماشینهای الکتریکی با حضور خروج از مرکزیت [1]

خطای خروج از مرکزیت باعث تغییر فاصله هوایی ماشین می گردد. تغییر فاصله هوایی یا نفوذ پذیری مغناطیسی فاصله هوایی مسیر شار عبوری باعث ایجاد چگالی شار غیر عادی در فاصله هوایی می شود که منجر به القا ولتاژ نامتعادل در سیم بندی ها شده و بنابراین عدم تعادل جریان فازها، افزایش تلفات، افزایش گشتاورهای ضربانی و کاهش گشتاور متوسط را در پی دارد. حالت تقارن مجموع نیروهای مماسی در ماشین باعث ایجاد گشتاور و مجموع نیروهای شعاعی بسیار نزدیک به صفر می باشد. اما در حالت خروج از مرکز دیگر نیروهای شعاعی یکدیگر را خنثی نمی کنند و برآیند آنها نیروی بسیار بزرگی ایجاد می کند که آن را کشش نامتعادل مغناطیسی می نامند، که به نوع و درجه خروج از مرکزیت وابسته است. این پدیده باعث ایجاد لرزش، نویز، سر و صدا و نوسان بار می گردد و با ادامه این وضعیت باعث صدمه به بیرینگها، محور، اتصالات و بار می گردد. همچنین با

افزایش میزان خروج از مرکزیت باعث سایش رتور و استاتور و از بین رفتن ماشین می شود. کشش نامتعادل مغناطیسی ایجاد شده، با ایجاد ارتعاشات در هسته و هادیها باعث بروز خستگی و در نتیجه شکست عایقی در ورقه ها و هادیها می شود، لذا پیدایش خروج از مرکزیت خود باعث یک سلسله خطاهای دیگر از جمله خطاهای سیم بندی، شکست میله و طوقه در ماشینهای قفس سنجابی می گردد. خروج از مرکزیت، هم در سیستم مکانیکی و هم در سیم پیچها به دلیل افزایش مولفه های هارمونیک و مقدار موثر جریان، موجب افزایش تلفات می گردد.

۱-۵-۱- کشش نامتعادل مغناطیسی [11]

در یک ماشین الکتریکی علاوه بر نیروهای مماسی که باعث تولید گشتاور در ماشین می شود نیروهای محوری و شعاعی نیز در ماشین به وجود می آیند. نیروی محوری در صورت امکان باعث جابجایی محوری رتور می گردد. غالباً نیروهای شعاعی وارد بر سطح رتور بسیار بزرگ می باشند. اما در ماشینهای متقارن و متعادل الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی برآیند نیروهای شعاعی ناچیز است. لذا هنگامی که به هر دلیل (عدم تقارن و تعادل الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی مانند خروج از مرکزیت رتور، انحنای و انحراف رتور، شکست میله، تعداد نامناسب شیارها، شیار اریب و.....) برآیند نیروهای شعاعی وارد بر رتور همدیگر را خنثی نگردانند، کششی در جهت برآیند نیروی شعاعی به وجود می آید که اصطلاحاً به آن کشش نامتعادل مغناطیسی^۱ اطلاق می شود. این نیرو در اثر عدم تعادل نیروهای مغناطیسی شعاعی پدید می آید و باعث لرزش و نویز بیشتری در ماشین می شود. چنانچه محور ماشین مانند محور ماشین های با طول زیاد انعطاف پذیر باشد، احتمال سایش رتور بر استاتور وجود دارد که باعث تخریب سریع هسته سیم بندی می شود. این نیرو باعث تخریب سریع یاقانهای ماشین می شود.

در خروج از مرکزیت ایستا جهت UMP در فضا ثابت است و با چرخش رتور نمی چرخد. بنابراین تشخیص نیرو در این حالت دشوار است. اما در خروج از مرکزیت پویا UMP همراه با چرخش رتور و با همان سرعت می چرخد. بنابراین با اندازه گیری ارتعاش رتور در فرکانس گردش رتور تشخیص این نیرو آسانتر است.

^۱ Unbalanced Magnetic Pull (UMP)

UMP نوسانی با افزایش خروج از مرکزیت پویا به سرعت و با خروج از مرکز ایستا به کندی افزایش می یابد. اما مولفه UMP با فرکانسی دو برابر فرکانس منبع با افزایش خروج از مرکز ایستا به سرعت افزایش می یابد لذا استفاده از این خصوصیت، معیار مناسبی برای تشخیص این دو نوع خروج از مرکزیت بدست می دهد.

۱-۶- تشخیص خطای خروج از مرکزیت در ماشینهای الکتریکی [۴۳]

جلوگیری به موقع از افزایش خروج از مرکزیت و اثرات ثانویه آن مستلزم تشخیص دقیق و به موقع این عیب می باشد. تاکنون روشهای زیادی برای حالت بینی و آشکار سازی خطا در ماشینهای الکتریکی استفاده شده است. جهت تشخیص بلادرنگ خرابی ماشین بایستی بتوان رفتار داخلی ماشین و اثرات خارجی مانند اثر بار، منبع تغذیه و سیستمهای کنترلی آن را با دقت خوبی تعیین کرد. لذا شناسایی این روشها و میزان کارایی آنها در تشخیص بلادرنگ و با وقفه انواع خطاها، ما را در پیشگیری از خسارت بیشتر یاری می کند.

تاکنون برای آشکار سازی خطای خروج از مرکزیت روشهای متنوعی ابداع شده که دربرگیرنده زمینه های متفاوتی از علوم می باشد. این روشها عبارتند از [۴۹]:

۱- اندازه گیری دما

۲- نظارت بر انتشار امواج رادیویی

۳- نظارت بر نویز و ارتعاش

۴- تجزیه و تحلیل شیمیایی

۵- نظارت بر میدان الکترومغناطیسی با استفاده از پیچک جستجو

۶- تجزیه و تحلیل جریان موتور

۷- استفاده از هوش مصنوعی و شبکه های عصبی

یکی از دقیق ترین، کاراترین، موثرترین، جامع ترین و در نتیجه بهترین روش های تشخیص خطا در ماشینهای الکتریکی روش آنالیز جریان موتور^۱ می باشد [۴۹]. برخی مزایای مهم این روش عبارتند از:

^۱ Motor Current Signature Analysis (MCSA)

۱- سهولت اندازه گیری جریان موتور از راه دور در محل تغذیه و فرمان موتور.

۲- عدم ایجاد اختلال در کار عادی موتور ناشی از نصب و استفاده از حسگر

۳- سهولت ایجاد سیستم تشخیص عیب بلادرنگ^۱

این مزایا باعث شد محققان زیادی از این روش جهت تشخیص عیب ناهم محوری موتور بهره گیرند.

در این روش با تشخیص اندازه و دامنه هارمونیکهای طیف جریان استاتور، سعی در تشخیص نوع و درجه خطا می شود. تا کنون شاخصهای متفاوتی برای تشخیص عیب نام محوری بر اساس MCSA ارائه شده است. از مهمترین این شاخصها هارمونیکهای فرکانس بالای جریان استاتور [۶۰] و هارمونیکهای فرکانس کم جریان استاتور [۷۳،۳۴،۳۲،۲۹،۲۷،۲۶،۱۵] می باشد.

۱-۶-۱- هارمونیکهای فرکانس زیاد جریان استاتور [12]

در موتورهای القایی با وجود خروج از مرکزیت مولفه های هارمونیک فرکانس بالا نزدیک هارمونیکهای شیار وجود دارد که رابطه آنها به صورت زیر است [۶۰].

$$f_h = f[(kR \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p}\right) \pm v] \quad (5-1)$$

که در آن $n_d = 0$ برای خروج از مرکزیت استاتیک و $n_d = 1$ برای خروج از مرکزیت دینامیک است. f فرکانس منبع تغذیه، R تعداد شیارهای رتور، s لغزش، p تعداد جفت قطبها، k عدد صحیح و v هارمونیکهای زمانی تغذیه می باشد ($v=1,3,5\dots$).

به ازای $K=1$ ، $n_d=0$ و $v=1$ هارمونیکهای حاصل از رابطه بالا در جریان خط موتور سالم نیز ظاهر می شوند. این هارمونیکها به هارمونیکهای اصلی شیار رتور معروف هستند^۲. معمولا آشکارسازی هارمونیکهای جریان خط استاتور از طریق نمونه گیری با دوره تناوب معین از آن و تعیین طیف فرکانسی مربوطه با استفاده از FFT انجام می شود. به دلیل کم بودن دامنه هارمونیکها نسبت به هارمونیک اصلی جریان باید از مقیاس دسی بل در محور قائم استفاده کرد تا هارمونیکهای ناشی از خطا قابل تشخیص باشند.

^۱ On line

^۲ Principle Slot Harmonics (PSH)

با استفاده از این روش می توان ناهم محوریهای استاتیکی و دینامیکی را از هم تفکیک کرد. ولی نقاط وضعی نیز وجود دارد که مهمترین آنها عبارتند از:

۱- هارمونیکهای فرکانس بالای جریان خط موتور ناشی از خطا دامنه بسیار کمی دارند که باعث می شود اندازه گیری با مشکل مواجه شده و مجبوریم از روشهای اندازه گیری و تحلیل پیشرفته استفاده کنیم.

۲- بار موتور بر روی دامنه مولفه های هارمونیک ناشی از خطا تاثیر گذار است. به طوریکه در بعضی بارها تشخیص خطا بسیار دشوار یا غیر ممکن است.

۳- وجود هارمونیکهای فرکانس بالای ناشی از خطا در طیف جریان موتور به تعداد شیار رتور و تعداد قطبهای ماشین بستگی دارد به طوریکه در عضی موتورهای تشخیص خطا از روی مولفه های فرکانس بالا غیر ممکن است..

۴- عوامل زیادی وجود دارد که همان مولفه های فرکانس بالا را ایجاد می کنند و به دلیل فرکانس بالا آشکار سازی و تفکیک آنها دشوار می باشد.

۱-۶-۲- هارمونیکهای فرکانس کم جریان استاتور

مولفه های فرکانسی ناشی از خطای خروج از مرکزیت اطراف فرکانس تغذیه به صورت زیر می باشد [۲۶].

$$f_h = f \left[1 \pm m \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (6-1)$$

بر خلاف هارمونیکهای فرکانس بالا، دامنه مولفه های فرکانس پایین ناشی از خطا به تعداد شیار رتور و تعداد قطبهای ماشین وابستگی ندارد و تنها شرط وجود آنها وجود ناهم محوری مرک در موتور می باشد.. با توجه به این که در عمل موتورهای القایی واقعی همیشه به طور ذاتی درجه ای از ناهم محوری ایستا و پویا وجود دارد بنابراین شرط هیچ مشکلی ایجاد نمی کند. به علاوه اثر نویز کمتر بوده و اندازه گیری و تحلیل مولفه های فرکانسی راحتتر است. در مقابل دامنه هارمونیکها به نوسان بار وابسته است به طوریکه در شرایط خاصی نوسان بار دقیقاً هوان مولفه های فرکانس پایین ناشی از

خطا را در موتور ایجاد می کند. همچنین تشخیص نوع و درجه ناهم محوری به این روش رشوار است [۲۶].

مدلسازی موتور القایی قفس سنجابی سه فاز در حالت جابجایی محور رتور

۲-۱- مقدمه

در این فصل مدل‌های ماشین القایی در شرایط انحنای انواع خروج از مرکزیت و عدم همراستایی ارائه شده و اندوکتانسهای ماشین القایی در این شرایط محاسبه شده اند. عدم همراستایی ایستا و انحنای محور رتور را می توان حالت کلی تری از خروج از مرکزیت ایستا و عدم همراستایی پویا را حالت کلی تری از خروج از مرکزیت مرکب در نظر گرفت که پارامترهای خروج از مرکزیت تابعی از موقعیت طولی ماشین می باشد.

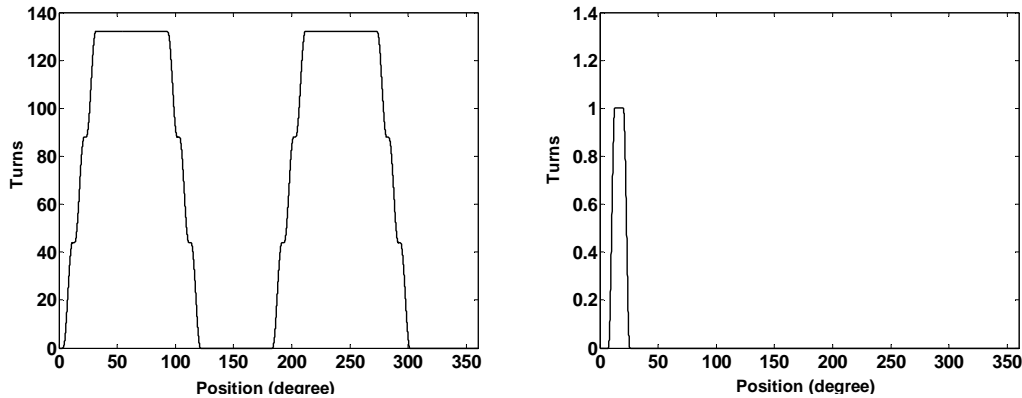
در اثر عیوب بلبرینگها، محور و اتصالات، محور رتور از حالت عادی منحرف می شود. در اثر انحراف محور رتور در حالت کلی محور رتور موازی محور استاتور باقی نمی ماند و آن را قطع می کند. هم چنین محل تقاطع در مرکز قرار ندارد. در مرحله بعد به منظور مدلسازی این ونه خطاها، مدل جامعی جهت مدلسازی حالت کلی جابجایی محور رتور ارائه شده است. نشان داده شده برای مدلسازی این گونه عدم تقارن، می توان این پدیده را عدم همراستایی توام با خروج از مرکزیت در نظر گرفت. در این حالت محور رتور نسبت به حالت عدم همراستایی جابجا می شود به طوریکه با آن موازی باقی می ماند.

۲-۲- مدلسازی خروج از مرکزیت رتور^۱

در این بخش، اندوکتانسهای ماشین القایی قفس سنجابی سه فاز در شرایط خروج از مرکزیت ایستا، پویا و مرکب محاسبه می شوند. جهت محاسبه اندوکتانسها، با استفاده از روش تابع سیم پیچ، چهار تابع مورد نیاز می باشد. تابع دور و تابع سیم پیچ برای شرایط متقارن و نامتقارن یکسان هستند. اما

^۱ -Eccentricity

توابع شکاف هوایی و شعاع متوسط که بیانگر مدل هندسی ماشین هستند در شرایط مختلف تغییر می کند. شکل (۱-۲) توابع دور مربوط به فاز a استاتور و حلقه اول رتور در یک مقطع از رتور را نشان می دهد.



شکل ۱-۲- توابع دور مربوط به فاز a استاتور (چپ) و حلقه اول رتور در یک مقطع از رتور (راست).

خروج از مرکزیت از هر نوعی که باشد باعث عدم تقارن فاصله هوایی در راستای شعاعی می شود. با توجه به این که در حالت خروج از مرکزیت ایستا مرکز مقطع رتور از روی مرکز مقطع استاتور جابجا می شود و موقعیت محور رتور از دید ناظر ساکن، همواره ساکن باشد، مقدار و محل وقوع کمترین فاصله هوایی در ماشین (با اغماض از شیارهای استاتور و رتور) همیشه ثابت است. بنابراین در صورتیکه از تورب میله ها صرف نظر شود ماشین در راستای طولی متقارن است. در این صورت روابط شکاف هوایی و شعاع متوسط در حالت خروج از مرکزیت ایستا به صورت زیر می باشد.

$$g_e(\phi, z, \theta_r) = g_h(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_s \cos(\phi - \phi_0)) \quad (1-2)$$

$$r_{av}(\phi, z, \theta_r) = r_{sta}(\phi, z) - \frac{g_e(\phi, z, \theta_r)}{2} \quad (2-2)$$

در روابط بالا، δ_s : در صد خروج از مرکزیت ایستا، ϕ_0 : موقعیت خروج از مرکزیت ایستا نسبت به استاتور و $g_h(\phi, z, \theta_r)$: تابع شکاف هوایی برای موتور سالم (با اثر تورب میله ها یا بدون اثر آن) می باشد.

با توجه به این که در خروج از مرکزیت پویا، زاویه موقعیت کوتاه ترین فاصله هوایی با چرخش رتور تغییر می کند روابط شکاف هوایی و شعاع متوسط در حالت خروج از مرکزیت ایستا به صورت زیر می باشد.

$$g_e(\phi, z, \theta_r) = g_h(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_d \cos(\phi - \phi_0 - \theta_r)) \quad (3-2)$$

$$r_{av}(\phi, z, \theta_r) = r_{sta}(\phi, z) - \frac{g_e(\phi, z, \theta_r)}{2} \quad (4-2)$$

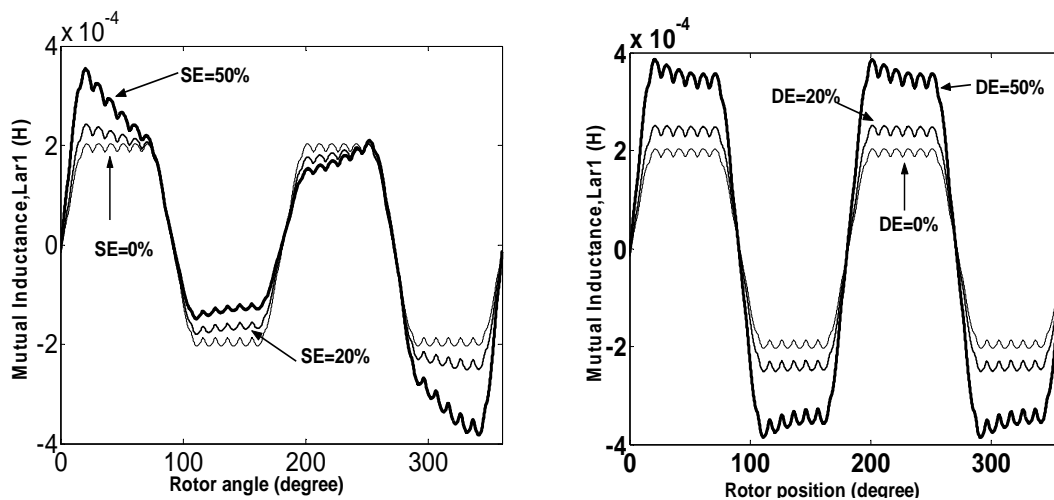
در روابط بالا، δ_d : در صد خروج از مرکزیت پویا می باشد.

در خروج از مرکزیت مرکب نیز که هر دو نوع ایستا و پویا همزمان وجود دارد روابط شکاف هوایی و شعاع متوسط به صورت زیر می باشد.

$$g_e(\phi, z, \theta_r) = g_h(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_s \cos(\phi - \phi_0) - \delta_d \cos(\phi - \phi_0 - \theta_r)) \quad (5-2)$$

$$r_{av}(\phi, z, \theta_r) = r_{sta}(\phi, z) - \frac{g_e(\phi, z, \theta_r)}{2} \quad (6-2)$$

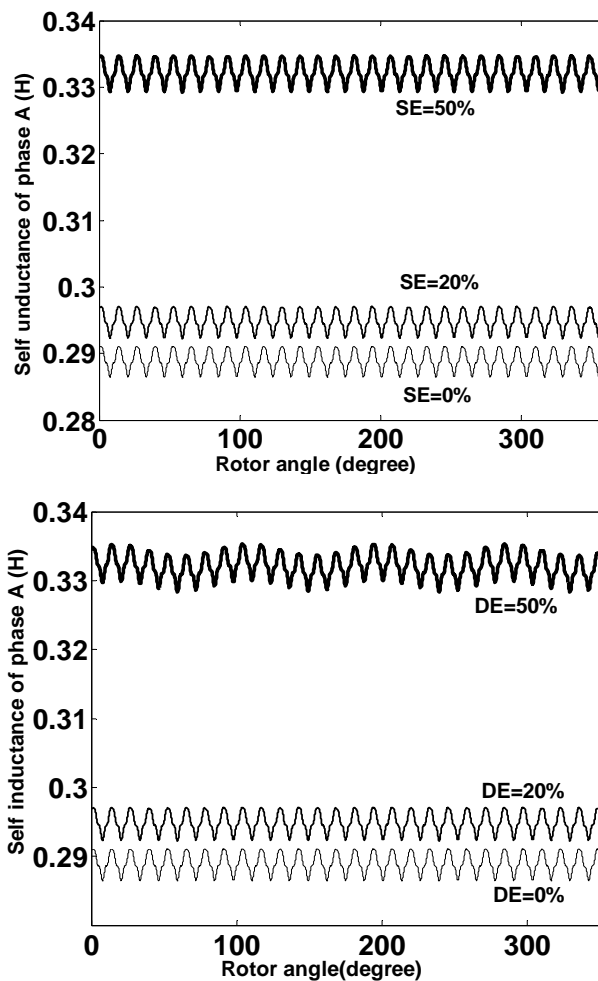
در شکل (۲-۲) تغییرات اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور نسبت به موقعیت زاویه ای رتور به ازای مقادیر مختلف خروج از مرکزیت ایستا و پویا نشان داده شده است.



شکل (۲-۲) - تغییرات اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور نسبت به موقعیت زاویه ای رتور به ازای مقادیر مختلف خروج از مرکزیت ایستا (چپ) و پویا (راست).

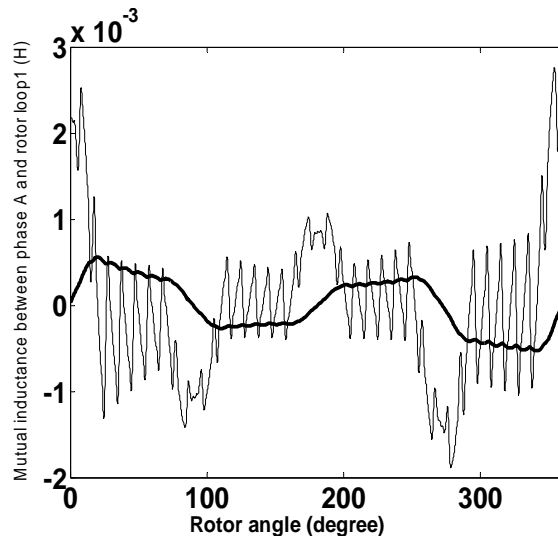
افزایش اندوکتانس متقابل در حالت خروج از مرکزیت پویا به این علت است که اولین حلقه رتور همواره در موقعیت کمترین فاصله هوایی قرار دارد. واضح است که در حالت خروج از مرکزیت ایستا، اندوکتانسهای خودی و متقابل حلقه های رتور تابعی از θ_r می باشند و اندوکتانسهای خودی و

متقابل سیم بندیه‌های استاتور (بدون اثر شیار) ثابت است. در حالت خروج از مرکزیت پویا نیز عکس این حالت است. یعنی اندوکتانس‌های خودی و متقابل استاتور تابعی از θ_r می‌باشند ولی اندوکتانس‌های خودی و متقابل حلقه‌های رتور (بدون اثر شیار) ثابت است. تغییرات جزئی و متناوبی که در شکل (۳-۲) مشاهده می‌شود، اثر شیارهای استاتور و رتور می‌باشد.



شکل ۳-۲- اندوکتانس خودی فاز a استاتور نسبت به موقعیت زاویه ای رتور در دو حالت خروج از مرکزیت ایستا(بالا) و پویا (پایین).

شکل (۳-۲)- اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور و مشتق آن را در حالت خروج از مرکزیت مرکب (SE=50% , DE=20%) بدون اثر تورب میله‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴- اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور (منحنی ضخیم) و مشتق آن (منحنی نازک)، در حالت خروج از مرکزیت مرکب (SE=50% , DE=20%) بدون اثر تورب میله ها

۲-۴- محاسبه اندوکتانسهای ماشین القایی در شرایط عدم تقارن طولی

در این بخش، اندوکتانسهای ماشین القایی قفس سنجابی سه فاز در شرایط عدم تقارن در راستای طولی محاسبه شده است.

۲-۴-۱- تورب^۱ میله های رتور

تورب میله ها در ماشینهای الکتریکی باعث می شود که شکاف هوایی در راستای طولی ماشین متغیر گردد. بنابراین برای محاسبه اندوکتانسها در این حالت باید از رابطه (۲-۳۰) استفاده کرد. برای به دست آوردن تابع فاصله هوایی می توان ماشین را در راستای محور طولی به مقاطع عرضی تقسیم بندی کرد که در هر مقطع عرضی از ماشین میله ها بدون تورب اند. موقعیت میله ها در مقاطع مختلف نسبت به موقعیت میله ها در مقطع ابتدایی در جهت مماسی جابجایی دارند که این جابجایی به موقعیت طولی آن مقطع بستگی دارد و به صورت خطی تغییر می کند. بنابر این با مشخص بودن موقعیت میله ها در مقطع ابتدایی و زاویه تورب میله ها میتوان موقعیت میله ها را در مقاطع مختلف به دست آورد. در نتیجه، تابع فاصله هوایی با اثر تورب میله ها به صورت زیر بیان می شود.

^۱ -Skew

$$g_s(\phi, z, \theta_r) = g(\phi, z, \theta_r - \frac{\lambda}{l} z) \quad (31-2)$$

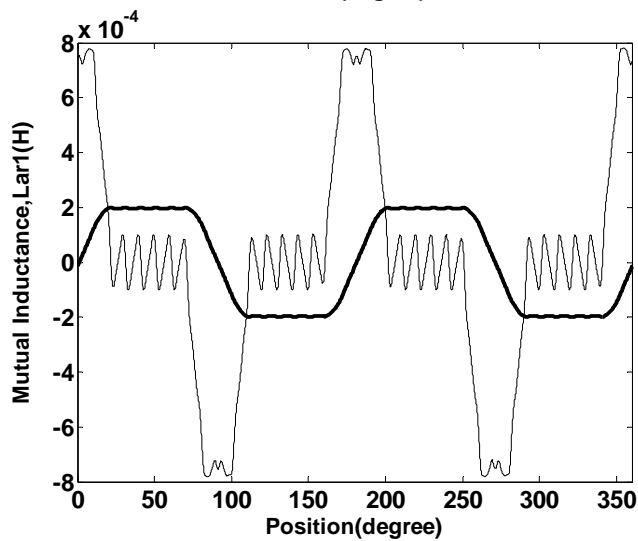
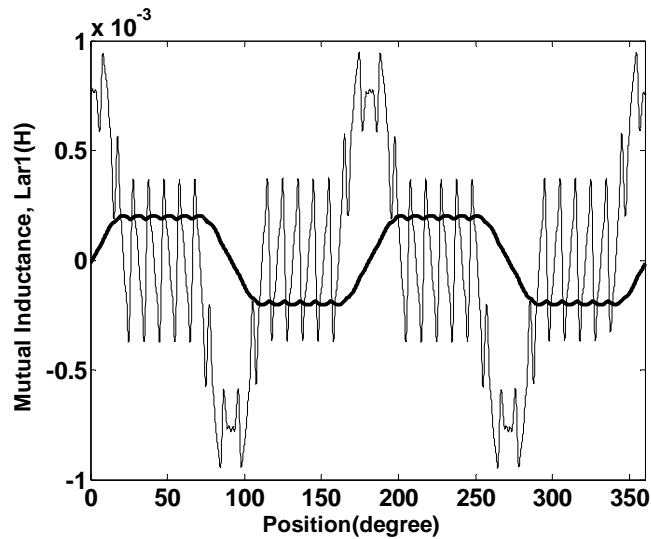
شعاع متوسط نیز برابر است با:

$$r_{av}(\phi, z, \theta_r) = r_{sta}(\phi, z) - \frac{g_s(\phi, z, \theta_r)}{2} \quad (32-2)$$

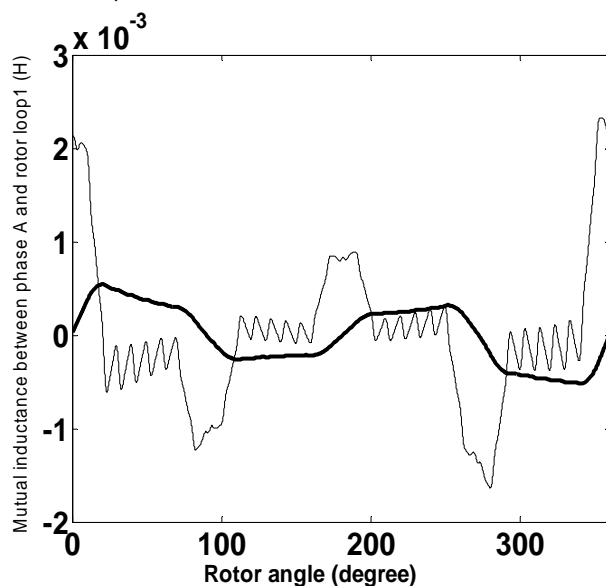
در رابطه بالا، l طول محور رتور، λ : میزان تورب میله های رتور بر حسب رادیان، θ_r : موقعیت زاویه ای رتور بر حسب رادیان، ϕ : موقعیت زاویه ای نسبت به ناظر ساکن در استاتور و $r_{sta}(\phi, z)$ تابع شعاع داخلی استاتور می باشد. به علت در نظر گرفتن اثر شیارهای استاتور، شعاع استاتور تابعی از ϕ می باشد.

در شکل (2-6) اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور، L_{ar1} ، و مشتق آن با اثر تورب میله ها و بدون اثر آن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود تورب میله ها باعث یکنواخت تر شدن شکل اندوکتانسها می شود.

در شکل (2-7) اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور و مشتق آن در حالت خروج از مرکزیت مرکب ($SE=50\%$, $DE=20\%$) با اثر تورب میله ها نشان داده شده است. نکته مهمی که باید مورد توجه قرار گیرد این است که تورب میله ها هیچ تاثیری بر روی اندوکتانسهای خودی و متقابل استاتور و همچنین اندوکتانسهای رتور ندارد. تورب میله ها فقط بر روی اندوکتانس های متقابل بین مدارهای استاتور و فازهای رتور تاثیر می گذارد.



شکل ۲-۶- اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور (L_{ar1}) و مشتق آن، بدون اثر تورب میله ها (سمت راست) و با اثر تورب میله ها (سمت چپ).

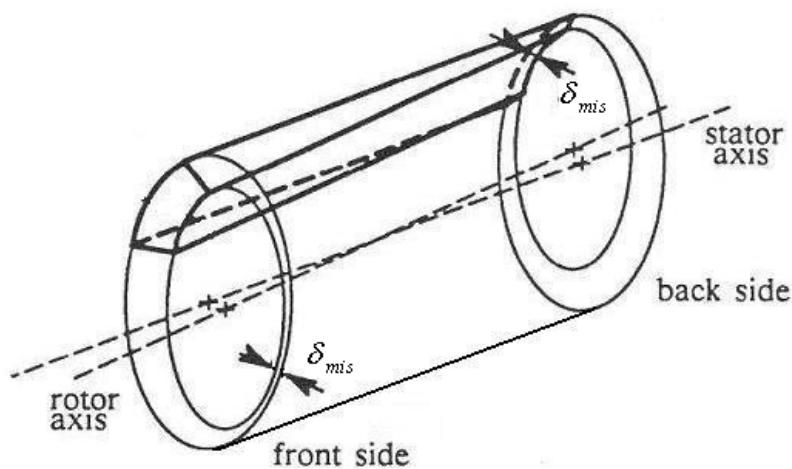


شکل ۲-۷- اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور (منحنی ضخیم) و مشتق آن (منحنی نازک)، در حالت خروج از مرکزیت مرکب (SE=50%, DE=20%) با اثر تورب میله ها

۲-۴-۲-عدم همراستایی محور رتور با استاتور

هنگام بروز عیوب مکانیکی در ماشینهای الکتریکی، که در آن انطباق محور رتور با استاتور با یکدیگر از بین رفته و فاصله هوایی بین استاتور و رتور از حالت یکنواخت خارج می شود در صورتیکه محور استاتور موازی محور استاتور باقی نماند به این پدیده عدم همراستایی^۱ گفته می شود. در این حالت محور رتور محور استاتور را در مرکز قطع می کند.

همانند پدیده خروج از مرکزیت رتور، انحراف محور رتور نیز می تواند دو وضعیت ایستا و پویا داشته باشد. در صورتیکه رتور حول محوری ساکن اما غیر همراستا با محور استاتور بچرخد، انحراف محوری ایستا رخ داده و در صورتیکه محور چرخش رتور جابجا گردد، انحراف محوری پویا رخ داده است. این پدیده را می توان حالت کلی تری از پدیده خروج از مرکزیت در نظر گرفت که در آن پارامترهای خروج از مرکزیت تابعی از متغیر زاویه ای و موقعیت طولی ماشین هستند. در نتیجه بر خلاف پدیده خروج از مرکزیت، فاصله هوایی در امتداد محور طولی ماشین ثابت نیست. پدیده عدم همراستایی در شکل (۸-۲) نشان داده شده است.

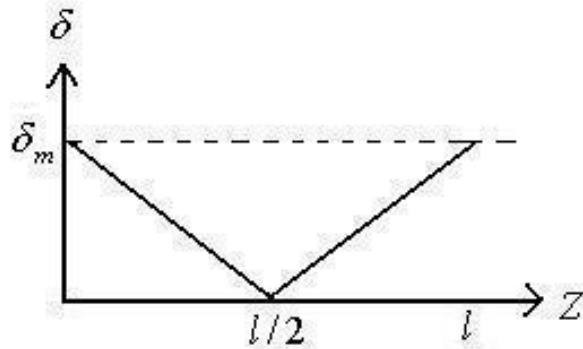


شکل (۸-۲) موقعیت محورهای استاتور و رتور در پدیده عدم همراستایی

پارامترهای خروج از مرکزیت در امتداد محور طولی ماشین به صورت خطی تغییر می کند و محورهای استاتور و رتور همدیگر را در مرکز قطع می کنند. بنابراین پارامترهای خروج از مرکزیت در مقاطع ابتدا و انتهای رتور برابر هستند و ما می توانیم میزان عدم همراستایی را با میزان خروج از

^۱ -Misalignment

مرکزیت در مقاطع ابتدا و انتها بیان کنیم (δ_{mis}). میزان خروج از مرکزیت در مقاطع مختلف به صورت شکل (۹-۲) می باشد.



شکل (۹-۲) تغییرات ضریب خروج از مرکزیت مقاطع مختلف رتور در حالت عدم همراستایی

نکته ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که موقعیت خروج از مرکزیت مقطعی که در نیمه اول رتور قرار دارند ($0 \leq Z \leq l/2$) نسبت به نیمه دوم رتور ($l/2 \leq Z \leq l$) به اندازه 180° مکانیکی انتقال می یابد. بنابراین تغییرات شکاف هوایی و ضرایب خروج از مرکزیت در مقاطع مختلف به صورت زیر می باشد:

$$0 \leq Z \leq l/2$$

$$g_{mis}(\phi, z, \theta_r) = g_h(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_s(z) \cos(\phi - \phi_0)) \quad (33-2)$$

$$\delta_s(z) = \frac{-2\delta_{mis}}{l} z + \delta_{mis} \quad (34-2)$$

$$l/2 \leq Z \leq l$$

$$g_{mis}(\phi, z, \theta_r) = g_h(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_s(z) \cos(\phi - \phi_0 + \pi)) \quad (35-2)$$

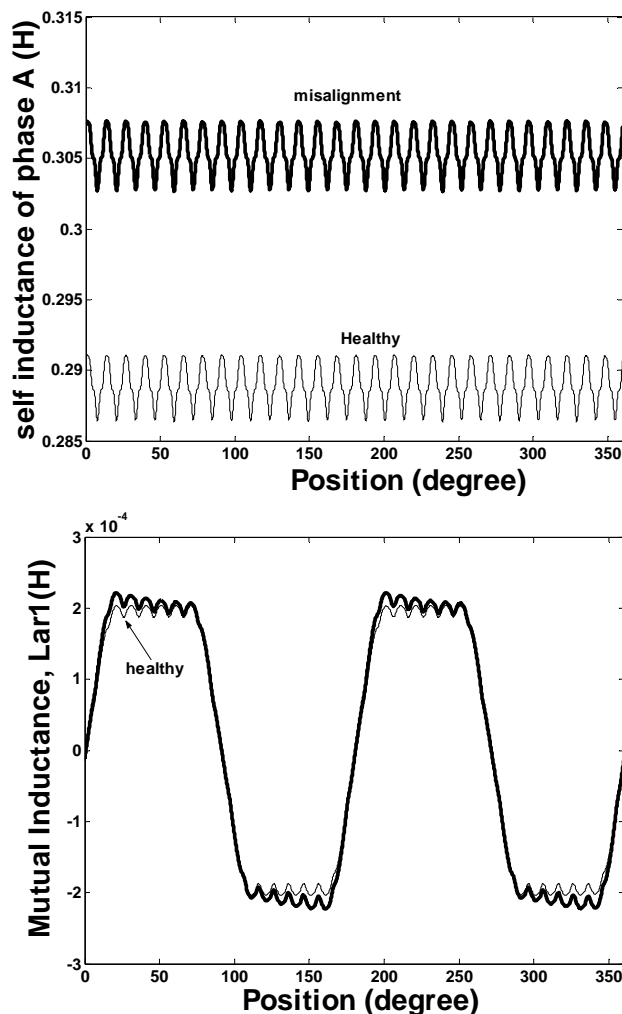
$$\delta_s(z) = \frac{\delta_{mis}(2z - l)}{l} \quad (36-2)$$

شعاع متوسط نیز برابر است با:

$$r_{av}(\phi, z, \theta_r) = r_{sta}(\phi, z) - \frac{g_{mis}(\phi, z, \theta_r)}{2} \quad (37-2)$$

در این معادلات، ϕ_0 موقعیت خروج از مرکزیت مقاطع در نیمه اول رتور می باشد.

در شکل (۲-۱۰) اندوکتانسهای ماشین القایی در حالت عدم همراستایی با حالت سالم مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود در حالت عدم همراستایی اندازه اندوکتانس خودی فاز a استاتور افزایش می یابد. همچنین منحنی تغییرات اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور نا متقارن می شود.



شکل (۲-۱۰) - اندوکتانسهای ماشین القایی در دو حالت سالم و عدم همراستایی $\delta_{mis} = 50\%$ - سمت راست:

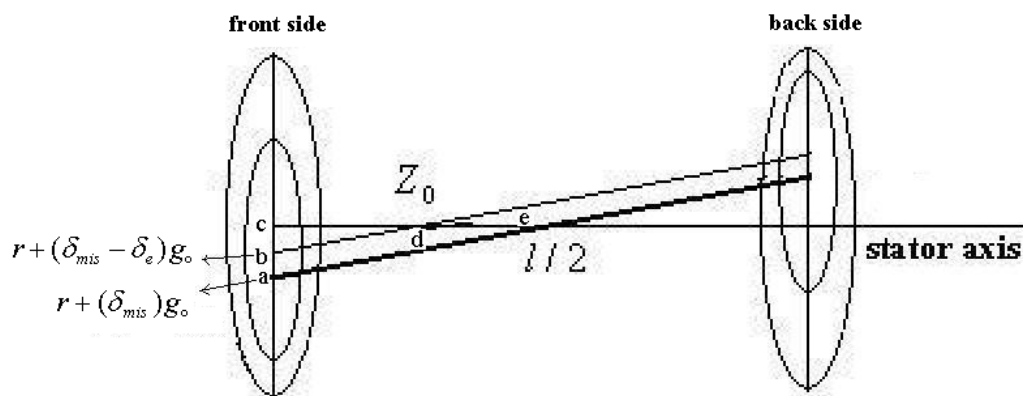
اندوکتانس خودی فاز a استاتور - سمت چپ: اندوکتانس متقابل بین حلقه اول رتور و فاز a استاتور

۲-۴-۳- مدل سازی در حالت کلی جابجایی محور رتور^۱

در اثر عیوب بلبرینگها، محور و اتصالات، محور رتور از حالت عادی منحرف می شود. در اثر انحراف محور رتور در حالت کلی محور رتور موازی محور استاتور باقی نمی ماند و آن را قطع می

^۱ - Rotor Displacement

کند. محل تقاطع نیز در مرکز قرار ندارد. برای مدل‌سازی این گونه عدم تقارن، می‌توان این پدیده را عدم همراستایی توام با خروج از مرکزیت در نظر گرفت. در این حالت محور رتور نسبت به حالت عدم همراستایی جابجا می‌شود به طوری‌که با آن موازی باقی می‌ماند. در این تحلیل δ_{mis} ، میزان عدم همراستایی و δ_e میزان خروج از مرکزیت بر حسب درصد می‌باشد. برای مدل‌سازی جابجایی محور رتور کفایت این دو پارامتر محاسبه شوند. این پدیده در شکل (۲-۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۱- موقعیت محور رتور در پدیده انحراف محوری نسبت به حالت عدم همراستایی.

فرض می‌کنیم علاوه بر عدم همراستایی، میزان خروج از مرکزیت بر حسب درصد δ_e باشد. در این صورت محور رتور نسبت به حالت عدم همراستایی به اندازه $\delta_e \times g_0$ جابجا می‌شود. g_0 طول شکاف هوایی می‌باشد. محل تقاطع محور رتور با محور استاتور نیز در نقطه ای با موقعیت Z_0 می‌باشد. در این شرایط توابع شکاف هوایی و ضریب خروج از مرکزیت به صورت زیر می‌باشد.

$$0 \leq Z \leq Z_0$$

$$g_d(\phi, z, \theta_r) = g_h(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_s(z)\cos(\phi - \phi_0)) \quad (2-38)$$

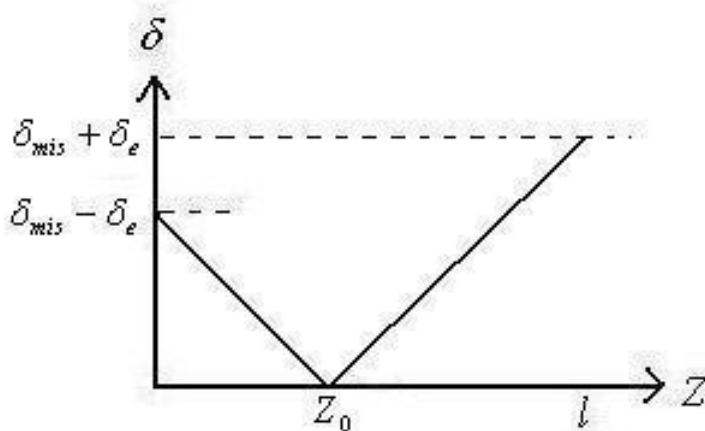
$$\delta_s(z) = \frac{\delta_{mis} - \delta_e}{Z_0} z + \delta_{mia} - \delta_e \quad (2-39)$$

$$Z_0 \leq Z \leq l$$

$$g_d(\phi, z, \theta_r) = g_h(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_s(z)\cos(\phi - \phi_0 + \pi)) \quad (2-40)$$

$$\delta_s(z) = \frac{\delta_{mis} + \delta_e}{l - Z_0}(Z - Z_0) \quad (2-41)$$

شکل (۱۲-۲) تغییرات ضریب خروج از مرکزیت مقاطع مختلف را بر حسب موقعیت طولی نشان می دهد.



شکل ۱۲-۲- تغییرات ضریب خروج از مرکزیت مقاطع مختلف رتور بر حسب موقعیت طولی رتور در حالت انحراف محور رتور

برای تعیین موقعیت Z_0 شکل (۱۱-۲) را در نظر می گیریم. با توجه به تشابه دو مثلث ace, bcd داریم:

$$\frac{Z_0}{l/2} = \frac{r + (\delta_{mis} - \delta_e)g_0}{r + (\delta_{mis})g_0} \quad (۴۲-۲)$$

بنابراین:

$$Z_0 = \frac{l}{2} \frac{r + (\delta_{mis} - \delta_e)g_0}{r + (\delta_{mis})g_0} \quad (۴۳-۲)$$

که در آن r شعاع رتور و g_0 طول شکاف هوایی می باشد.

در صورتیکه جابجایی دو انتهای رتور نسبت به حالت سالم به یک طرف استاتور باشد، یعنی حداقل شکاف هوایی در دو انتهای رتور در یک طرف استاتور باشد، محور رتور محور استاتور را قطع نمی کند. در این صورت میزان خروج از مرکزیت از ابتدا تا انتهای رتور به صورت زیر تغییر می کند:

$$\delta_s(z) = \frac{\delta_{back} - \delta_{front}}{l} Z + \delta_{front} \quad (۴۴-۲)$$

که در آن δ_{back} و δ_{front} به ترتیب میزان خروج از مرکزیت در دو انتهای رتور است که بیشترین و کمترین عدم تقارن را دارد. این دو پارامتر از معلومات مساله هستند. با اندازه گیری شکاف هوایی در دو انتهای رتور می توان به راحتی میزان خروج از مرکزیت در دو انتهای رتور را مشخص کرد. حال

کافیست ضرایب خروج از مرکزیت و عدم همراستایی تعیین شوند. برای تعیین ضرایب خروج از مرکزیت (δ_e) و عدم همراستایی (δ_{mis}) از روابط زیر استفاده می کنیم:

$$\delta_{front} = \delta_e - \delta_{mis} \quad (۴۵-۲)$$

$$\delta_{back} = \delta_e + \delta_{mis} \quad (۴۶-۲)$$

در صورتیکه جابجایی دو انتهای رتور نسبت به حالت سالم به یک طرف استاتور باشد، هر دو مقدار مثبت و در غیر این صورت δ_{front} منفی انتخاب می شود.

به عنوان مثال فرض کنیم که بر اثر خرابی بلبرینگها و اتصالات یک طرف رتور نسبت به حالت سالم به اندازه ۲۰٪ به طرف پایین و طرف دیگر ۸۰٪ بالا رفته باشد. در این صورت داریم:

$$\delta_{front} = \delta_e - \delta_{mis} = -0.2$$

$$\delta_{back} = \delta_e + \delta_{mis} = 0.8$$

در نتیجه:

$$\delta_{mis} = 0.5$$

$$\delta_e = 0.3$$

اگر هر دو طرف رتور به همان نسبتها به یک طرف جابجا شده باشند در این صورت داریم:

$$\delta_e - \delta_{mis} = 0.2$$

$$\delta_e + \delta_{mis} = 0.8$$

بنابراین:

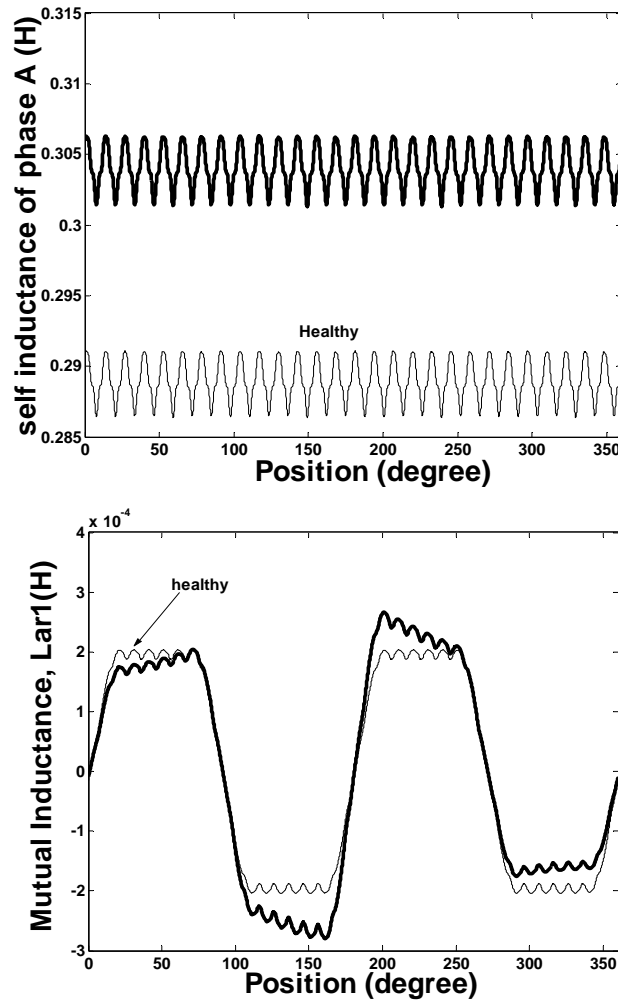
$$\delta_{mis} = 0.3, \delta_e = 0.5$$

بعد از محاسبه این دو پارامتر، توابع شکاف هوایی و شعاع متوسط قابل محاسبه اند.

حالتی که در بالا مورد بررسی قرار گرفت انواع عدم تقارن ناشی از عیوب یاتاقان، بلبرینگها و اتصالات را در بر می گیرد. جهت مدلسازی انواع عدم تقارن شکاف هوایی با استفاده از روابط (۲-۳۸) تا (۲-۴۶)، فقط کافیست با توجه به میزان و چگونگی عدم تقارن در ابتدا و انتهای رتور،

ضرایب خروج از مرکزیت (δ_e) و عدم همراستایی (δ_{mis}) با استفاده از روابط (۲-۴۵) و (۲-۴۶) محاسبه شوند.

در شکل (۲-۱۳) اندوکتانسهای ماشین القایی در حالت انحراف محور رتور با حالت سالم مقایسه شده است.



شکل ۲-۱۳- اندوکتانسهای ماشین القایی در دو حالت سالم و انحراف محور رتور ($\delta_{front} = 0\%$ و $\delta_{back} = 50\%$) - سمت راست: اندوکتانس خودی فاز a استاتور-سمت چپ: اندوکتانس متقابل بین حلقه اول رتور و فاز a استاتور

مشاهده می شود با منحرف شدن محور رتور اندوکتانس خودی فاز a استاتور افزایش می یابد. از مقایسه این شکل با شکل (۲-۱۰) متوجه می شویم که در حالت انحراف نسبت به حالت عدم همراستایی، عدم تقارن در منحنی تغییرات اندوکتانس متقابل افزایش می یابد. بنابر این اگر دو انتهای

رتور به یک اندازه و در جهات مخالف یکدیگر جابجا شوند، عدم تقارن ناچیزی در منحنی اندوکتانس ایجاد می شود.

۲-۴-۴- انحناى محور رتور^۱

در ماشینهای الکتریکی با طول زیاد، جرم زیاد رتور و نیروهای نامتعادل مغناطیسی ممکن است باعث انحنای محور رتور شود. انحنای محور رتور عامل دیگر ایجاد فاصله هوایی نا یکنواخت در ماشینهای الکتریکی است. در این حالت نیز مانند عدم همراستایی محور رتور، هر مقطع دایره ای از ماشین مانند یک خروج از مرکزیت با پارامترهای مربوط به خود است که این پارامترها نسبت به جابجایی توام در امتداد محور طولی و در جهت مماسی متغیر هستند. اما این تغییرات به صورت خطی نیست. در این تحقیق برای مدلسازی تغییرات شکاف هوایی در راستای محور طولی تابع سینوسی انتخاب شده است که نسبت به تابع خطی تطابق بیشتری با واقعیت دارد.

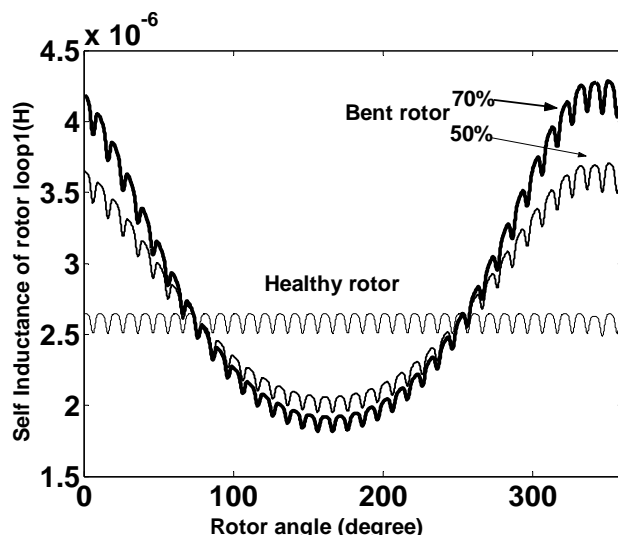
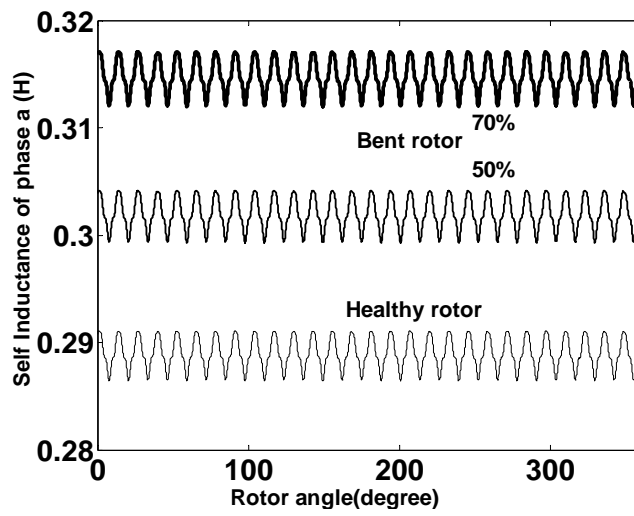
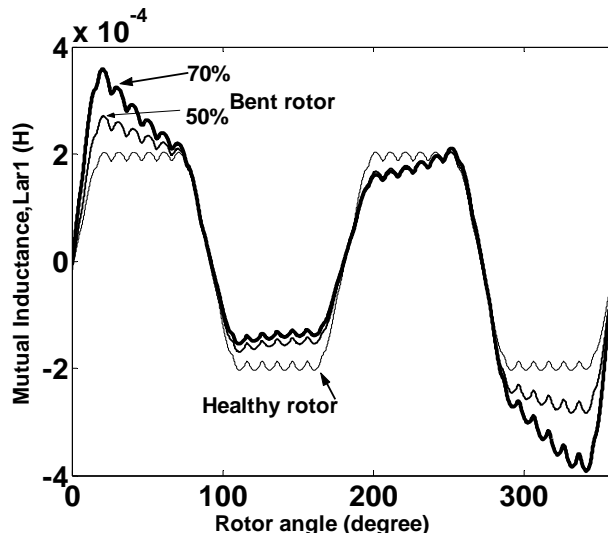
$$g_b(\phi, z, \theta_r) = g_h(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_s(z)\cos(\phi - \phi_0)) \quad (۴۷-۲)$$

$$r_{av}(\phi, z, \theta) = r_{sta}(\phi, z) - \frac{g_b(\phi, z, \theta_r)}{2} \quad (۴۸-۲)$$

$$\delta_s(z) = \delta_m \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \quad (۴۹-۲)$$

در روابط بالا، l طول رتور و δ_m میزان خروج از مرکزیت رتور در وسط رتور، $z = \frac{l}{2}$ بر حسب درصد می باشد. در شکل (۲-۱۴) اندوکتانسها در حالت انحنای محور رتور با حالت سالم مقایسه شده است.

^۱ -Bent-rotor



شکل ۲-۱۴- اندوکتانسهای موتور القایی در حالت سالم و انحنای محور رتور ($\delta_m = 50\%, 70\%$). از بالا به پایین: اندوکتانس متقابل بین حلقه اول رتور و فاز a، اندوکتانس خودی فاز a استاتور و اندوکتانس خودی حلقه اول رتور.

همان طور که مشاهده می شود همانند حالت خروج از مرکزیت ایستا فقط اندوکتانس خودی فاز a استاتور ثابت است و بقیه اندوکتانسها تابعی از θ_r می باشد. البته با در نظر گرفتن شیارهای استاتور و رتور، اندوکتانس خودی سیم بندی استاتور کاملاً ثابت نیست و تغییرات جزئی و متناوب دارد.

۲-۵- نتیجه گیری

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که در حالت عدم همراستایی ایستا و انحنای محور رتور فقط اندوکتانس های متقابل و خودی فازهای استاتور ثابت است و بقیه اندوکتانسها تابعی از موقعیت زاویه ای رتور هستند. در حالت عدم همراستایی پویا نیز همه اندوکتانسها تابعی از موقعیت زاویه ای رتور هستند. تورب میله های رتور در همه شرایط سالم و ناسالم، فقط بر روی اندوکتانسهای متقابل بین استاتور و رتور تاثیر می گذارد و آن را یکنواخت تر می کند.

شبیه سازی ماشین القایی قفس سنجابی سه فاز در شرایط خطا

۱-۳- مقدمه

برای شبیه سازی ماشینهای الکتریکی در فضای حقیقی بایستی ابتدا معادلات دیفرانسیل الکتریکی و مکانیکی توصیف کننده رفتار ماشین به دست آیند. سپس با حل همزمان این معادلات دیفرانسیل، رفتار دینامیکی ماشین حاصل گردد. برای نوشتن معادلات دیفرانسیل الکتریکی، هر سیم بندی که حامل جریان مستقلی است به صورت یک مدار الکتریکی فشرده در نظر گرفته شده که علاوه بر داشتن مقاومت الکتریکی و اندوکتانس خودی، با سایر مدارها نیز القاء متقابل دارد.

۳-۵- نتایج شبیه سازی

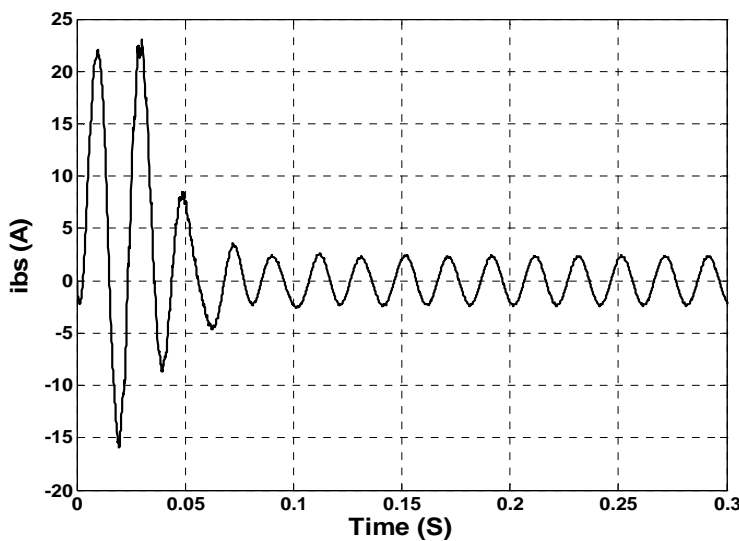
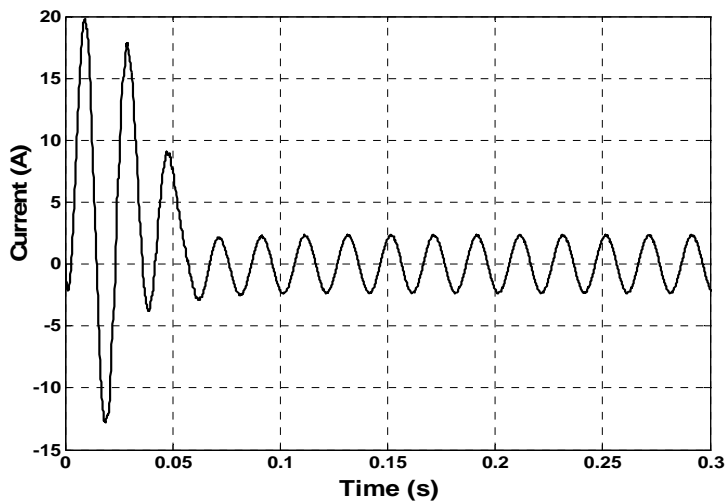
در این بخش موتور در حالت سالم و عدم همراهی با استفاده از روش تابع سیم پیچ اصلاح شده و مدل پیشنهادی شبیه سازی شده است. موتور مورد نظر جهت شبیه سازی، موتور القایی قفس سنجابی سه اسب، ۳۸۰ ولت، چهار قطب، سه فاز با اتصال ستاره ساخت شرکت موتوژن می باشد. معادلات دیفرانسیل حاکم بر ماشین القایی که در بخشهای گذشته بدست آورده شد می بایست توسط یکی از روش های عددی حل شوند. روش مورد استفاده در این رساله، روش رانگ-کوتا مرتبه چهارم و پنج می باشد.

ماتریس اندوکتانس متقابل استاتور و رتور تابعی از موقعیت رتور می باشد. به همین دلیل مقادیر آن در هر تکرار باید تجدید شوند. به علت وجود شیارها بر روی رتور و استاتور، فاصله هوایی ثابت نیست. بنابراین ماتریس های اندوکتانسهای رتور و استاتور نیز با موقعیت رتور تغییر می کنند. بنابراین این ماتریسها نیز در هر گام شبیه سازی باید محاسبه شوند. اگرچه این اندوکتانسها را می توان در هر تکرار و موقعیت خاص رتور در داخل برنامه حل عددی معادلات دیفرانسیل محاسبه کرد، اما این کار وقت بسیار زیادی از محاسبات را به خود اختصاص می دهد. به همین دلیل بهتر است قبل از حل معادلات، اندوکتانسها را بدست آورد و در برنامه حل عددی معادلات دیفرانسیل، توسط میانبندی خطی، ماتریسهای L_{sr} , L_{rr} و L_{ss} را تشکیل داد. در روش عددی برای هر اندوکتانس برداری حاصل می گردد که هر درایه آن مقدار اندوکتانس در یک موقعیت زاویه ای از رتور است. موقعیتهایی که در

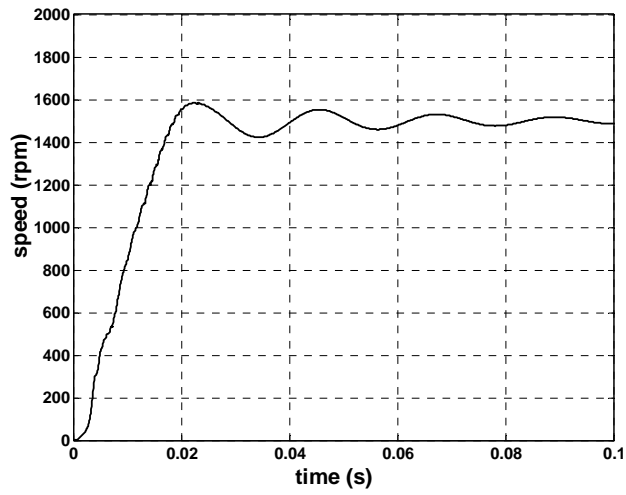
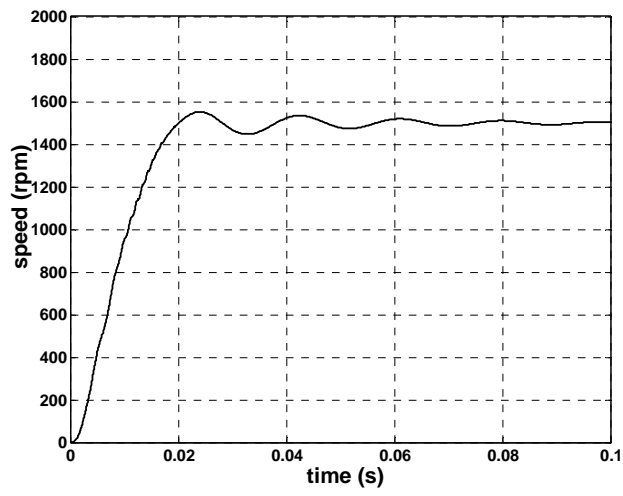
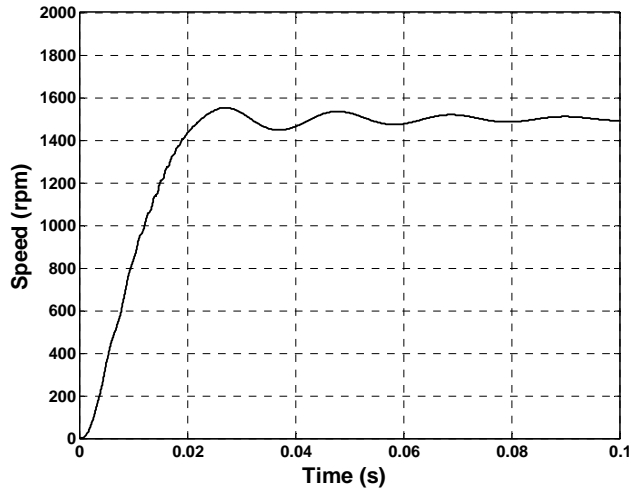
آن لازم است اندوکتانسها محاسبه شوند به صورت برداری به عنوان ورودی به برنامه داده می شود. لذا با هر ترتیبی می توان جدول اندوکتانس را تشکیل داد و در زوایایی که اندوکتانس دارای تغییرات بیشتری است در آن نواحی تعداد نقاط بیشتری در نظر گرفته شود.

شکل (۱-۳) جریان یک فاز موتور مورد نظر را در حالت راه اندازی بدون بار برای دو حالت سالم و جابجایی محور رتور ($\delta(0)=0.1$ و $\delta(l)=0.3$) نشان می دهد.

شکل (۲-۳)، سرعت موتور هنگام راه اندازی بدون بار در سه حالت را نشان می دهد. حالت اول، سالم و دو حالت دیگر حالات عدم همراستایی می باشد. میزان عدم همراستایی ۲ بیشتر از عدم همراستایی ۱ می باشد. در حالت عدم همراستایی ۱، $\delta(0)=0.1$ و $\delta(l)=0.3$ می باشد. در حالت عدم همراستایی ۲ نیز، $\delta(0)=0.1$ و $\delta(l)=0.7$ می باشد.



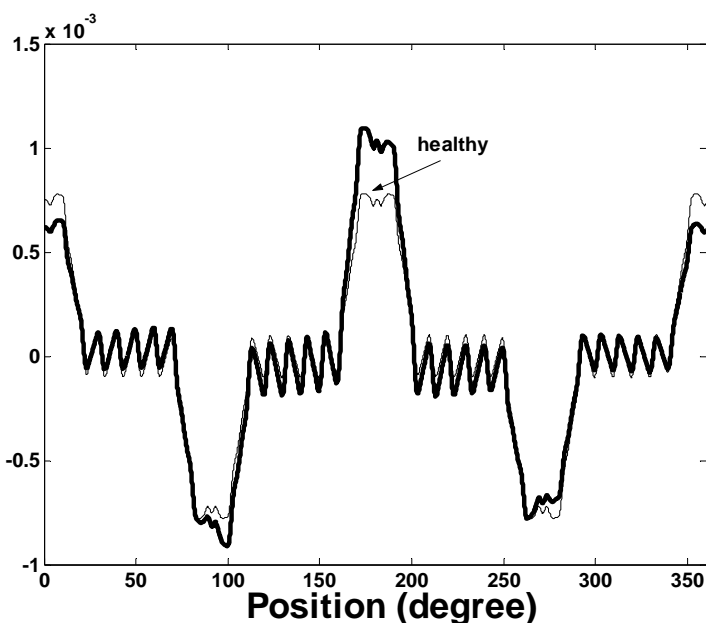
شکل ۱-۳- جریان راه اندازی یک فاز موتور القایی در حالات سالم (بالا) و جابجایی محور رتور (پایین)



شکل ۳-۲- سرعت موتور هنگام راه اندازی بدون بار- بالا به پایین: سالم, عدم همراستایی ۱ و عدم همراستایی ۲ (نتایج شبیه سازی).

همان طور که مشاهده می شود در حالت عدم همراستایی نسبت به حالت سالم موتور سریعتر به سرعت نامی می رسد. همچنین هرچه میزان عدم همراستایی و در نتیجه میزان عدم تقارن بیشتر باشد گشتاور راه اندازی بیشتر بوده و موتور سریعتر به سرعت نامی می رسد. این پدیده مربوط به افزایش مشتق اندوکتانس متقابل (L_{sr}) در حالت عدم همراستایی می باشد. زیرا گشتاور الکترومغناطیسی به مشتق اندوکتانس متقابل (L_{sr}) بستگی دارد. با افزایش مشتق اندوکتانس متقابل (L_{sr})، نرخ تغییرات انرژی و در نتیجه گشتاور الکترومغناطیسی نسبت به حالت سالم افزایش می یابد.

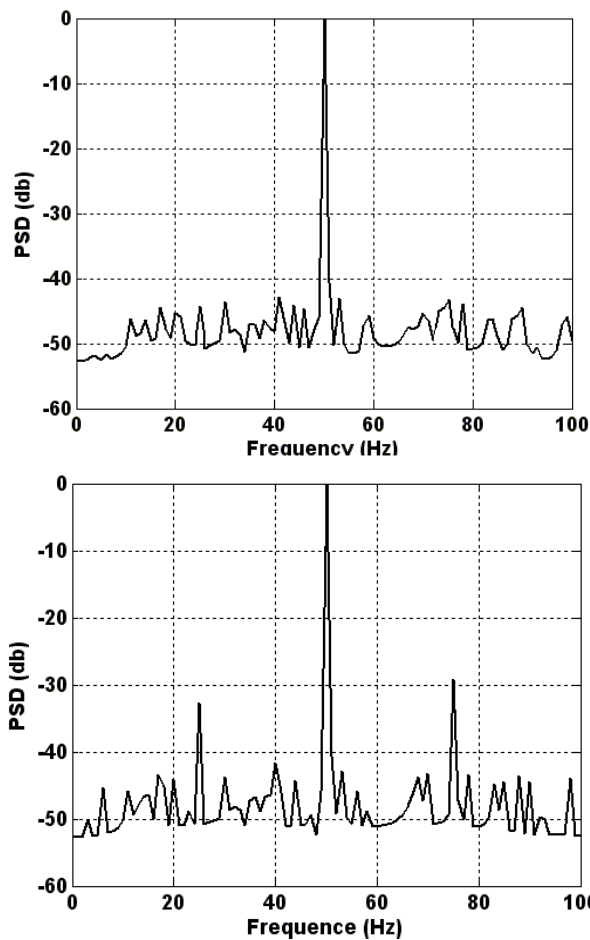
در شکل (۳-۳) مشتق اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور در حالت عدم همراستایی با حالت سالم مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود در حالت عدم همراستایی مشتق اندوکتانس افزایش می یابد.



شکل ۳-۳- مشتق اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور در دو حالت سالم و عدم همراستایی.

پس از این که موتور به حالت ماندگار رسید، گشتاوری معادل هفت نیوتن متر به موتور اعمال شد. شبیه سازی موتور به مدت یک ثانیه در حالت ماندگار ادامه یافت تا بتوانیم طیف فرکانسی با دقت یک هرتز داشته باشیم. شکل (۴-۳) طیف جریان استاتور در حالت ماندگار را در دو حالت سالم و

جابجایی محور رتور نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود مولفه های فرکانسی در حالت خطا اطراف ۲۵ هرتز و ۷۵ هرتز وجود دارد.



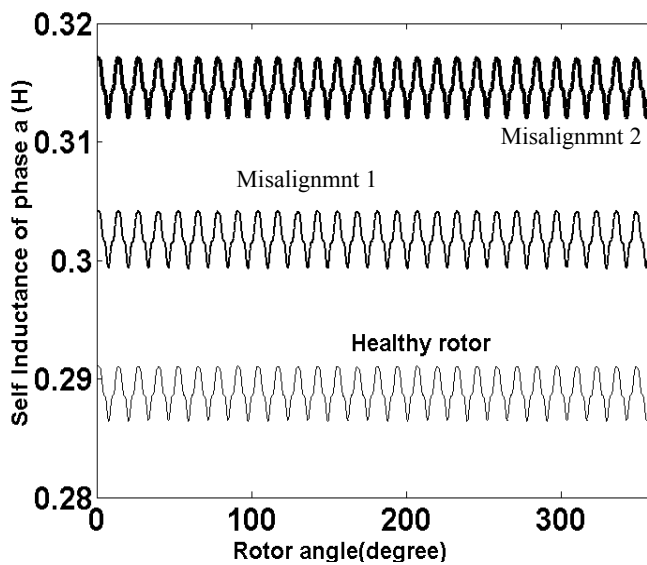
شکل (۳-۴) طیف جریان استاتور در حالت ماندگار برای دو حالت سالم (بالا) و جابجایی محور رتور (پایین)

جدول ۱-۳ تغییرات ضریب توان موتور در حالت بی باری در شرایط جابجایی و عدم همراستایی نشان می دهد.

جدول ۱-۳-۱ تغییرات ضریب توان موتور در حالت بی باری در شرایط جابجایی و عدم همراستایی (شبه سازی)

موتور سالم	۰/۳۶
عدم همراستایی ۱	۰/۳۷۶
عدم همراستایی ۲	۰/۳۹۴

همانطور که مشاهده می شود تغییرات ضریب توان با افزایش میزان عدم همراستایی قابل ملاحظه است. این پدیده از قبل نیز مورد انتظار بود. شکل (۳-۵) تغییرات اندوکتانس خودی یک فاز استاتور را برای حالت سالم و عدم همراستایی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش میزان عدم همراستایی، اندازه اندوکتانس خودی فاز a استاتور افزایش می یابد. افزایش اندوکتانس خودی فازهای استاتور به منزله افزایش اندوکتانس مغناطیس کنندگی ماشین است که منجر به افزایش ضریب قدرت ماشین می شود [۴۱].



شکل ۳-۵- تغییرات اندوکتانس خودی یک فاز استاتور در حالت سالم، عدم همراستایی ۱ و عدم همراستایی ۲.

۳-۶- نتایج آزمایشگاهی

۳-۶-۱- تغییرات گشتاور راه اندازی

جهت اعمال حالت عدم همراستایی ۱ ($\delta(0)=0.1$ و $\delta(l)=0.3$) یک طرف رتور به اندازه ده درصد شکاف هوایی و طرف دیگر به اندازه سی درصد شکاف هوایی جابجا شد. در حالت عدم همراستایی ۲ ($\delta(0)=0.1$ و $\delta(l)=0.7$) نیز یک طرف رتور به اندازه ده درصد شکاف هوایی و طرف دیگر به اندازه هفتاد درصد شکاف هوایی جابجا شد.

شکل (۷-۳) سرعت موتور هنگام راه اندازی بدون بار در حالت سالم و دو حالت عدم همراهی نشان می دهد. مدت زمان رسیدن موتور به سرعت بیشینه برای موتور سالم ۲۴/۷ میلی ثانیه، عدم همراهی ۱، ۲۱/۸ میلی ثانیه و برای عدم همراهی ۲، ۲۱ میلی ثانیه می باشد. مشاهده می شود که هر چه جابجایی محور رتور و در نتیجه عدم تقارن بیشتر باشد گشتاور راه اندازی افزایش می یابد. این پدیده در شبیه سازیها نیز مشاهده شد.

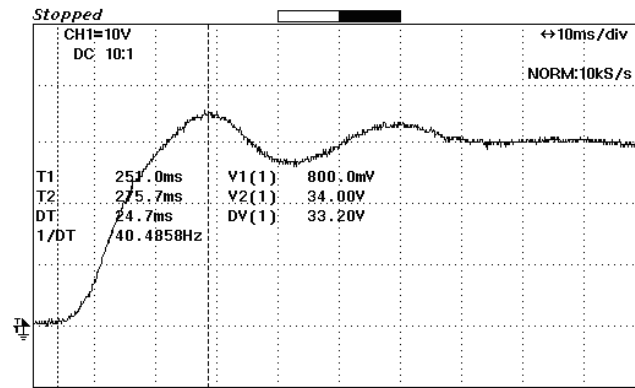
۳-۶-۲- تغییرات ضریب توان

به منظور بررسی تغییرات ضریب توان، بر روی موتور القایی سه اسب، یک آزمایش در حالت سالم و دو آزمایش در حالت عدم همراهی انجام شد. همه آزمایشها در حالت بی باری انجام شده است. نتایج آزمایش در جدول (۲-۳) ارائه شده است.

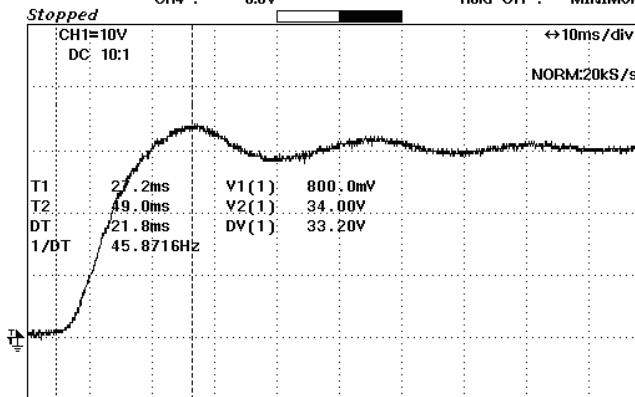
جدول ۲-۳- تغییرات ضریب توان موتور در حالت بی باری در شرایط سالم و عدم همراهی

موتور سالم	۰/۳۰۱
عدم همراهی ۱	۰/۳۲۵
عدم همراهی ۲	۰/۳۳۴

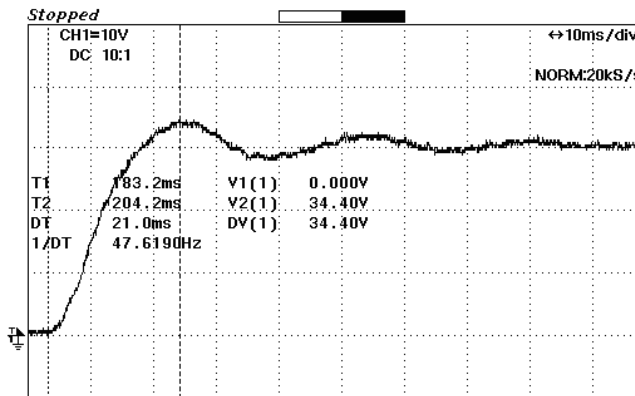
همانطور که مشاهده می شود تغییرات ضریب توان با افزایش میزان عدم همراهی قابل ملاحظه است. با توجه به این که تغییرات ضریب توان با افزایش میزان عدم همراهی قابل ملاحظه است، می توان از این روش جهت تشخیص خطای عدم همراهی رتور استفاده کرد.



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : -0.1V Main : 10K Mode : AUTO
BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 1K Type : EDGE CH1 ⌵
 CH3 : 0.0V Delay : 0.0ns
 CH4 : 0.0V Hold Off : MINIMUM



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : -0.1V Main : 10K Mode : AUTO
BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 2K Type : EDGE CH1 ⌵
 CH3 : 0.0V Delay : 0.0ns
 CH4 : 0.0V Hold Off : MINIMUM



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : -0.1V Main : 10K Mode : AUTO
BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 2K Type : EDGE CH1 ⌵
 CH3 : 0.0V Delay : 0.0ns
 CH4 : 0.0V Hold Off : MINIMUM

شکل ۳-۷- سرعت موتور با راه اندازی بدون بار-بالا به پایین: سالم، عدم همراستایی ۱ و عدم همراستایی ۲ (نتایج آزمایشگاهی)

۳-۷- نتیجه گیری

نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی نشان می دهد که در حالت عدم همراهی، نوسانات گشتاور راه اندازی افزایش می یابد. تغییرات ضریب توان موتور نیز مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد در حالت عدم همراهی نسبت به حالت سالم ضریب توان موتور افزایش می یابد. با توجه به این که تغییرات ضریب توان با افزایش میزان عدم همراهی قابل ملاحظه است، از این روش می توان جهت تشخیص این نوع خطا استفاده کرد.

انواع روشهای شبیه سازی [2]

یکی از روشهایی که برای تحلیل ماشینهای الکتریکی وجود دارد، روش مبتنی بر تبدیلات ریاضی است. روش تئوری جامع ماشینهای الکتریکی از جمله تبدیلات ریاضی می باشد. در تبدیلهای ریاضی پارامترهای ماشین در فضای حقیقی با ماتریسهای انتقال به فضای مجازی منتقل می شوند. این انتقالها در بعضی حالات شکلی ساده تر به خود می گیرند. لذا حل معادلات در آن حوزه آسانتر خواهد شد. پس از به دست آوردن پارامترهای ماشین در فضای جدید با عکس انتقال انجام شده پارامترهای ماشین در حوزه زمان حاصل می گردند. در مورد برخی ماشینها در شرایط مقارن و با قبول برخی تقریبهها مدل ساده ای به دست می آید و به راحتی توسط تبدیلهای ریاضی مناسب به مجموعه ساده تری از معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل می شود. مدل حالت دائمی ماشین از این معادلات استخراج می شود. استفاده از تبدیلات ریاضی در تحلیل ماشینهای الکتریکی باعث کاهش قابل ملاحظه ای در حجم محاسبات شبیه سازی می گردد. به منظور این که مدل ماشین به واقعیت نزدیکتر باشد باید اثراتی چون اشباع هسته، شکل و نوع شیارها، تورب میله ها، جریانهای بین میله ای و شرایط انواع خطاهای مختلف در آن منظور شود. مدلسازی دقیق ماشینهای الکتریکی با استفاده از تبدیلات ریاضی در بسیاری از موارد غیر ممکن است. روشهای تحلیلی که از تبدیلات ریاضی استفاده می کنند با قبول فرضیات زیادی عملاً قادر به تحلیل دقیق ماشینهای الکتریکی به ویژه در شرایط خطا نیستند. در تحلیل کلاسیک ماشین القایی توزیع سیم بندیها سینوسی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته بی نهایت فرض می شود. همچنین از اثر شیارها صرف نظر می شود. بنابراین نیروی محرکه مغناطیسی و چگالی فوران ایجاد شده توسط هر سیم بندی نسبت به مکان به صورت توابع سینوسی بدست می آیند. در این تحلیلها، فاصله هوایی ماشین یکنواخت فرض می شود، سیم بندیها سینوسی فرض شده، از هارمونیکهای فضایی حاصل از توزیع سیم بندی و نایکنواختی شکاف هوایی صرف نظر می شود، هسته مغناطیسی خطی فرض می شود و بسیاری فرضیات دیگر. این روشها قادر به تحلیل دقیق ماشینهای الکتریکی به ویژه در شرایط خطا نیستند.

در مقابل، روشهای تحلیل میدان مغناطیسی مانند روش اجزای محدود¹ (FE) رفتار غیر خطی ماده مغناطیسی ماشین و اثرات شیارهای استاتور و روتور را به خوبی مدل می کنند. این روشها با داشتن دقت قابل قبول، دارای سرعت بسیار کم و حافظه مورد نیاز بسیار بالایی هستند و به راحتی نمی توان در تحلیل حالت گذرا استفاده کرد. یکی دیگر از روشهای تحلیل ماشینهای الکتریکی، روش مدار معادل مغناطیسی² (MEC) است. در این روش برای تمامی قسمت‌های ماشین مدار معادل مغناطیسی ارائه می شود. تعداد اجزای به کار رفته در این روش به مراتب کمتر از تعداد اجزای محدود است. در نتیجه دقت و حجم محاسبات کمتر است. روش دیگری که در شبیه سازی ماشینهای الکتریکی تحت شرایط مختلف از آن استفاده شده است، روش تابع سیم پیچ³ (WF) نام دارد. روش "تابع سیم پیچ"، روش تحلیلی است که در فضای حقیقی، ماشین را مدلسازی می کند و در شبیه سازی حالات گذرای ماشینهای الکتریکی تحت شرایط مختلف از آن استفاده شده است. این روش با فرضیات اولیه اش روش تابع سیم پیچ کلاسیک نامیده شده است. این روش بر مبنای محاسبه اندوکتانسهای ماشین و استفاده از آنها در تشکیل معادلات توزیع الکترومغناطیسی بین رتور و استاتور به تحلیل موتور می پردازد و نسبت به روشهای میدانی حجم محاسباتی و حافظه مورد نیاز کمتر و نسبت به تبدیلهای ریاضی از دقت بیشتری برخوردار است. با توجه به این که در روش تابع سیم پیچ، هیچ محدودیتی در نحوه سیم بندی استاتور و قرار گرفتن میله های رتور و شیارهای استاتور وجود ندارد، تمام هارمونیکهای فضایی حاصل از توزیع سیم بندی و هارمونیکهای شیار در مدلسازی وارد می شود.

از میان روشهایی که برای تحلیل رفتار ماشینهای الکتریکی در شرایط خطا استفاده شده است، دو روش FE و WF بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته و کارآیی آنها بیشتر به اثبات رسیده است. در روش FE به تحلیل مغناطیسی دقیق آهن ماشین می رسیم که این نکته در فرآیند طراحی ماشین بسیار مفید می باشد. اما به علت زمانبری الگوریتم های به کار رفته در آن به راحتی نمی توان در تحلیل حالات گذرا و شرایط خطا به ویژه در شرایطی که ماشین در ارتباط با تجهیزات دیگر کار می کند استفاده کرد. در مواردی که

¹Finite Element (FE)

²Magnetic Equivalent Circuit (MEC)

³-Winding Function (WF)

ماشین با انواع بارها، اتصالات، منابع تغذیه و انواع سیستمهای محرکه کار می کند، روش تابع سیم پیچ این قابلیت را دارد که موثرتر و مفیدتر واقع شود.

هر روش با توجه ویژگیهای ذاتی خود، مستقل از قدرت و سرعت پردازنده، در حوزه خاصی از مسائل کاربرد موثرتری دارد. برای مثال روشهای مبتنی بر محاسبه میدان به خاطر تحلیل مغناطیسی دقیق قسمتهای آهنی ماشین با در نظر گرفتن اثرات اشباع، جریان فوکو، هیستریزیس، پدیده تراوش، توزیع جریان و حتی در نظر گرفتن مسائل انتقال حرارت و تنشهای مکانیکی در فرآیند طراحی ماشین بسیار مفید و موثر می باشند. روش تابع سیم پیچ و نظایر آن برای تحلیل حالت گذرا و دینامیک ماشین ها در ارتباط با تجهیزات دیگر نظیر انواع بارها، اتصالات، سیستمهای محرکه و منابع تغذیه در حالات و شرایط مختلف سالم و با وجود خطا مناسب می باشند. استفاده از تبدیلهای ریاضی و مدارهای معادل نیز برای تحلیل ماشین های الکتریکی، به عنوان جزء کوچکی از سیستمهای بزرگ انتقال توزیع و مصرف قدرت کارآیی دارند.

استفاده از روش تابع سیم پیچ هم در مرحله طراحی به عنوان شبیه ساز و هم در تحلیل ماشین در شرایط کاری مختلف، انواع خطاهای الکتریکی، مکانیکی و حالات گذرا بسیار مفید خواهد بود و می توان از این ابزار در کاربردهای مختلفی نظیر طراحی سیستمهای تخمین بلادرنگ سرعت، تشخیص بلادرنگ خطا، سیستمهای حفاظتی و طراحی سیستمهای محرکه استفاده کرد.

مدلسازی و شبیه سازی ماشین القایی قفس سنجابی سه فاز [1]

۲-۱-مقدمه

برای تحلیل ماشینهای الکتریکی در فضای حقیقی بایستی ابتدا معادلات دیفرانسیل الکتریکی و مکانیکی توصیف کننده رفتار ماشین به دست آیند. سپس با حل همزمان این معادلات دیفرانسیل، رفتار دینامیکی ماشین حاصل گردد. برای نوشتن معادلات دیفرانسیل الکتریکی، هر سیم بندی که حامل جریان مستقلی است به صورت یک مدار الکتریکی فشرده در نظر گرفته شده که علاوه بر داشتن مقاومت الکتریکی و اندوکتانس خودی، با سایر مدارها نیز القاء متقابل دارد.

در این فصل به مدلسازی و شبیه سازی یک ماشین القایی قفس سنجابی نمونه در شرایط مختلف پرداخته شده است. ابتدا معادلات دیفرانسیل الکتریکی و مکانیکی توصیف کننده رفتار ماشین و نحوه محاسبه و بکارگیری توابع مقاومت و اندوکتانس بیان می گردند. سپس مدلسازی و شبیه سازی ماشین نمونه انجام گرفته است.

موتور القایی نمونه ای که مورد بررسی قرار می گیرد، موتور القایی قفس سنجابی سه فاز با توان نامی سه اسب بخار، ۵۰ هرتز، چهار قطبی، ۲۶ شیار بر روی استاتور و ۲۸ میله در رتور است.

۲-۲- معادلات دیفرانسیل الکتریکی و مکانیکی ماشین

یک ماشین الکتریکی به عنوان یک سیستم مبدل انرژی الکترومکانیکی دارای حالت های گذرای الکتریکی و مکانیکی می باشد. بنابراین هر دو قسمت الکتریکی و مکانیکی این سیستم باید مدل شوند. در این بخش معادلات کلی سیستم بررسی می شود و در بخش بعد پارامترهای موجود در این معادلات بررسی می شوند.

یک ماشین القایی که دارای m مدار استاتور و n مدار رتور می باشد، در نظر می گیریم. معادلات ماشین القایی را به صورت زیر می توان نوشت.

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (1-2)$$

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \quad (2-2)$$

$$\lambda_s = L_{ss} I_s + L_{sr} I_r \quad (3-2)$$

$$\lambda_r = L_{sr}^T I_s + L_{rr} I_r \quad (4-2)$$

در روابط فوق R_s ماتریس مقاومت استاتور، R_r ماتریس مقاومت رتور، λ_s فوران پیوندی با سیم پیچ استاتور، λ_r فوران پیوندی با سیم پیچ رتور، L_{ss} ماتریس اندوکتانس خودی و متقابل سیم پیچهای استاتور، L_{rr} ماتریس اندوکتانس خودی و متقابل سیم پیچهای رتور، L_{sr} ماتریس اندوکتانس متقابل بین سیم پیچهای استاتور و رتور و ماتریس L_{sr}^T ترانزپوز^۱ ماتریس L_{sr} می باشد. بردارهای جریان و ولتاژ نیز به صورت زیر می باشند.

$$I_s = [i_{s1} \ i_{s2} \ \dots \ i_{sm}]^T \quad (5-2)$$

$$I_r = [i_{r1} \ i_{r2} \ \dots \ i_{rm}]^T \quad (6-2)$$

$$V_s = [v_{s1} \ v_{s2} \ \dots \ v_{sm}]^T \quad (7-2)$$

$$V_r = [v_{r1} \ v_{r2} \ \dots \ v_{rm}]^T \quad (8-2)$$

در این روابط، جریانهای m مدار استاتور و n مدار رتور همه مستقل فرض شده اند. معادلات مکانیکی ماشین نیز به صورت زیر بیان می شوند.

$$T_e = I_s^T \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_{rm}} I_r = p I_s^T \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_r \quad (9-2)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_l) \quad (10-2)$$

$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_m \quad (11-2)$$

در این روابط θ_{rm} زاویه مکانیکی رتور، θ_r زاویه الکتریکی رتور، ω_m سرعت مکانیکی، T_l گشتاور بار، p تعداد جفت قطبهای ماشین و J ممان اینرسی رتور می باشد.

در صورتیکه تعداد شیارهای استاتور و رتور بر تعداد زوج قطبها قابل تقسیم باشد، به علت وجود تقارن کامل برای تمام قطبها می توان معادلات ماشین را فقط برای یک زوج قطب حل کرد. در این صورت تعداد معادلات کمتر شده و سرعت شبیه سازی بیشتر می شود. عیب حل معادلات برای یک

¹ -Transpose

زوج قطب این است که اگر خطایی بر روی ماشین به صورت غیر متقارن رخ دهد، قابل بررسی نیست و در این حالت باید از مدل واقعی ماشین استفاده شود.

۲-۳- بیان معادلات در فضای حالت

به منظور بیان معادلات الکتریکی و مکانیکی ماشین در فضای حالت، بردار متغیر حالت و بردار خروجی را به صورت زیر انتخاب می کنیم:

$$x = [\lambda_{s1} \dots \lambda_{sm} \lambda_{r1} \dots \lambda_{rm} \omega_m \theta_{m}]^T \quad (12-2)$$

$$y = [i_{s1} \dots i_{sm} i_{r1} \dots i_{rm} T_e]^T \quad (13-2)$$

معادلات (۱-۲) تا (۴-۲) و (۹-۲) تا (۱۱-۲) مدل ریاضی موتور القایی قفس سنجابس سه فاز را تشکیل می دهند. برای تبدیل معادلات به فضای حالت ابتدا باید عبارات دارای مشتق مرتبه اول را در طرف چپ و عبارات غیر مشتق را در طرف راست قرار داد.

$$\frac{d\lambda_s}{dt} = V_s - R_s I_s \quad (14-2)$$

$$\frac{d\lambda_r}{dt} = V_r - R_r I_r \quad (15-2)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_l) \quad (16-2)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \quad (17-2)$$

$$T_e = I_s^T \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_m} I_r \quad (18-2)$$

بالاخره برای تبدیل معادلات (۱۴-۲) تا (۱۸-۲) به فرم فضای حالت باید جریانهای I_s و I_r را بر حسب فورانه‌های پیوندی λ_s و λ_r بیان نمود تا طرف راست معادلات فوق شامل همه متغیرهای حالت باشند. برای این منظور روابط (۲-۲) و (۴-۲) را به صورت ماتریسی بازنویسی می کنیم:

$$\begin{bmatrix} \Lambda_s \\ \Lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{sr}^T & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (19-2)$$

از رابطه فوق می توان I_r و I_s را بر حسب λ_r, λ_s به صورت زیر یافت:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -E \\ -C & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_s \\ \Lambda_r \end{bmatrix} \quad (20-2)$$

که در آنها داریم:

$$\begin{aligned}
 A &= L_{ss}^{-1} L_{sr} L_{rr}^{-1} L_{sr}^T \\
 B &= L_{rr}^{-1} [I + L_{sr}^T A^{-1} L_{ss}^{-1} L_{sr} L_{rr}^{-1}] \\
 C &= L_{rr}^{-1} L_{sr}^T A^{-1} L_{ss}^{-1} \\
 D &= A^{-1} L_{ss}^{-1} \\
 E &= A^{-1} L_{ss}^{-1} L_{sr} L_{rr}^{-1}
 \end{aligned} \tag{۲۱-۲}$$

I در روابط فوق ماتریس همانی^۱ می باشد. با قرار دادن رابطه (۲۰-۲) در روابط (۱۴-۲) تا (۱۸-۲)

داریم:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Lambda_s}{dt} &= V_s - R_s D \Lambda_s + R_s E \Lambda_r \\
 \frac{d\Lambda_r}{dt} &= V_r - R_r B \Lambda_r + R_r C \Lambda_s \\
 \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J} (T_e - T_l) \\
 \frac{d\theta_{rm}}{dt} &= \omega \\
 T_e &= [D \Lambda_s - E \Lambda_r]^T \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta} [-C \Lambda_s + B \Lambda_r]
 \end{aligned} \tag{۲۲-۲}$$

در این معادلات، V_s بردار ولتاژ فازهای منبع تغذیه است. V_r برای موتور القایی قفس سنجابی همواره برابر صفر است.

۲-۴- محاسبه ماتریسهای مقاومت و اندوکتانس ماشین القایی قفس سنجابی

برای رتور قفس سنجابی که دارای n میله می باشد، به منظور ارائه یک مدل جامع به گونه ای که بتواند در شرایط خطای رتور نیز مورد استفاده قرار گیرد، یکی از حلقه های انتهایی رتور نیز در نظر گرفته می شود. بنابراین در قفس رتور $n+1$ جریان مستقل رتور داریم. بنابراین به منظور دقیق مدل کردن قفس رتور بایستی به تعداد این جریانهای مستقل رتور، فاز در نظر گرفت. پس در واقع رتور یک سیستم $n+1$ فاز می باشد. برای یافتن ماتریسهای مقاومت و اندوکتانس از روش تحلیل مش استفاده می کنیم. در این روش، یک حلقه شامل دو میله مجاور و قسمتهایی از حلقه انتهایی که دو میله مجاور را به یکدیگر متصل نموده اند می باشد. هر حلقه به عنوان یک فاز در نظر گرفته می شود. این جریانها شامل جریانهای n حلقه رتور و جریان گردشی در یکی از حلقه های انتهایی می باشد. به علت این که

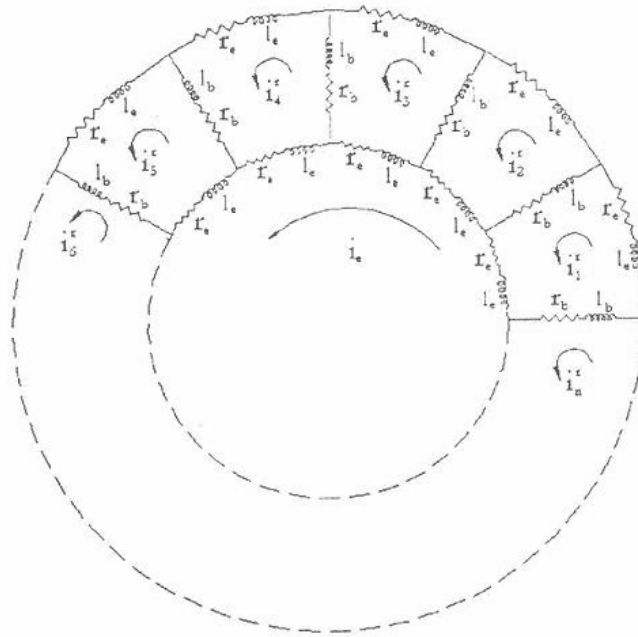
¹ -Identity Matrix

فورانهای مغناطیسی استاتور. این حلقه های انتهایی را قطع نمی کنند جریانی در آنها القا نمی شود. جریانهای n حلقه رتور با یکدیگر و با فازهای استاتور از طریق اندوکتانسهای متقابل کوپل می شوند. جریان حلقه انتهایی به همان دلیل که گفته شد با فازهای استاتور کوپل نمی شود و با جریانهای حلقه های رتور فقط از طریق اندوکتانس نشتی حلقه انتهایی و مقاومت حلقه انتهایی کوپل می شود. مدل مداری قفس رتور در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. پارامترهای شکل به این صورت می باشد:

l_b و r_b مقاومت و اندوکتانس پراکنندگی هر میله رتور، r_e و l_e مقاومت و اندوکتانس پراکنندگی قسمتی از حلقه انتهایی که بین دو میله مجاور قرار دارد، i_e جریان مش حلقه انتهایی و i_r^k جریان مش k ام رتور می باشد. با توجه به مدار شکل (۱-۲) می توان ماتریس مقاومت رتور را به صورت زیر نوشت.

$$R_r = \begin{bmatrix} 2(r_b + r_e) & -r_b & 0 & \dots & 0 & -r_b & -r_e \\ -r_b & 2(r_b + r_e) & -r_b & \dots & 0 & 0 & -r_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -r_b & 0 & 0 & \dots & -r_b & 2(r_b + r_e) & -r_e \\ -r_e & -r_e & -r_e & \dots & -r_e & -r_e & nr_e \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

ابعاد ماتریس R_r برابر $(n+1) \times (n+1)$ می باشد. در ماشین مورد نظر با ۲۸ میله، ابعاد ماتریس R_r برابر 29×29 می باشد.



شکل ۲-۱- مدار معادل رتور قفس سنجایی

برای ماشین القایی قفس سنجایی سه فاز R_s یک ماتریس 3×3 است که مقادیرهای مدار استاتور را مشخص می کند.

$$R_s = \begin{bmatrix} r_{as} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cs} \end{bmatrix} \quad (24-2)$$

مقادیرهای r_{as} و r_{bs} و r_{cs} مقاومت فازهای a, b و c استاتور می باشند. حال باید ماتریسهای L_{ss} ، L_{sr} و L_{rr} محاسبه شوند.

ماتریس اندوکتانس استاتور، L_{ss} شامل اندوکتانس خودی هر یک از مدارهای استاتور و اندوکتانس متقابل بین مدارهای استاتور می باشد. L_{ss} برای ماشین مورد نظر 3×3 و متقارن می باشد.

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{saa} & L_{sab} & L_{sac} \\ L_{sba} & L_{sbb} & L_{sbc} \\ L_{sca} & L_{scb} & L_{scc} \end{bmatrix} \quad (25-2)$$

اندوکتانس خودی فاز a استاتور عبارت است از:

$$L_{saa} = L_{msa} + L_{la} \quad (26-2)$$

L_{msa} اندوکتانس مغناطیس کنندگی مربوط به فاز a و L_{la} اندوکتانس پراکندگی این سیم پیچ می باشد. اندوکتانسهای مغناطیس کنندگی و متقابل فازهای استاتور به ترتیب از روابط زیر محاسبه می شوند.

خطای میله شکسته

۳-۱- مقدمه

در سالهای اخیر در طراحی و ساخت سیم بندیهای استاتور، پیشرفتهای قابل ملاحظه ای بدست آمده است، همچنین در تکنولوژی ساخت مواد بکاررفته در روکش عایقی سیم بندیها و پروسه عایق کاری نیز پیشرفتهای قابل ملاحظه ای صورت گرفته است [13]. با اینحال طراحی و ساخت روتورهای قفس سنجابی کمتر دچار تغییرات بوده است. در نتیجه با توجه به کاهش خطاهای استاتور در صد خطاها و عیوب روتور تا حدی افزایش یافته اند. رتور موتورهای القایی که در معرض راه اندازیهای مکرر هستند، و یا تحت تنشهای پیایی و سنگین قرار می گیرند، بیشتر از استاتور در معرض خطا قرار می گیرد. با این که خطاهای روتور حدود ده در صد خطاهای موتورهای القایی قفس سنجابی را تشکیل می دهند، به دلیل عدم دسترسی مستقیم به روتور، امکان تشخیص خطای آنها تا حدی مشکل می باشد. از طرفی وجود هر نوع عدم تقارن در روتور، منجر به تشدید عدم تقارن و نهایتاً خروج موتور از سرویس می شود.

۳-۲-علل ایجاد شکستگی میله رتور [13].

اکثر خطاهای رتور در اثر هر کدام یا ترکیبی از تنشهای مختلف زیر به وجود می آید:

۱- تنشهای حرارتی در اثر اضافه بار، وجود نقاط داغ، تلفات و جرقه (به خصوص در روتورهایی که میله ها از نوع شمش هستند).

۲- تنشهای مغناطیسی در اثر نیروهای الکترومغناطیسی و نیروهای نامتقارن مغناطیسی (Unbalanced Magnetic pull).

۳- تنشهای پسماندی (Residual) در مرحله ساخت.

۴- تنشهای دینامیکی ناشی از گشتاور شفت و نیروهای گریز از مرکز.

۵- تنشهای مکانیکی ناشی از خستگی مکانیکی قطعات و خرابی بلبرینگها.

۶- تنشهای محیطی ناشی از رطوبت و مواد شیمیایی در محیط کار موتور.

یکی از نتایج اعمال چنین تنشهایی ، شکسته شدن میله ها و حلقه های انتهایی رتور می باشد. ایجاد نویز، لرزش و نوسانات در سرعت و گشتاور و ایجاد هارمونیک در جریان استاتور و شار ماشین در اثر وقوع این خطاها می باشد.

۳-۳-انواع تستهای غیر مخرب برای آشکارسازی خطای میله شکسته در موتور قفس سنجابی :

الف - تحلیل حوزه زمان و فرکانسهای ولتاژهای القایی در سیم پیچهای جستجوگر که در داخل ماشین بر روی دندانه استاتور یا یوغ قرار داده می شوند.

ب - تحلیل حوزه زمان وفرکانس شار شفت یا به طور کلی ترشار نشتی محوری. این شارها توسط سیم پیچ های جستجوگر خارجی که در اطراف شفت در بیرون ماشین نصب می شوند تحت نظارت قرار می گیرند.

ج - تحلیل طیف سیگنال جریان موتور.

د- تحلیل هارمونیکی گشتاور و سرعت موتور.

ه - تخمین پارامتر.

و- بررسی محتویات فرکانسی ولتاژ پایانه ها و جریانهای گذرای ماشین.

ی- روشهای مبتنی بر تکنیکهای عصبی و فازی.

از میان روشهای فوق روش " تحلیل طیف سیگنال جریان استاتور " از همه معروفتر است و بیشتر بکار گرفته می شود. زیرا روشی است که در آن از خود سیم بندیهای استاتور به عنوان سیم پیچهای جستجوگر استفاده می شود و از طرف دیگر به نوع بار و حضور انواع دیگر خطاها بستگی ندارد.

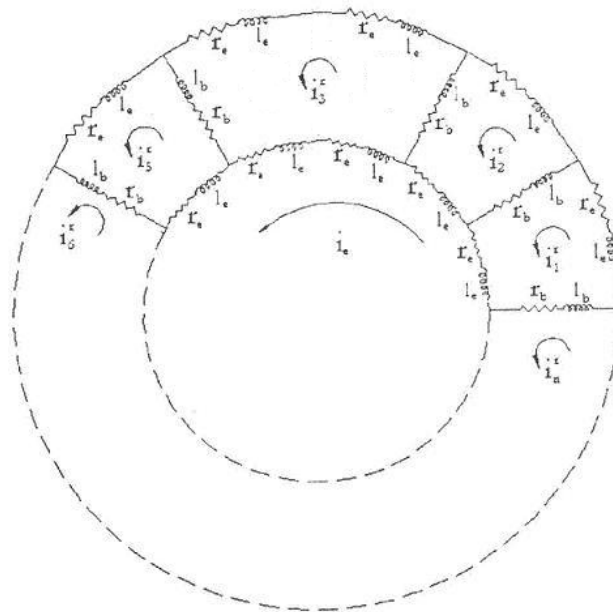
۳-۱۰-مدلسازی خطای میله شکسته [11]

معادلات حالت ماشین الکتریکی در حالت خطای میله شکسته شبیه همان معادلات حالت برای ماشین سالم می باشد. در حالت خطای رتور ماتریس مقاومت استاتور، R_s و ماتریس اندوکتانس استاتور، L_{ss} بدون تغییر باقی می ماند و همانند ماشین سالم می باشد. اما ماتریسهای R_r ، L_{rr} و L_{sr} در حالت خطا تغییر خواهند کرد.

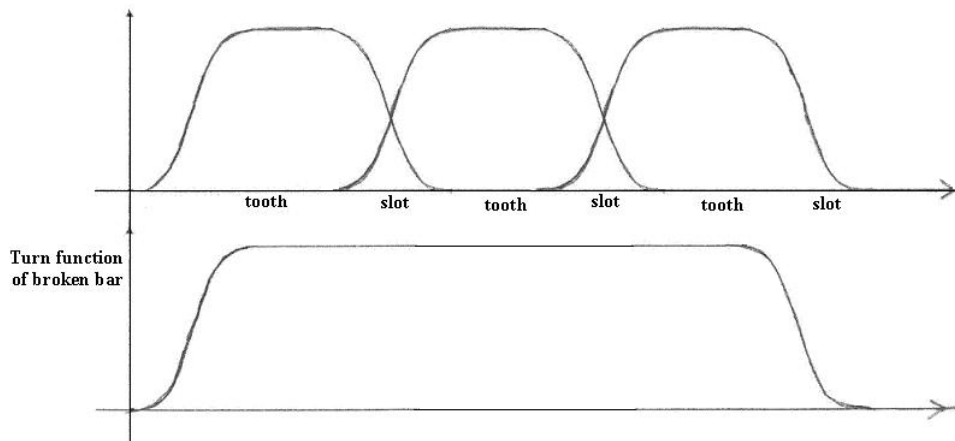
در تحلیل به روش تابع سیم پیچ هر مداری که دارای جریان مستقلی است به عنوان یک فاز در نظر گرفته می شود. شکل (۳-۱۲) مدل گسترده قفس رتور را در حالت یک میله شکسته نشان می دهد. مطابق این

شکل هر دو میله مجاور و قسمتی از حلقه های انتهایی که بین دو میله قرار دارند تشکیل یک حلقه می دهند که متناظر با آن می توان یک معادله جریان نوشت. در حالت شکست میله فرض بر آن است که از آن میله جریانی نمی گذرد. لذا یکی از جریانهای مستقل از بین رفته و می توان حلقه هایی را که شامل میله شکسته هستند را شامل دو میله که میله شکسته را بین خود دارند در نظر گرفت. جهت محاسبه اندوکتانسها ابتدا باید توابع دور و سیم پیچ هر مدار را به دست آورد و سپس اندوکتانسهای مغناطیس کنندگی و متقابل را محاسبه نمود.

توابع دور و سیم پیچ مربوط به فازهای استاتور و همچنین حلقه های سالم رتور تغییر نمی کنند و همانند حالت سالم می باشند. اما توابع دور و سیم پیچ حلقه های معیوب تغییر می کند که باید به دست آیند.



شکل ۳-۱۲- نمایش خطای میله شکسته



شکل ۳-۱۳- تابع دور حلقه شامل دو میله شکسته

فرض می کنیم دو میله مجاور رتور شکسته باشد. همانطور که در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده است تابع دور حلقه جدید برابر است با مجموع تابع دور سه حلقه ای که شامل میله های شکسته هستند. زیرا افزایش و کاهش تابع دور بالای شیار نسبت به مرکز شیار متقارن است. بنابراین جمع تابع افزایش و تابع کاهش برابر واحد خواهد بود.

با شکست یک و یا چند میله رتور، یک و یا چند حلقه از بین رفته و به یک حلقه بزرگتر تبدیل می شود. این امر باعث ایجاد تغییراتی در ماتریسهای مقاومت و اندوکتانس خودی رتور خواهد شد و شکل توابع اندوکتانس متقابل بین فازهای استاتور و این حلقه نیز تغییر خواهد کرد. بنابراین در مدلسازی شکست میله پس از محاسبه کلیه اندوکتانسهای ماشین در حالت سالم، با توجه به این که تابع دور حلقه خطا برابر مجموع توابع دور می باشد، به تعداد میله های شکسته، اندوکتانسهای متقابل فازهای مختلف با حلقه خطا را برابر با مجموع اندوکتانس متقابل آن فازها و حلقه های شامل میله های شکسته در نظر می گیریم. برای مثال اندوکتانس متقابل فاز a با حلقه خطایی که دو میله ۱۵ و ۱۶ شکسته را در بر می گیرد از جمع اندوکتانس متقابل فاز a با حلقه های ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ حاصل می شود. همچنین اندوکتانس خودی حلقه خطایی که شامل میله شکسته ۱۰ می باشد از حاصل جمع $(L_{1011} + L_{1010})$ و $(L_{1111} + L_{1110})$ به دست می آید. به طور کلی با شکست n میله به همان تعداد از معادلات حالت سیستم کم می شود. بنابراین ماتریس

اندوکتانس نیز کاهش بعد می دهد و سطر و ستون مطابق با میله های شکسته در ماتریس اندوکتانس حذف شده و مجموع آنها در سطر قبل از آن جایگزین می شود [11].

ماتریسهای R_r و L_{rr} از راه تجزیه و تحلیل مش به راحتی به دست می آیند. این ماتریسها برای موتور نمونه با دو میله شکسته به صورت زیر خواهد بود.

$$)۴۸-۳ \quad (R_r = \begin{bmatrix} 2(r_b + r_e) & -r_b & 0 & \dots & 0 & -r_b & -r_e \\ -r_b & 2(r_b + r_e) + 4r_e & -r_b & \dots & 0 & 0 & -3r_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -r_b & 0 & 0 & \dots & -r_b & 2(r_b + r_e) & -r_e \\ -r_e & -3r_e & -r_e & \dots & -r_e & -r_e & 28r_e \end{bmatrix}$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + l_e) & L_{r_1 r_2} - l_b & l_{r_1 r_3} & \dots & L_{r_1 r_{28}} - l_b & -l_e \\ L_{r_b r_1} - l_b & L_{mrb} + 2l_b + 6l_e & L_{r_b r_3} - l_b & \dots & L_{r_b r_{28}} & -3l_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{r_{28} r_1} - l_b & L_{r_{28} r_b} & L_{r_{28} r_3} & \dots & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -l_e \\ -l_e & -3l_e & -l_e & \dots & -l_e & 28l_e \end{bmatrix}$$

(۴۹-۳)

R_r و L_{rr} ماتریسهای $۲۷*۲۷$ می باشد که حلقه شماره دو بزرگترین حلقه است. در L_{mrb} , اندوکتانس مغناطیس کنندگی حلقه شامل میله های شکسته می باشد. L_{rbr_i} نیز اندوکتانس متقابل بین حلقه شامل میله های شکسته و سایر حلقه های رتور می باشد.

۳-۱۱- پیش بینی مولفه های فرکانسی جریان موتور در شرایط خطای میله شکسته.

به منظور بررسی مولفه های فرکانسی جریان موتور در حالت خطای میله شکسته فرضیات زیر را در نظر می گیریم:

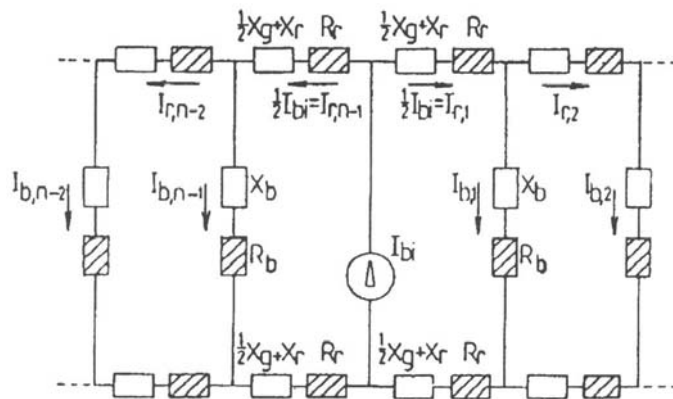
۱- فرض می شود که میله های رتور ایزوله هستند و هیچ جریانی بین آنها وجود ندارد .

۲- در حالت خطا هیچ جریانی از میله شکسته عبور نمی کند.

۳- از اثر اشباع صرف نظر می شود.

برای مدلسازی خطای میله شکسته، همان طور که در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است، جریانی برابر با جریان میله در شرایط سالم در خلاف جهت به میله تزریق می شود. در این شرایط چون ما سیستم را خطی در نظر گرفته ایم به راحتی می توانیم از اصل جمع آثار^۱ استفاده کنیم [۲۸].

جریان تزریقی دو میدان مشابه ایجاد می کند که خلاف جهت یکدیگر از میله شکسته دور می شوند. فرکانس این دو میدان گردان برابر است با sf . این دو میدان گردان نیز ولتاژهایی در استاتور القاء می کنند.



شکل ۳-۱۴-مدلسازی خطای میله شکسته

در حالتیکه سیم بندیهای استاتور متقارن هستند و با ولتاژی با فرکانس f تغذیه می شوند، میدان گردانی با فرکانس f در شکاف هوایی ایجاد می شود که ولتاژی را در مدارهای رتور با فرکانس sf القاء می کند. به دلیل عدم تقارن رتور، جریانهای رتور دو میدان مغناطیسی گردان ایجاد می کنند که در دو جهت مخالف و با فرکانسهای $\pm sf$ در فاصله هوایی می چرخند. مولفه $f +$ با میدان استاتور درگیر میشود و مولفه $f -$ ولتاژی را با فرکانس $(1 - 2s)f$ در استاتور القاء میکند. جریان حاصله از این ولتاژ همراه با

^۱ -Superposition

مولفه اصلی میدان مغناطیسی، گشتاور الکترومغناطیسی با فرکانس $2sf$ ایجاد میکند. این نوسان گشتاور باعث نوسان سرعت با همین فرکانس میشود. تغییرات سرعت رتور، مولفه های فرکانسی دیگری را در سیم بندیهای استاتور ایجاد می کند. با در نظر گرفتن ولتاژ القایی به صورت حاصلضرب فوران مغناطیسی و سرعت میدان مغناطیسی دو ولتاژ با دامنه برابر و فرکانسهای $(1 \pm 2s)f$ ایجاد میشود که بر روی مولفه اصلی ولتاژ منبع سوار می شوند. هرکدام از آنها یک جریان با همان فرکانس در استاتور ایجاد می کنند که نتیجه آن یک میدان گردان مغناطیسی است که با سرعت $3sf$ نسبت به رتور می چرخد. در اثر عدم تقارن رتور، این میدان گردان ولتاژهایی را در رتور القاء می کند که جریانهای تولیدی متناظر با آنها دو میدان گردان با فرکانسهای $\pm 3sf$ ایجاد می کنند. این پدیده به صورت تکراری ادامه می یابد که منجر به تولید مولفه های فرکانسی $(1 \pm 2ks)f$ در جریان استاتور و مولفه های فرکانسی $(\pm k_r sf)$ ($k_r = 1, 3, 5, \dots$) در جریان رتور می شود [۲۹].

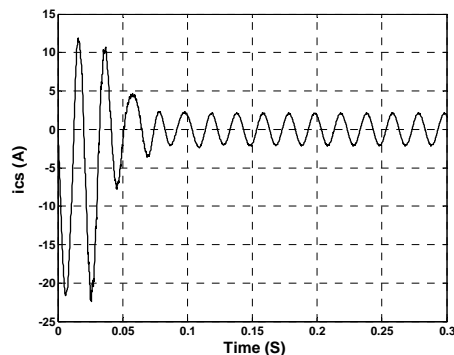
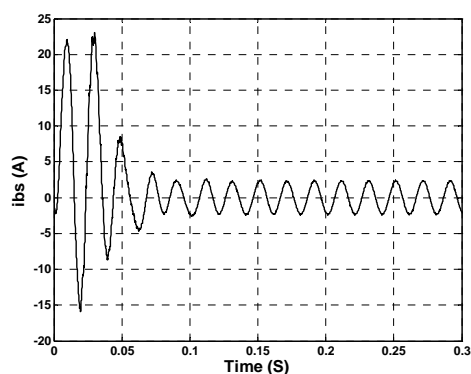
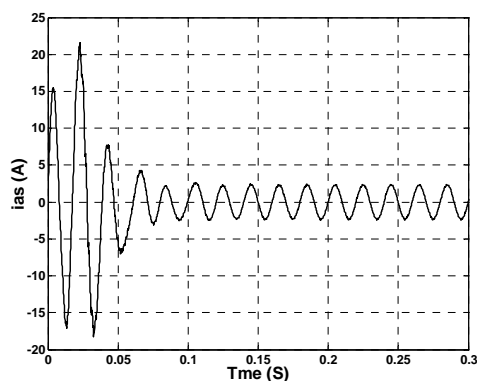
بنابراین با بررسی سیگنالهای جریان، گشتاور و سرعت موتور می توان خطای میله شکسته را تشخیص داد.

۳-۱۲- نتایج شبیه سازی میله شکسته

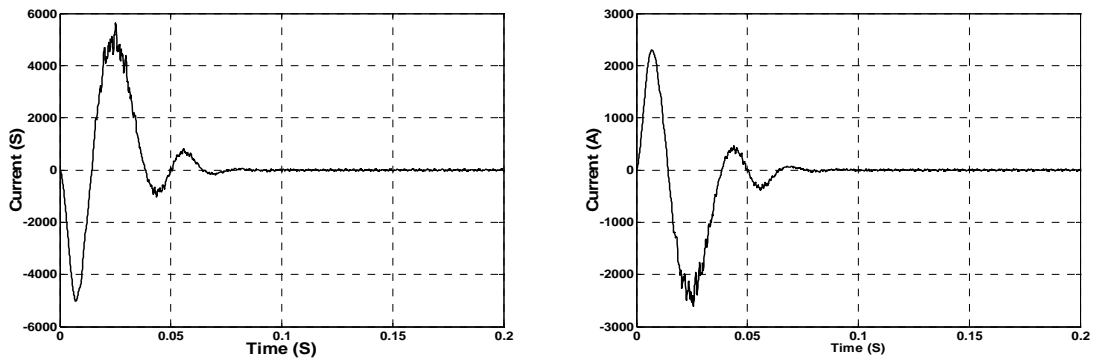
در این بخش نتایج شبیه سازی بر روی موتور القایی نمونه در شرایط میله شکسته ارائه می شود. ابتدا موتور بدون بار راه اندازی می شود. سپس گشتاوری معادل ۷ نیوتن-متر به موتور اعمال می شود. بعد از این که موتور به سرعت دائمی رسید برای داشتن سیگنالهای مورد نظر شبیه سازی در حالت دائمی نیز به اندازه کافی ادامه می یابد. سپس با اعمال FFT به طیف سیگنال جریان استاتور، طیف فرکانسی این جریان را در شرایط میله شکسته به دست می آوریم.

اشکال (۳-۱۵) تا (۳-۱۸) نتایج حاصل از شبیه سازی ماشین القایی مورد نظر را در حالت راه اندازی بدون بار نشان می دهند. شکل (۳-۱۶) جریان حلقه های دوم و بیستم در حالت راه اندازی بدون بار را نشان می دهد. حلقه دوم بزرگترین حلقه است و شامل میله های شکسته می باشد. همان طور که مشاهده می شود جریان حلقه دوم که شامل میله های شکسته است بسیار بیشتر از حلقه های سالم می باشد.

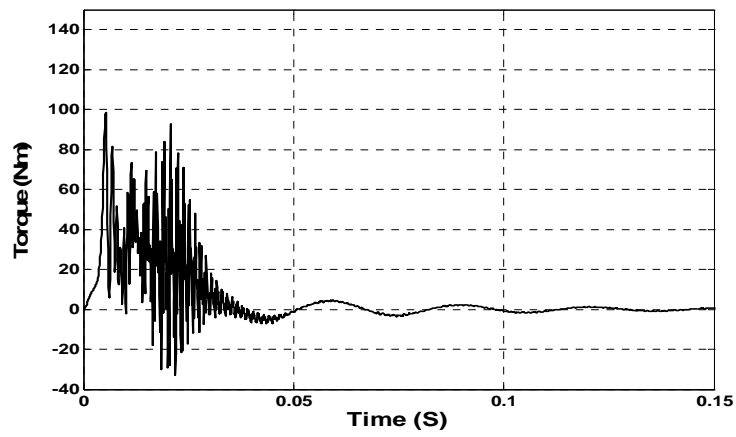
با مقایسه گشتاور راه اندازی در حالت خطای میله شکسته با حالت سالم متوجه می شویم که در حالت میله شکسته نسبت به حالت سالم نوسانات گشتاور بیشتر می شود. در شکل (۳-۱۸) مشاهده می شود که موتور نسبت به حالت سالم دیرتر به سرعت نامی می رسد. شکل (۳-۱۹) جریان موتور را هنگام بارگذاری نشان می دهد. مشاهده می شود که دامنه جریان موتور ثابت نیست و نوسانات قابل ملاحظه ای دارد.



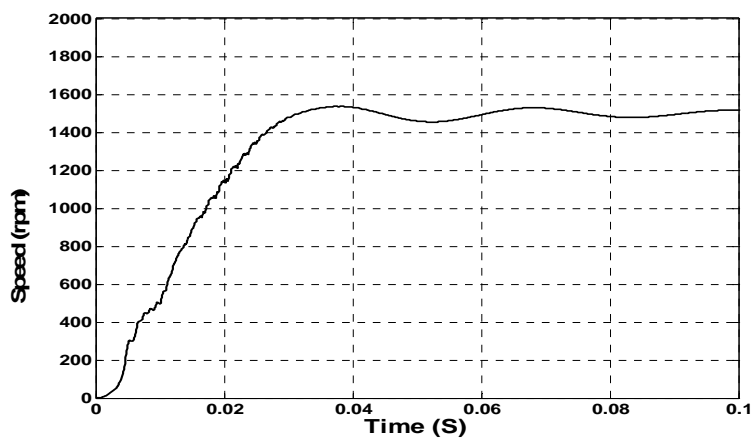
شکل ۳-۱۵- جریان فازهای موتور هنگام راه اندازی بدون بار در حالت چهار میله شکسته



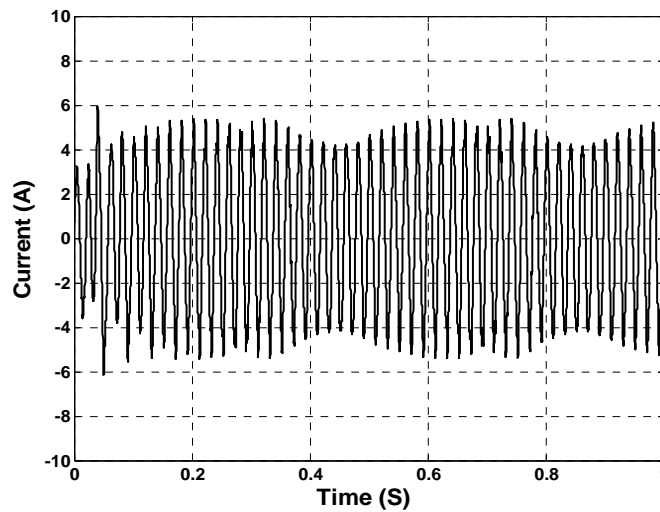
شکل ۳-۱۶- جریان حلقه های دوم (راست) و بیستم (چپ) در حالت راه اندازی بدون بار برای موتور با چهار میله شکسته



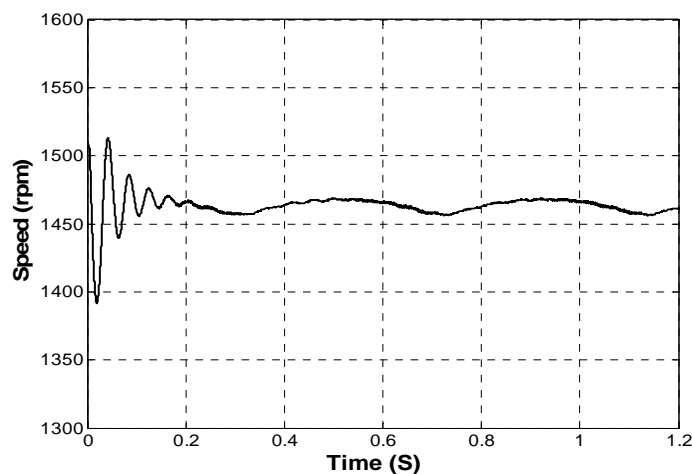
شکل ۳-۱۷- گشتاور راه اندازی برای موتور با چهار میله شکسته



شکل ۳-۱۸- تغییرات سرعت موتور در حالت راه اندازی بدون بار با چهار میله شکسته



شکل (۳-۱۹) جریان یک فاز موتور هنگام بارگذاری در حالت چهار میله شکسته

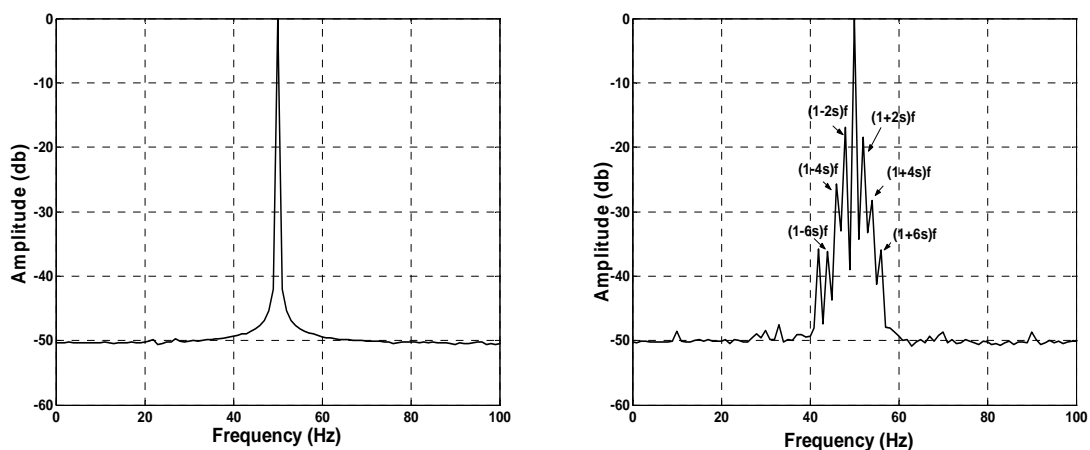


شکل (۳-۲۰) سرعت موتور هنگام بارگذاری برای موتور با چهار میله شکسته

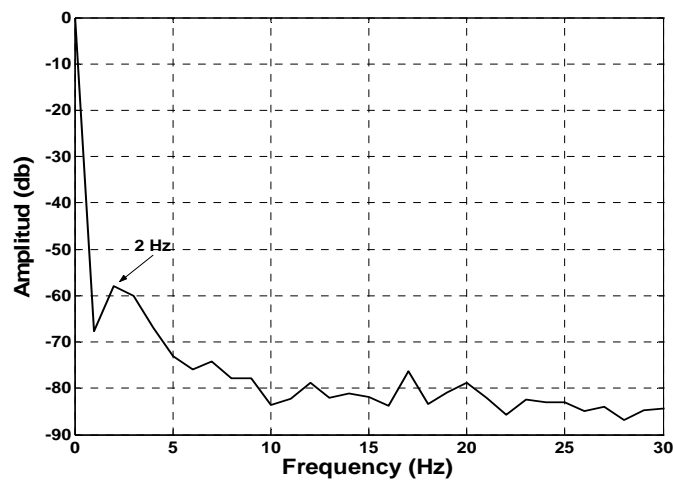
شکل (۳-۲۰) سرعت موتور را هنگام بارگذاری نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود پس از گذشتن از حالت گذرا، سرعت موتور نیز ثابت نیست و نوسان می کند.

شکل (۳-۲۱) طیف فرکانسی جریان فاز a استاتور در دو حالت سالم و میله شکسته را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، در حالت سالم، هیچ یک از مولفه های $f(1 \pm 2ks)$ به وضوح دیده نمی شوند و دامنه قابل توجهی ندارند. در صورتیکه در حالت میله شکسته این مولفه ها حضور دارند. بنا براین

با مقایسه طیف جریان استاتور در شرایط سالم و میله شکسته می توان این نوع خطا را در موتور تشخیص داد. شکل (۳-۲۲) نیز طیف فرکانسی سرعت موتور را در حالت خطای میله شکسته نشان می دهد. مولفه $2sf$ در شکل دیده می شود.

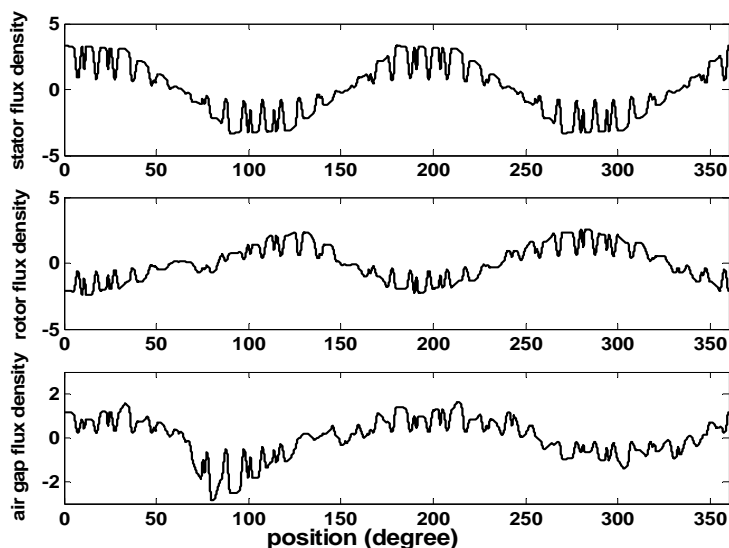


شکل (۳-۲۱) طیف فرکانسی جریان فاز a استاتور در دو حالت سالم (راست) و چهار میله شکسته (چپ)



شکل (۳-۲۲) طیف فرکانسی سرعت موتور در حالت چهار میله شکسته

شکل (۳-۲۳) چگالی فوران مغناطیسی استاتور، رتور و فاصله هوایی ماشین را در یک لحظه از شرایط ماندگار در حالت میله شکسته را نشان می دهد. مشاهده می شود که شکستن میله رتور باعث عدم تقارن چگالی فوران مغناطیسی می شود. عدم وجود جریان و فوران مخالف در میله شکسته سبب افزایش چگالی فوران در اطراف میله شکسته می شود. مشاهده می شود که چگالی فوران در اطراف میله شکسته از چگالی فوران اشباع نیز بیشتر می شود. در صورتیکه در عمل به علت پدیده اشباع، این فوران محدود می شود.



شکل ۳-۲۳- چگالی فوران مغناطیسی استاتور، رتور و فاصله هوایی در یک لحظه از شرایط ماندگار برای

چهار میله شکسته