

مدلسازی و شبیه سازی انواع خطاهای سیم بندی استاتور موتور القایی قفس سنجابی

کریم عباس زاده

دانشجوی دکتری مهندسی برق (قدرت) - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

جعفر میلی منفرد

دانشیار دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

حمید واعظ

کارشناس ارشد برق (قدرت) - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت ۸۰/۲/۵، تاریخ تصویب ۸۱/۷/۲۰)

چکیده

در این مقاله مدلسازی موتور القایی قفس سنجابی تحت شرایط نامتقارنی سیم پیچی استاتور انجام گرفته است. این شرایط نامتقارنی بر اثر رخ دادن اتصال کوتاههایی در سیم پیچی استاتور بوجود می آید. مدلسازی ماشین بر اساس روش تابع سیم پیچی اصلاح شده صورت گرفته است به نحوی که تمام هارمونیکهای فضایی (مکانی) موجود در ماشین در مدلسازی لحاظ شده است. خطاهای مدلسازی شده در این مقاله، خطای حلقه به حلقه، خطای کلاف به کلاف و خطای فاز به فاز می باشد. در این مقاله یک موتور 3hp بنحو خاصی سیم بندی شد بطوریکه انواع خطاهای استاتور قابل پیاده شدن روی موتور بود. نتایج آزمایشات عملی انجام شده بر روی این موتور صحت روش مدلسازی و شبیه سازی و نتایج بدست آمده از مدل پیشنهادی را تأیید می نماید.

واژه های کلیدی: موتورهای القایی، خطاهای سیم بندی استاتور، تشخیص خطا، مدلسازی موتورهای القایی

مقدمه

فروپاشی عایقی حلقه به حلقه ناشی می شوند [۵-۲]. انواع خرابی های موتورهای القایی را می توان بصورت زیر تقسیم بندی کرد: خرابی یاتاقانها ۵۰٪-۴۰٪، خرابی عایق استاتور ۴۰٪-۳۰٪ و خرابی قفسه رتور ۱۰٪-۵٪ [۶]. در صورتیکه از خرابی حلقه به حلقه در سیمبندی استاتور جلوگیری نشود منجر به خطای فاز به زمین یا فاز به فاز می گردد که این خطا از جمله خطاهای شدید و مخرب در موتورهای القایی است.

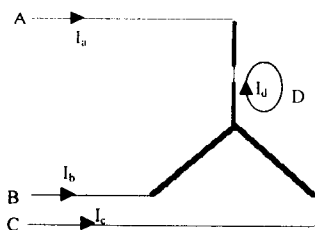
روشهای مختلفی جهت مدلسازی انواع خطاهای موتورهای القایی ارائه شده اند، از جمله این روشها روش تابع سیم پیچی است که در مقالات [۷][۸] نحوه آنالیز گذرای این قبیل موتورها تحت خطا شرح داده شده است. از این نظریه در مدلسازی خطاهای حلقه به حلقه استاتور استفاده شده است. علاوه بر روشهای فوق، خطای استاتور موتورالقایی را می توان به کمک بردارهای فضایی مورد مطالعه قرار داد [۹].

موتورهای الکتریکی نقش مهمی را در راه اندازی مؤثر ماشینها و پروسه های صنعتی ایفا می کنند، بخصوص موتورهای القایی قفسه سنجابی را بعنوان اسب کاری صنعت می شناسند. بنابراین تشخیص خطاهای این موتورها می تواند فواید اقتصادی فراوانی در پی داشته باشد، از جمله مدیریت کارخانه های صنعتی را آسان می کند، سطح اطمینان سیستم را بالا می برد، هزینه تعمیر و نگهداری پایین می آید و نسبت هزینه به سود بطور قابل توجهی کاهش می یابد.

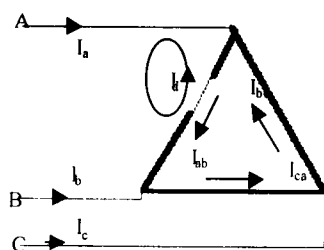
Soukup و Bonnett برای خرابیهای استاتور موتورهای القایی سه فاز قفسه سنجابی پنج حالت خرابی مطرح کرده اند که عبارتند از حلقه به حلقه، کلاف به کلاف، قطع فاز، فاز به فاز و کلاف به زمین [۱]. در موتورهای قفسه سنجابی خرابیهای سیم پیچی استاتور و یاتاقانها تقریباً ۷۵٪ کل خرابیها به حساب می آیند. و همچنین اکثر خرابیهای سیم پیچی استاتور موتور از

اتصال کوتاه رخ می دهد، اولاً تعداد دور سیم پیچی فاز کاهش یافته و لذا MMF نسبت به حالت سالم کمتر خواهد شد، ثانیاً MMF ناشی از جریان اتصال کوتاه مخالف MMF ناشی از جریان سیم پیچی فاز اصلی می شود.

بعنوان یک نتیجه، MMF سیم پیچی فاز با وجود آمدن اتصال کوتاه داخلی تغییر می کند و اندوکتانس متقابل بین آن فاز و همه مدارهای دیگر در ماشین تغییر می کند. علاوه یک فاز جدید که فاز اتصال کوتاه شده که از این به بعد فاز D نامیده می شود به مجموعه سیمبندی ماشین اضافه می شود، این فاز تماس رسانایی با فازهای دیگر نداشته ولی با مدارهای روی استاتور و روی رتور بطور متقابل کوپل می شود. فاز جدید D بصورت یک مدار مستقل با جریان خطای I_d عمل میکند. شکل های (۲) و (۳) این مدار مستقل را به ترتیب در اتصال ستاره و اتصال مثلث سیم پیچی استاتور نشان می دهند



شکل ۲: فرم سیم پیچی استاتور هنگامی که اتصال کوتاه داخلی اتفاق افتاده باشد. - اتصال ستاره .



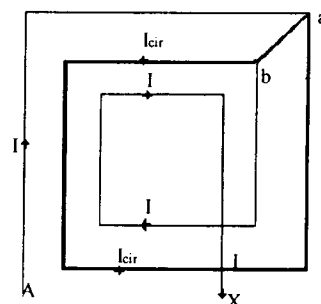
شکل ۳: فرم سیم پیچی استاتور هنگامی که اتصال کوتاه داخلی اتفاق افتاده باشد. - اتصال مثلث .

دسته معادلات زیر مدل ریاضی موتور القایی قفس سنجابی سه فاز را ارائه میدهد [۷].

هدف از ارائه این مقاله علاوه بر مدلسازی و شبیه سازی و نیز تحلیل خطاهای حلقه به حلقه، خطاهای کلاف به کلاف و فاز به فاز با استفاده از روش تابع سیم پیچی مورد تجزیه و تحلیل و سپس مدلسازی شده است، در آخر برای تایید روش مدلسازی نتایج عملی و آزمایشگاهی ارایه خواهد شد. نتایج بدست آمده از تئوری و عملی صحت روش مدلسازی را تایید میکند

مدلسازی خطای حلقه به حلقه و خطای کلاف به کلاف

در ابتدای امر ساده ترین حالت که کلاف استاتور فقط یک دور دارد را در نظر می گیریم و چند نتیجه مهم از آن بدست می آوریم. شکل (۱) دیاگرام سیمبندی یک فاز با سه کلاف متحدالمرکز یک دوری را نشان می دهد. فرض می شود که اتصال کوتاه کلاف به کلاف بین نقاط a و b همانطور که در شکل نشان داده شده است اتفاق افتاده باشد.



شکل ۱: اتصال کوتاه کلاف به کلاف بین نقاط a و b .

واضح است که مسیر جریان گردشی (I_{cir}) همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، بسته می شود. برای تحلیل می توان مسیر A-X را به دو مدار تقسیم کرد که در یکی از مدارهای جریان فاز (I) و در دیگری جریان I_{cir} جاری است، این دو جریان یعنی جریان فاز و جریانی که در اتصال کوتاه جاری می شود، MMF های مخالف هم تولید می کنند. زیرا طبق قانون لنز جریان I_{cir} در جهتی جاری می شود که با عامل بوجود آورنده اش که MMF اصلی ناشی از جریان فاز است مخالفت کند. لذا اتصال کوتاه های داخلی باعث کاهش MMF در نزدیکی حلقه های اتصال کوتاه خواهد شد. هنگامی که خطای

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\alpha\alpha} & L_{ab} & L_{ac} & L_{ad} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bd} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cd} \\ L_{da} & L_{db} & L_{dc} & L_{dd} \end{bmatrix} I_s + \begin{bmatrix} L_{ar} \\ L_{br} \\ L_{cr} \\ L_{dr} \end{bmatrix} I_r \quad (۳)$$

در رابطه (۳) بردارهای $L_{dr}, L_{Cr}, L_{br}, L_{ar}$ $1 \times (n+1)$ هستند. حال معادلات ولتاژ استاتور بر حسب ولتاژهای خط به خط بجای ولتاژهای فاز نوشته می شود. البته بایستی ترم چهارم بردار ولتاژهای استاتور یعنی V_d بصورت " فاز " اتصال کوتاه شده باقی بماند و سایر ترمها را به فرم ولتاژهای خط درآورد. همچنین برای ساده کردن معادلات از این خاصیت که مجموع جریانهای خط (فاز) استاتور برابر صفر می باشد استفاده می گردد (در اتصال ستاره استاتور) و یکی از معادلات استاتور حذف می شود. بنابراین معادلات نهایی ولتاژ استاتور در حالت خطای حلقه به حلقه یا کلاف به کلاف بصورت روابط (۴) و (۵) خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & -R_b & 0 \\ R_c & R_b + R_c & 0 \\ 0 & 0 & R_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_{ab}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{bc}}{dt} \\ \frac{d\lambda_d}{dt} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ab} \\ \lambda_{bc} \\ \lambda_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} - L_{ba} - L_{ac} + L_{bc} & L_{ab} - L_{bb} - L_{ac} + L_{bc} & L_{ad} \\ L_{ba} - L_{ca} - L_{bc} + L_{cc} & L_{bb} - L_{cb} - L_{bc} + L_{cc} & L_{bd} \\ L_{da} - L_{dc} & L_{db} - L_{dc} & L_{ad} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ar} - L_{br} \\ L_{br} - L_{cr} \\ L_{dr} \end{bmatrix} I_r \quad (۵)$$

نتایج شبیه سازی

موتور مورد نظر جهت انجام شبیه سازی، یک موتور ۷/۵ اسب بخار، ۴۶۰ ولت، ۴ قطب و سه فاز اتصال ستاره می باشد که فرکانس کاری آن ۶۰ هرتز می باشد. استاتور این موتور دارای ۳۶ شیار و رتور آن دارای ۲۸ میله

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\lambda_s}{dt}$$

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\lambda_r}{dt}$$

$$\lambda_r = L_{sr}^T I_s + L_{rr} I_r$$

$$T_e = I_s^T \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_{rm}} I_r$$

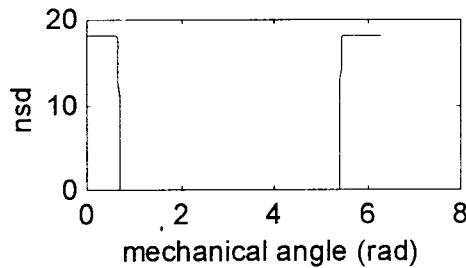
$$\omega_m = \frac{d\theta_{rm}}{dt}$$

$$\lambda_s = L_{ss} I_s + L_{sr} I_r$$

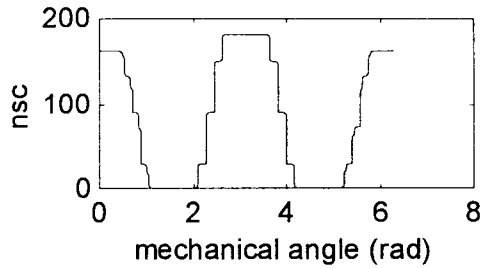
$$J \frac{d^2 \theta_{rm}}{dt^2} + T_L = T_e \quad (۱)$$

در این معادلات V_s بردار ولتاژهای سه فاز منبع تغذیه ، V_r بردار ولتاژ رتور که همواره برابر صفر است، R_s یک ماتریس 3×3 که ماتریس مقاومت استاتور نام دارد، R_r یک ماتریس $(n+1) \times (n+1)$ که ماتریس مقاومت رتور نام دارد (n تعداد میله های رتور می باشد) ، L_{ss} ، 3×3 و ماتریس اندوکتانس استاتور نام دارد ، L_{sr} ، $3 \times (n+1)$ و ماتریس اندوکتانس متقابل نام دارد ، L_{rr} ، $(n+1) \times (n+1)$ و ماتریس اندوکتانس رتور نام دارد ، L_{rs} هم ترانهادۀ L_{sr} می باشد. T_e گشتاور الکترومغناطیسی موتور و T_L گشتاور بار می باشد. ω_m سرعت مکانیکی موتور ، θ_{rm} موقعیت زاویه ای رتور بر حسب رادیان مکانیکی می باشد. معادلات ولتاژ استاتور را در حالت خطای حلقه به حلقه و کلاف به کلاف به صورت زیر می توان نوشت :

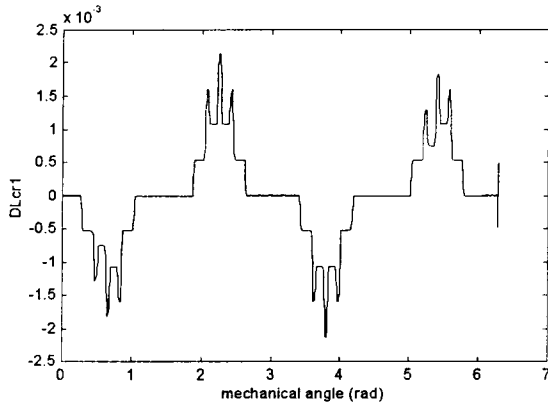
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_a}{dt} \\ \frac{d\lambda_b}{dt} \\ \frac{d\lambda_c}{dt} \\ \frac{d\lambda_d}{dt} \end{bmatrix} \quad (۲)$$



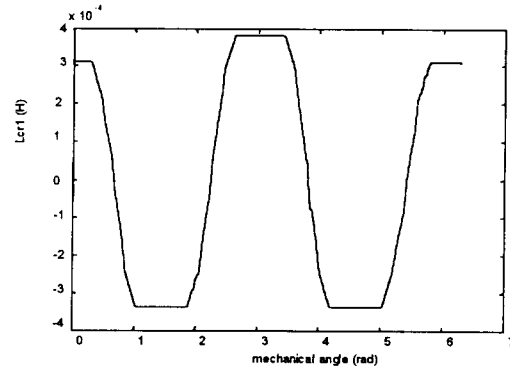
شکل ۵: تابع دور فاز D در حالت خطای حلقه به حلقه.



شکل ۴: تابع دور فاز C در حالت خطای حلقه به حلقه.



(ب)



(الف)

شکل ۶: الف - تابع اندوکتانس متقابل بین فاز C و حلقه اول رتور
ب - تابع مشتق اندوکتانس متقابل بین فاز C و حلقه اول رتور نسبت به θ_{rm} .

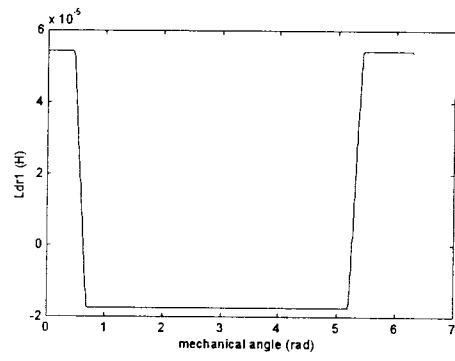
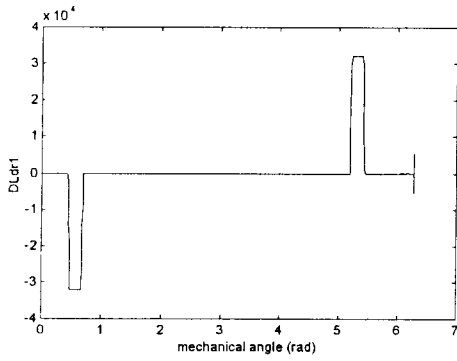
مشتق آن نسبت به زاویه را نشان می‌دهد. شکل (۷) اندوکتانس متقابل بین فاز D و حلقه اول رتور و مشتق آن نسبت به زاویه مکانیکی را نشان می‌دهد.

شکل (۸) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی، سرعت و جریان فازهای استاتور را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۹) نمودار جریان فاز اتصال کوتاه D و نمودار جریان فاز C را نشان می‌دهد. وقتی خطای حلقه به حلقه در فاز C رخ می‌دهد تابع دور فاز C تغییر می‌کند و نامتقارن می‌شود بدین سبب هارمونیکهای فضایی جدیدی بوجود می‌آید که باعث تغییر شکل نوسانات گشتاور همانگونه که در شکل (۸) دیده می‌شود، می‌گردد. این هارمونیکها به جریانهای استاتور نیز منتقل می‌شود و باعث تغییر شکل این جریانها نسبت به حالت سالم ماشین می‌شوند. همچنین دامنه جریانها علاوه بر کاهش MMF نسبت به حالت سالم ماشین افزایش می‌یابد. کاهش شار مغناطیس کننده ناشی از اثر برآیند شار فاز D (سیم پیچ اتصال کوتاه) و سیم بندی استاتور می‌باشد. همانطوریکه در شکل (۸) مشاهده

می‌باشد. در سیم‌بندی این ماشین دو کلاف در هر فاز در هر زوج قطب در نظر گرفته شده است. یعنی چون ماشین چهار قطبی است در هر فاز چهار کلاف وجود داشته و هر کلاف هم N دوری می‌باشد. همچنین فرض شده که سیم‌بندی دو طبقه پیچیده شده است.

شبیه سازی خطای اتصال کوتاه حلقه به حلقه در یکی از کلافهای فاز C

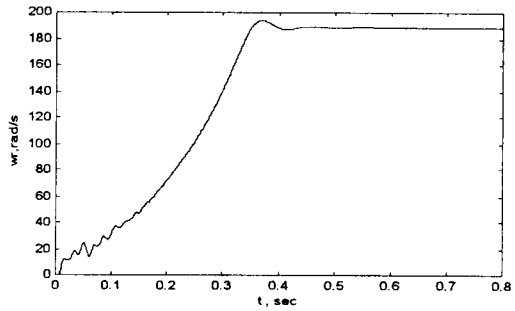
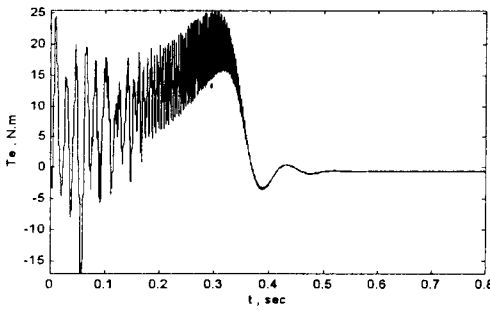
وقتی خطای حلقه به حلقه یا کلاف به کلاف در یکی از فازها رخ می‌دهد، توابع دور و سیم‌پیچی مربوط به آن فاز تغییر می‌کند اما توابع دور و سیم‌پیچی سایر مدارهای ماشین بدون تغییر باقی می‌مانند. بنابراین اندوکتانس خودی آن فاز و اندوکتانسهای متقابل بین آن فاز و سایر مدارها تغییر می‌کنند. شکل (۴) و (۵) تابع دور فاز C سیم‌پیچی استاتور و تابع دور فاز D در حالت خطای حلقه به حلقه را بترتیب نشان می‌دهد. شکل (۶) اندوکتانس متقابل بین فاز C و حلقه اول رتور و



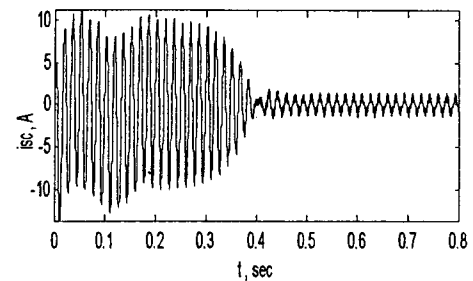
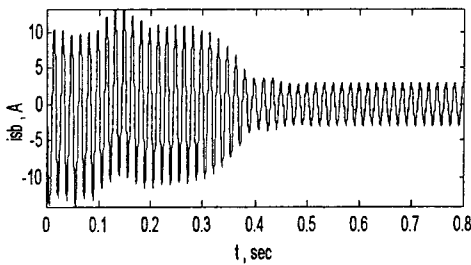
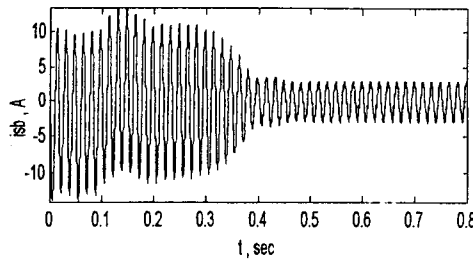
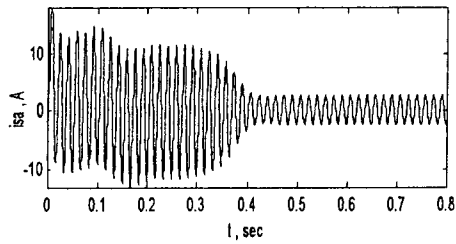
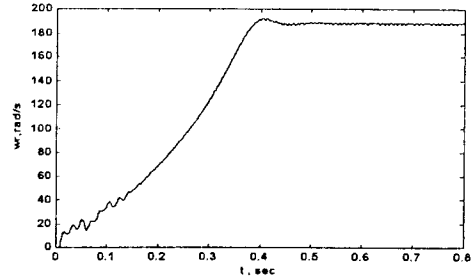
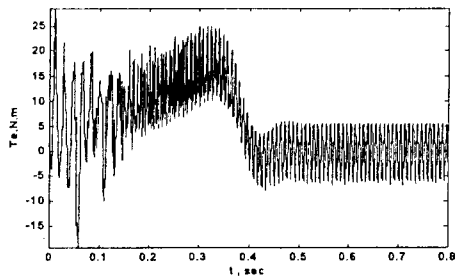
(ب)

(الف)

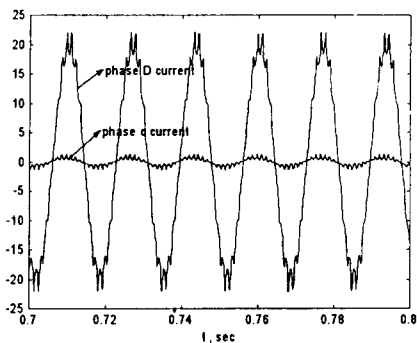
شکل ۷-الف- تابع اندوکتانس متقابل بین فاز D و حلقه اول رتور
ب- تابع مشتق اندوکتانس متقابل بین فاز D و حلقه اول رتور نسبت به θ_{rm}



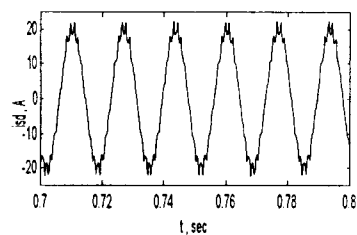
شکل ۸-الف- نمودار گشتاور الکترو مغناطیسی و سرعت موتور در حالت راه اندازی بدون بار



شکل ۸-ب- نمودار گشتاور الکترومغناطیسی، سرعت و جریان فازهای استاتور در حالت خطای حلقه به حلقه

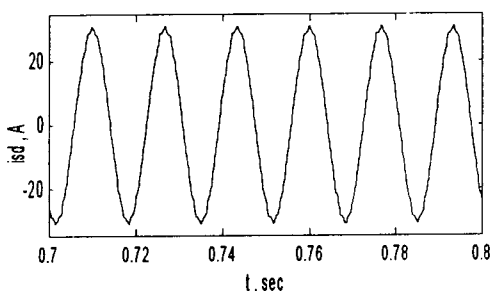


(ب)

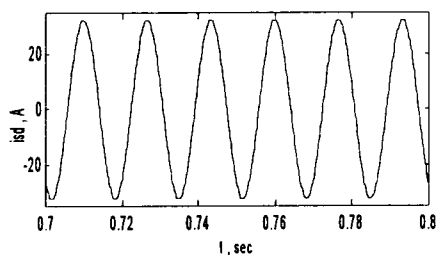


(الف)

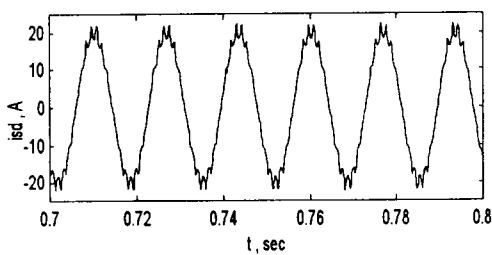
شکل ۹- الف - نمودار جریان فاز اتصال کوتاه D ب - نمودار جریان فاز C و فاز D



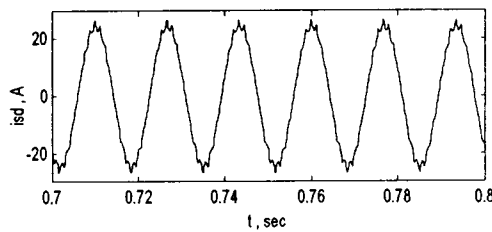
(ب)



(الف)

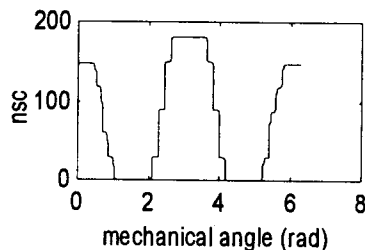
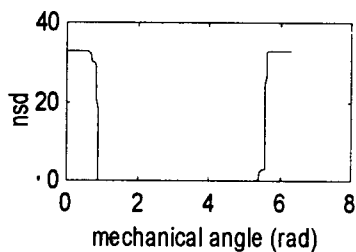


(ج)



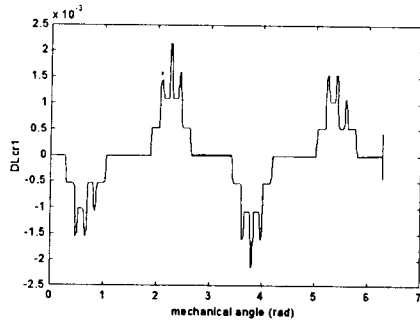
(د)

شکل ۱۰- نمودار جریان فاز اتصال کوتاه D در خطای حلقه به حلقه a
الف - ۲ دور اتصال کوتاه ، ب- ۳ دور اتصال کوتاه ، ج- ۹ دور اتصال کوتاه ، د- ۱۸ دور اتصال کوتاه

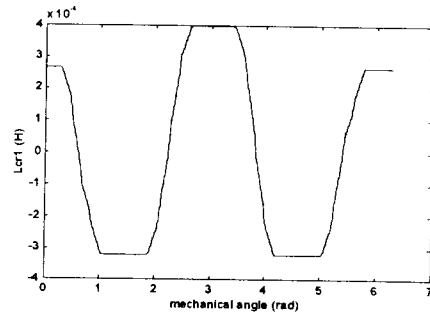


شکل ۱۲: تابع دور فاز D در حالت خطای کلاف به کلاف.

شکل ۱۱: تابع دور فاز C در حالت خطای کلاف به کلاف.

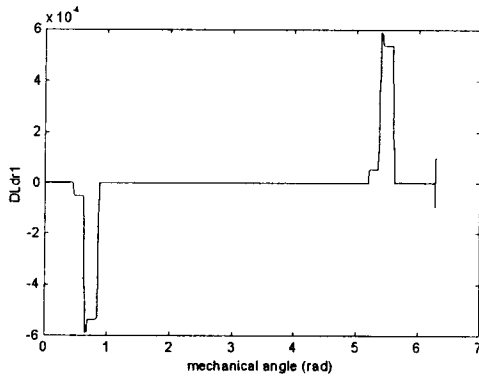


(ب)

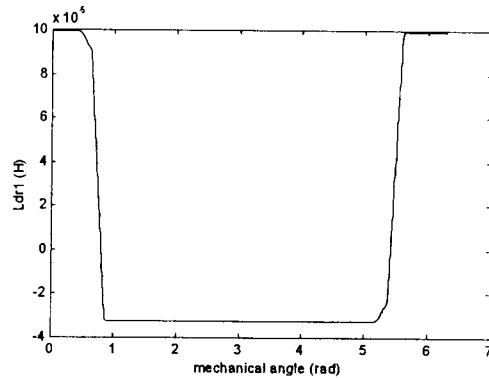


(الف)

شکل ۱۳: الف - تابع اندوکتانس متقابل بین فاز C و حلقه اول رتور
ب- تابع مشتق اندوکتانس متقابل بین فاز C و حلقه اول رتور نسبت به θ_{rm} .

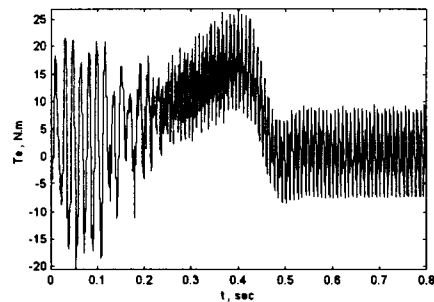
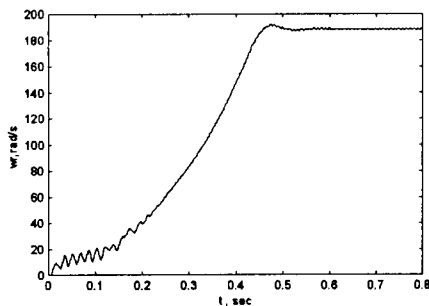


(ب)

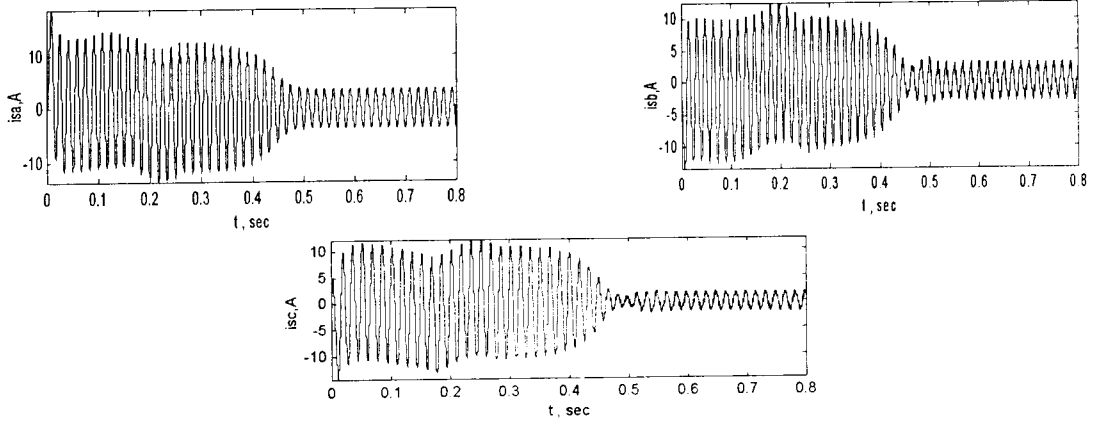


(الف)

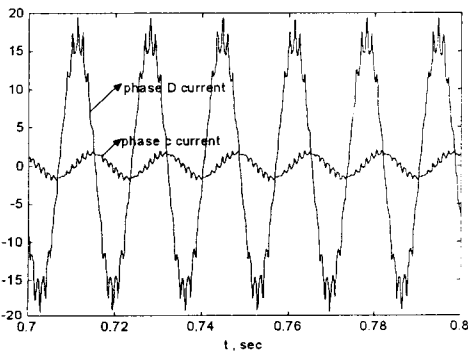
شکل ۱۴: الف - تابع اندوکتانس متقابل بین فاز D و حلقه اول رتور
ب - تابع مشتق اندوکتانس متقابل بین فاز D و حلقه اول رتور نسبت به θ_{rm} .



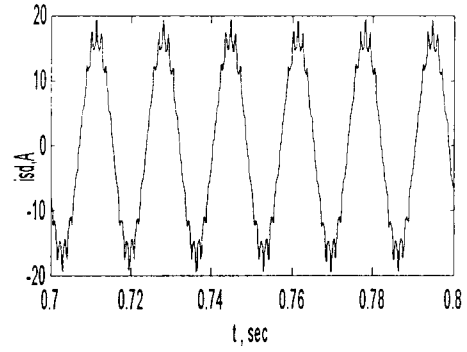
شکل ۱۵: نمودار گشتاور الکترومغناطیسی و سرعت در حالت خطای کلاف به کلاف در راه اندازی بدون بار.



شکل ۱۶: نمودار جریان فازهای a, b, c استاتور در حالت خطای کلاف به کلاف در راه اندازی بدون بار.



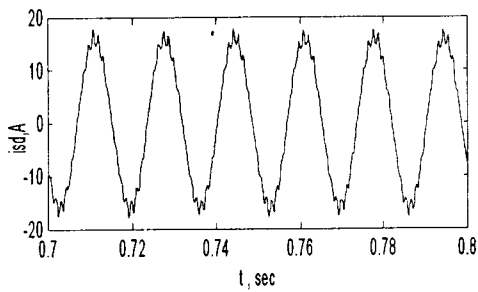
(ب)



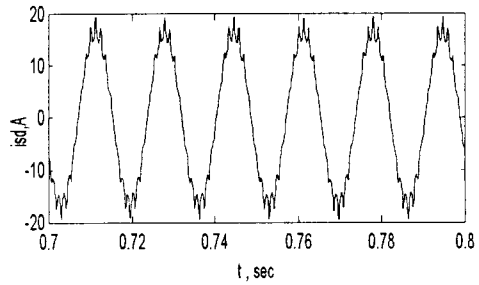
(الف)

ب- نمودار جریان فاز C و فاز D.

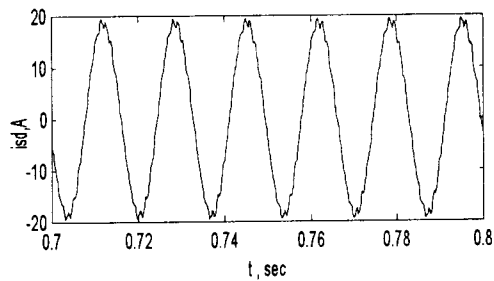
شکل ۱۷: الف- نمودار جریان فاز اتصال کوتاه D.



(ب) ۴۸ دور اتصال کوتاه



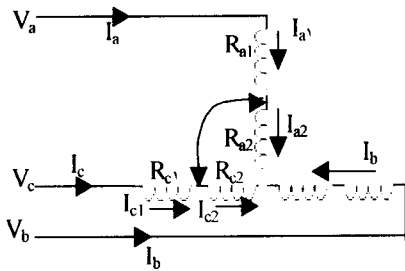
(الف) ۳۳ دور اتصال کوتاه



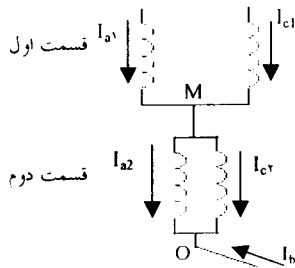
(ج) ۹۰ دور اتصال کوتاه

شکل ۱۸: نمودار جریان فاز اتصال کوتاه D در خطای کلاف به کلاف.

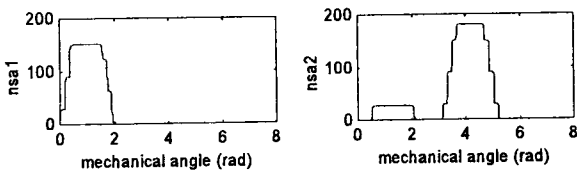
می گردد سیمبندی استاتور با وجود خطای فاز به فاز در شکل (۱۹) نشان داده شده است. شکل (۲۰) مدار معادل فازهای a و C بعد از خطا را نشان می دهد. شکل (۲۱) توابع دور قسمت های اول و دوم فاز a را نشان می دهد. شکل (۲۲) توابع دور قسمت های اول و دوم فاز C را نشان می دهد. شکل (۲۳) اندوکتانس های متقابل بین قسمت های اول و دوم فاز a و حلقه اول رتور را نشان می دهد. شکل (۲۴) اندوکتانس های متقابل بین قسمت های اول و دوم فاز C و حلقه اول رتور را نشان می دهد.



شکل ۱۹: سیمبندی استاتور با خطای فاز به فاز.



شکل ۲۰: مدار معادل فازهای a و C بعد از اتصال کوتاه شدن.



شکل ۲۱: توابع دور قسمت های اول و دوم فاز a استاتور.

میشود بهمین خاطر ماشین نسبت به حالت سالم خود دیرتر به وضعیت پایدار خود می رسد یا عبارتی دیرتر راه اندازی می شود.

درصدهای مختلفی از خطای حلقه به حلقه شبیه سازی شد و نتیجه حاصل شده اینست که دامنه جریان فاز اتصال کوتاه D مستقل از تعداد دور اتصال کوتاه شده می باشد و تغییر چندانی نمی کند. این مطلب در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

شبیه سازی خطای کلاف به کلاف

برای شبیه سازی خطای کلاف به کلاف، مانند خطای حلقه به حلقه عمل می شود. بدین صورت که ابتدا بایستی تابع دور فاز D و سپس تابع دور فاز معیوب را پیدا کرد. با ایجاد خطای کلاف به کلاف در فاز C شبیه سازی این نوع خطا انجام گرفته است. شکل (۱۱) و (۱۲) تابع دور فاز C ، D را در حالت خطای کلاف به کلاف نشان می دهد. شکل (۱۳) و (۱۴) اندوکتانس متقابل بین فاز C, D و حلقه اول رتور و مشتق آن نسبت به زاویه مکانیکی را نشان می دهد.

شکل های (۱۵) و (۱۶) نتایج حاصل از شبیه سازی خطای کلاف به کلاف با ۳۳ دور اتصال کوتاه را در حالت راه اندازی بدون بار نشان می دهد. شکل (۱۷) نمودار جریان فاز اتصال کوتاه D و نمودار جریان فاز C و D را نشان می دهد. با تغییر تعداد دور اتصال کوتاه شده، در این حالت نیز دامنه جریان فاز اتصال کوتاه D تغییر چندانی ندارد و این همانطوریکه قبلا هم اشاره شد بدلیل ثابت بودن شار مغناطیس کننده در مدار مغناطیسی و در اثر مدار اتصال کوتاه فاز D می باشد. این موضوع در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

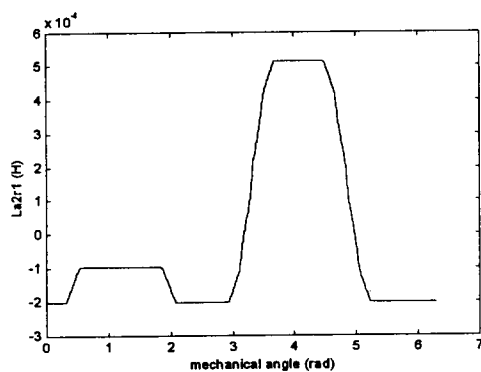
مدلسازی خطای فاز به فاز

در این نوع خطا، فاز D وجود ندارد و در نتیجه بحثی که برای خطاهای قبلی در مورد فاز D داشتیم در اینجا نداریم. وقتی خطای فاز به فاز رخ میدهد فازهایی که بهم اتصال کوتاه شده اند هر کدام تبدیل به دو فاز می شوند یعنی در مجموع پنج جریان مجهول خواهیم داشت. اتصال کوتاه بین فاز a و فاز C در موتور مورد نظر شبیه سازی

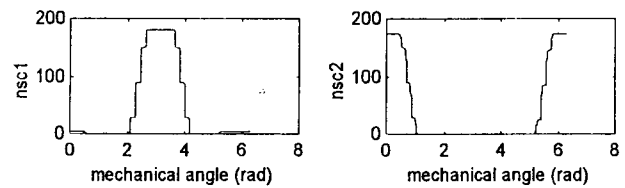
شکل های (۲۵) و (۲۶) نتایج حاصل از شبیه سازی خطای فاز به فاز (اتصال کوتاه شدن فاز a به فاز C در شیار چهارم استاتور) در حالت راه اندازی بدون بار را نشان می دهد.

نتایج عملی

موتور مورد نظر جهت انجام آزمایش یک موتور القایی قفسه سنجابی ۳ اسب بخار، ۳۸۰ ولت، چهار قطب، سه فاز و اتصال ستاره می باشد، که فرکانس کاری آن ۵۰ هرتز است. استاتور این موتور دارای ۳۶ شیار و رتور آن دارای ۲۸ میله می باشد. سیم بندی این موتور به صورت یک طبقه است و برای هر فاز دو کلاف موجود است. کلافها متحدالمرکز هستند و هر کلاف نیز دارای ۱۳۲ دور می باشد. بنابراین در هر شیار ۴۴ دور قرار می گیرد. آزمایشات در حالت بی باری موتور صورت گرفته است. ابتدا در حالت سالم موتور مورد آزمایش قرار گرفت و سپس با ایجاد خرابی حلقه به حلقه در یکی از کلافهای یکی از فازهای استاتور آزمایشات اتصال کوتاه حلقه به حلقه در حالت بی باری روی موتور انجام گرفت و ولتاژ خط اعمالی به موتور، جریان فاز معیوب و جریان اتصال کوتاه اندازه گیری شد که نتایج در شکل های (۲۷) و (۲۸) آمده است. این نتایج نشان می دهد که جریان اتصال کوتاه در خلاف جهت جریان فاز معیوب می باشد و تقریباً ۶ برابر آن است و این مؤید مطالب گفته شده در زمینه خطای حلقه به حلقه می باشد.



(ب)



شکل ۲۲: توابع دور قسمت های اول و دوم فاز C استاتور.

معادلات ولتاژ خط استاتور از روی شکل (۱۹) و شکل (۲۰) و با بکار بردن قوانین مداری کیرشف در نقاط M و O روابط (۶) و (۷) بدست می آید. از روی شکل (۱۹) با نوشتن KVL، معادلات ولتاژ استاتور به صورت زیر بدست می آیند.

$$\frac{d\lambda_{ab}}{dt} = V_{ab} - r_{a1}i_{a1} - r_{a2}i_{a2} + r_b i_b$$

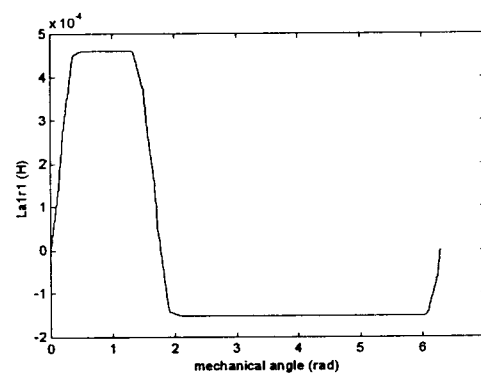
$$\frac{d\lambda_{c1a1}}{dt} = V_{ca} + r_{a1}i_{a1} - r_{c1}i_{c1}$$

$$\frac{d\lambda_{c2a2}}{dt} = r_{a2}i_{a2} - r_{c2}i_{c2}$$

(۶)

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ab} \\ \lambda_{c1a1} \\ \lambda_{c2a2} \end{bmatrix} = L_{ss} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{a2} \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{a1r} + L_{a2r} - L_{br} \\ L_{c1r} - L_{a1r} \\ L_{c2r} - L_{a2r} \end{bmatrix} I_r$$

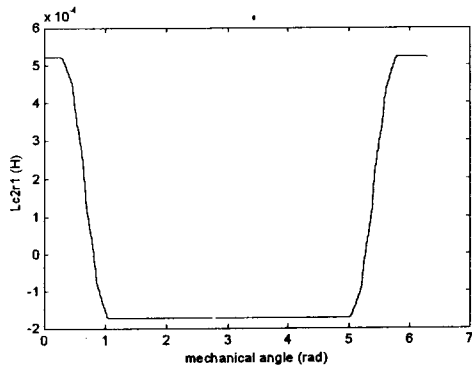
(۷)



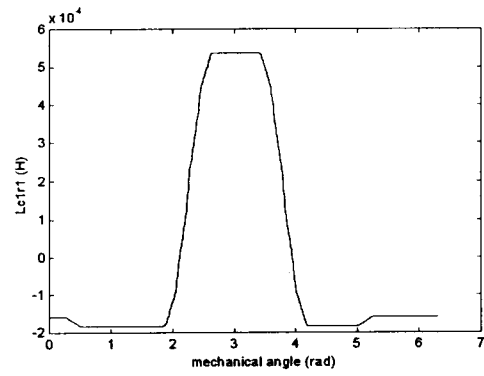
(الف)

شکل ۲۳: الف - تابع اندوکتانس متقابل بین قسمت اول فاز a و حلقه اول رتور

ب- تابع اندوکتانس متقابل بین قسمت دوم فاز a و حلقه اول رتور.

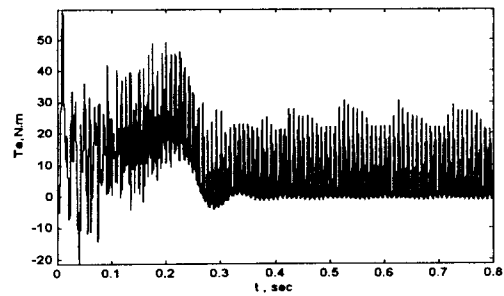
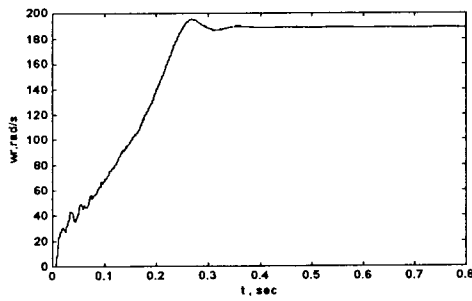


(ب)

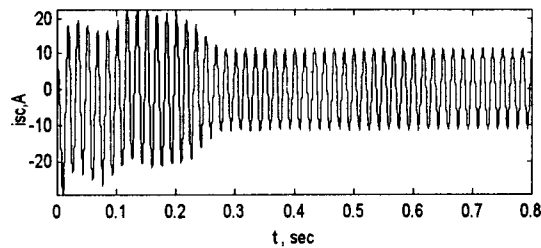
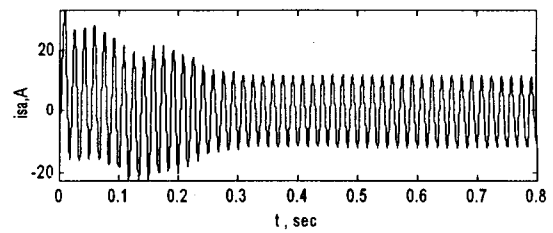
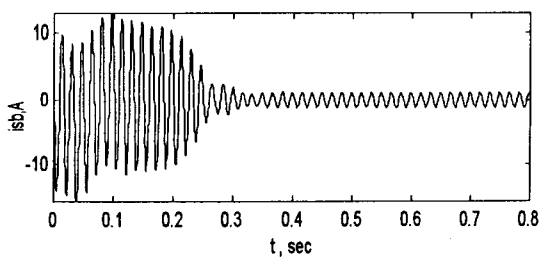


(الف)

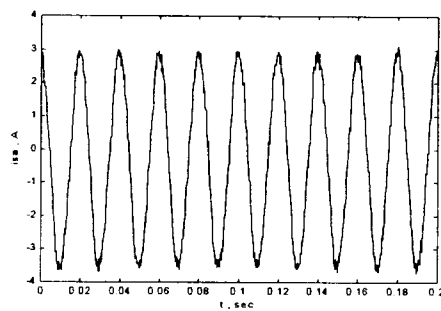
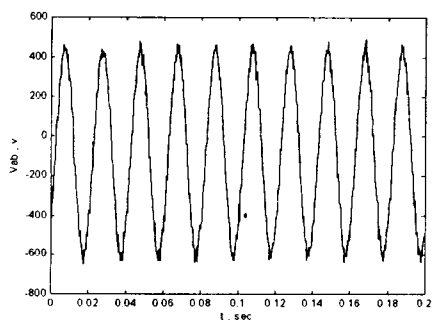
شکل ۲۴: الف- تابع اندوکتانس متقابل بین قسمت اول فاز C و حلقه اول رتور
ب- تابع اندوکتانس متقابل بین قسمت دوم فاز C و حلقه اول رتور.



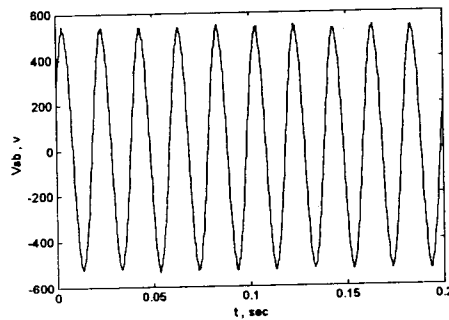
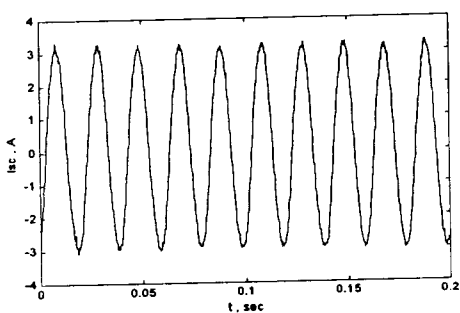
شکل ۲۵: نمودار گشتاور موتور و سرعت در حالت خطای فاز به فاز در راه اندازی بدون بار.



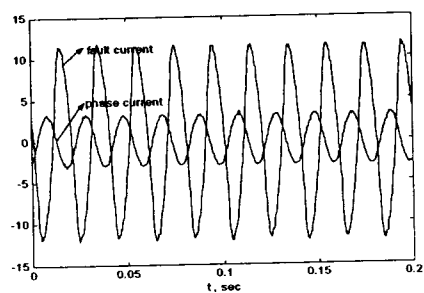
شکل ۲۶: نمودار جریان فازهای a، b، c استاتور در حالت خطای فاز به فاز در راه اندازی بدون بار.



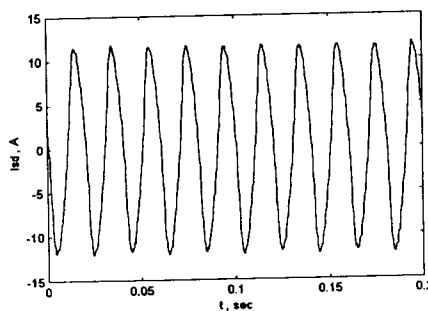
شکل ۲۷: ولتاژ اعمالی و جریان خط موتور در حالت سالم و بی باری.



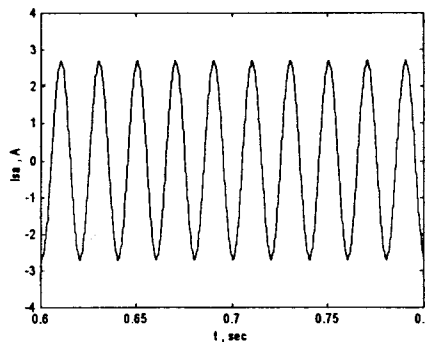
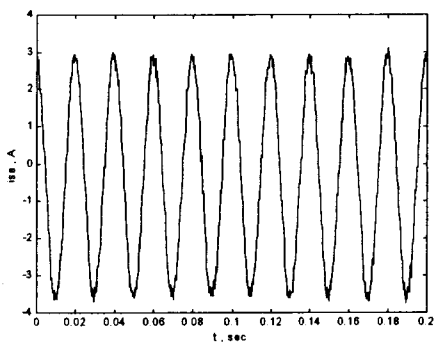
(الف)



(ب)



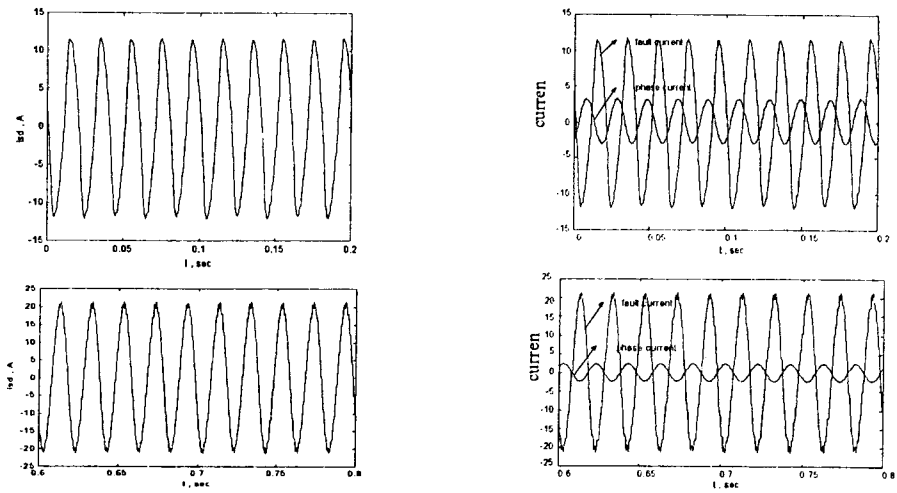
شکل ۲۸: الف - ولتاژ اعمالی به موتور و جریان فاز خطادار در حالت خطای حلقه به حلقه و بی باری
ب - جریان اتصال کوتاه و جریان فازخطادار بهمراه جریان اتصال کوتاه (۳۰ دور اتصال کوتاه).



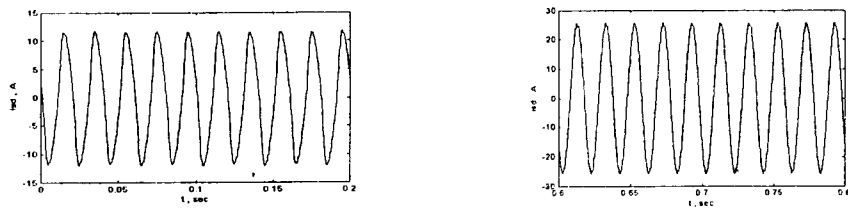
(عملی)

(شبیه سازی)

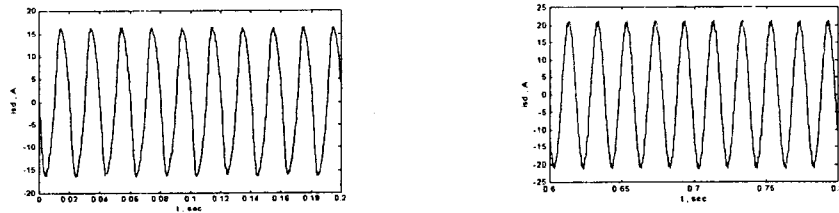
شکل ۲۹: جریان خط موتور در حالت سالم و بی باری.



شکل ۳۰: جریان اتصال کوتاه و جریان فاز خطا در به همراه جریان اتصال کوتاه (۳۰ دور).

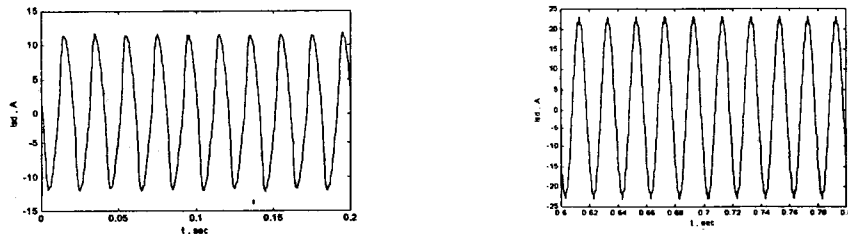


الف) ۲۰ دور اتصال کوتاه



ب) ۱۰ دور اتصال کوتاه

شکل ۳۱ - نمودار جریان اتصال کوتاه در خطای حلقه به حلقه (ادامه دارد)



ج) ۳۰ دور اتصال کوتاه

شکل ۳۱: نمودار جریان اتصال کوتاه در خطای حلقه به حلقه. (نتایج عملی) (نتایج شبیه سازی)

نکات بیان شده در بخش شبیه سازی را نیز تایید میکند.

نتیجه گیری

در مدلسازی انواع خطاهای استاتور هارمونیکهای فضایی در نظر گرفته می شود و طبق نتایج حاصل از

مقایسه نتایج عملی و شبیه سازی

موتور ۳ اسب بخار که تحت آزمایش قرار گرفت در حالت های سالم و خطای حلقه به حلقه شبیه سازی شده و نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی در شکل (۲۹) تا (۳۰) آمده است. این نتایج علاوه بر تایید نتایج شبیه سازی،

حالت پایدار خود می رسد، این مطلب در شکل (۸) نشان داده شده است.

نتایج تجربی و شبیه سازی نشان می دهند که دامنه جریان فاز اتصال کوتاه D مستقل از تعداد دور اتصال کوتاه شده می باشد و همچنین جریان فاز اتصال کوتاه D در خلاف جهت جریان خطا دار است.

شبیه سازیها مشاهده می شود که هارمونیکهای فضایی اثر مستقیمی روی نوسانات گشتاور دارد و نوسانات گشتاور هم روی نوسانات سرعت تأثیر می گذارد. همچنین در حالت خطای استاتور به علت اینکه MMF برآیند استاتور کاهش می یابد، در نتیجه موتور جریان بیشتری را از منبع کشیده و علی رغم بالا بودن جریان استاتور MMF فاصله هوایی کاهش یافته در نتیجه موتور در راه اندازی دیرتر به

مراجع

- 1 - Bonnett, A. H. and Soukup, G. C. (1992). "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors." *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol.28 No. 4, PP. 921 – 937.
- 2 - IEEE committee Report, (1974). "Report on large motor reliability survey of industrial Plants." *Parts I, II and III, IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. IA – 10, No. 2.
- 3 - Eprireport EI-4286, (1985). *Improved motors for utility applications*. Vol. 1. Electric Power Research Institute, Palo Atto, CA, Project no. 1763-2.
- 4 - Donnel, P. O., coordinating author, (1985). "Report on large motor reliability survey of Industrial and commercial Applications." *Part I and II IEEE Transactions on Industry Applications*, IA - 21(4).
- 5 - Thorsen, O. and Dalva, M. (1997). "Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry." *Electrical Machines and Drives, 1997 Eighth International Conference on (Conf. Publ. No. 444)*, PP. 109 – 113.
- 6 - Mccoy, R. M., Albrecht, P. F., Appiaris, J. C. and Owen, E. L. (1985). "Improved motors for utility applications: Volume 1: Industry Assessment Study Update and Analysis." *EPRI EL-4286 (Rp-1763-2)*.
- 7 - Toliyat, H. A. and Lipo, T. A. (1995). "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end rring faults." *Energy Conversion, IEEE Transaction on*, Vol. 10, No. 2, PP. 241 – 247.
- 8 - Joksimovic, G. M. and Penman, J. (2000). "The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 47, No. 5, PP. 1078 – 1084.
- 9 - Gentile, G., Ometto, A., Rotondale, N. and Tassoni, C. (1994). "AC machine performances in faulted operations electrotechnical conference 1994." *Proceedings., 7th Diterranean*, Vol. 3, PP. 1283 – 1286.

پیوست: پارامترهای ماشین

7.5hp , 460v , 4-pole , 3phase

JJ=.012;

L=102.4128*10⁽⁻³⁾;

g=.456438*10⁽⁻³⁾;

r=63.2968*10⁽⁻³⁾;

N=90;

rs=3.5332;

ls=.028;

Rb=68.34e-6;

Lb=.28e-6;

Re=1.56e-6;

Le=.03e-6;

3hp , 380v , 4-pole , 3phase

JJ=.012;

L=90*10⁽⁻³⁾;

g=.456438*10⁽⁻³⁾;

r=45*10⁽⁻³⁾;

N=132;

rs=3.1;

ls=.028;

Rb=50.392e-6;

Lb=.28e-6;

Re=1.56e-6;

Le=.03e-6;