مدل‌سازي و شبيه سازي خطاهاي سيم بندي استاتور موتور القايي قفس سنجابي با استفاده از روش مدار معادل مغناطيسي

كريم عباس‌زاده*[۱] ، محمد اردبيلي[۱] و اسماعيل ساراني[۲]

[۱]استاديار دانشكده مهندسي برق- دانشگاه صنعتي خواجه نصير الدين طوسي

[۲]دانش آموخته كارشناسی ارشد برق - قدرت دانشگاه صنعتي خواجه نصير الدين طوسي

(تاريخ دريافت ۸۶/۵/۱۴، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۸/۱/۳۰، تاريخ تصويب ۸۸/۳/۱)

چكيده

موتورهاي القايي به خصوص از نوع قفس سنجابي نقش مهم و كليدي در صنعت دارند. اين موتورها بر حسب نوع كاربردشان در صنعت در برابر تنش‌هاي گوناگوني قرار مي‌گيرند كه باعث خرابي استاتور يا رتور آنها مي‌گردد. شايع‌ترين خطاها در اين نوع موتورها خطاي مربوط به سيم پيچي استاتور مي باشد. از جمله اين خطاها، خطاي حلقه به حلقه، كلاف به كلاف و فاز به فاز است كه در آن چند دور از كلاف‌هاي يک فاز اتصال كوتاه مي‌شوند و در پي آن جريان گردشي بالايي در آنها القاء شده در نتيجه حرارت بسيار زيادي توليد و در نهايت منجر به خطاي فاز به بدنه مي‌گردد. براي تجزيه و تحليل ماشين در شرايط خطا نياز به مدل‌سازي دقيق آن نوع خطا به منظور استخراج الگوهاي تشخيص ماشين سالم از معيوب مي‌باشد. از ميان روش‌هاي مدل‌سازي روش‌هايي كه مبتني بر تحليل ميدان مغناطيسي بوده و وضعيت هندسي و ساختماني ماشين را در نظر مي‌گيرند، از دقت بالايي برخوردارند. روش مدار معادل مغناطيسي علاوه بر داشتن قابليت فوق توانايي مدل كردن هارمونيك‌هاي فضايي و زماني به منظور تحليل دقيق شرايط كاري ماشين را داراست. به همين دليل استفاده از اين روش مدلسازي نتايج واقعي‌تر و دقيق‌تري به دست مي‌دهد. در اين مقاله ابتدا مدل ماشين ۳ اسب بخار ساخت شركت موتوژن با استفاده از روش مدار معادل مغناطيس در شرايط كاري مختلف از جمله سالم، خطاي حلقه به حلقه ، كلاف به كلاف و فاز به فاز به دست آورده شده سپس اين مدل‌ها شبيه‌سازي شده‌اند. با مقايسه نتايج به دست آمده از مدل‌هاي پيشنهادي و نتايج حاصله از آزمايش‌هاي تجربي صحت روش مدل‌سازي و شبيه‌سازي تاييد شده است.

واژه‌هاي كليدي: روش مدار معادل مغناطيسي، خطاي استاتور، ، موتور القايي

مقدمه

ماشين‌هاي الكتريكي نقش مهمي در صنعت بازي مي‌كنند. در بين آنها موتورهاي القايي قفس سنجابي به خاطر سادگي، قابليت اطمينان بالا، نياز به تعمير و نگهداري كم و قيمت نسبتا پايين، بيشتر مورد استفاده قرار مي‌گيرند.

موتور القايي هنگام كار در معرض تنش‌هاي مختلفي از جمله تنش‌هاي حرارتي، الكتريكي، مكانيكي و محيطي قرار دارد. اين تنش‌ها مي‌توانند باعث ايجاد انواع خطاها در اين نوع ماشين شوند. مهم‌ترين اين خطاها، شامل‌خطاهاي روتور (خروج از مركزيت استاتيک و ديناميک، شكستن ميله‌ها و حلقه‌هاي انتهايي)، خطاهاي استاتور(حلقه به حلقه، كلاف[۱] به كلاف، فاز به فاز، فاز به بدنه، قطع شدن يک فاز) و خطاهاي ياتاقان (خوردگي سطوح و نقص ساچمه‌ها) مي باشد.

بر اساس تحقيقاتEPRI حدود۴۰% از كل خطاها، مربوط به ياتاقان، ۳۵% مربوط به استاتور،۱۰% مربوط به روتور و ۱۵% مربوط به ساير خطاها است[۱]. بنابراين خطاهاي استاتور درصد بالايي از خطاهاي ماشين القايي را تشكيل مي‌دهند.

در خطاي حلقه به حلقه چند دور از كلاف يک فاز و در خطاي كلاف به كلاف، دو كلاف از يک فاز اتصال كوتاه مي‌شوند. چون كلاف‌ها نسبت به هم و نسبت به هسته با كاغذ مخصوص عايق مي‌شوند لذا احتمال خطاي حلقه به حلقه بيشتر از ديگر خطاهاي استاتور مي‌باشد. همچنين خطاي حلقه به حلقه با تعداد دور كم روي عملكرد ظاهري ماشين تاثير چنداني ندارد. در حالي كه در ساير خطاها اضافه جرياني كه در ماشين توليد مي‌شود، توسط سيستم‌هاي حفاظتي ساده قابل تشخيص هستند. اگر خطاي حلقه به حلقه در مراحل اوليه آن تشخيص داده نشود به علت عبور جريان گردشي بالا در دورهاي اتصال كوتاه شده و توليد حرارت زياد ممكن است علاوه بر از بين رفتن كامل سيم‌پيچي، حتي به هسته نيز صدمه

* نويسنده مسئول : تلفن : ۸۸۴۶۹۰۸۴ , فاكس : ۸۸۴۶۲۰۶۶ , Email: abbaszadeh@kntu.ac.ir

وارد شود. لذا تشخیص خطاي حلقه به حلقه مشکل‌تر و در عین حال از اهمیت بالاتري برخوردار است.

نظارت و تشخیص خطا در ماشین‌هاي القایي قفس سنجابي، نیازمند یك مدل دقیق براي بررسي عملکرد ماشین معیوب و پیشگویي آثار خطا (روي گشتاور الکترومغناطیسي، جریان استاتور و ارتعاشات مکانیکي) مي باشد.

اولین مقاله براي مدل سازي ماشین‌هاي القایي توسط Stanley ارائه شد[۲]. Hughes وAlderd یك مدل کلي براي حالت گذرا و عملکرد نامتقارن موتور القایي دو فاز و سه فاز در مختصات *dq* را ارائه کردند[۳]. Sarkan و Berg مستقیما مدل ماشین القایي سه فاز را با استفاده از متغیرهاي فاز و تئوري دو محوري معرفي کردند [٤]. Krause و Lipo براي موتورهاي القایي تکنیك‌هاي تحلیلي مختلفي را بر اساس متغیرهاي فاز و تبدیل مختصات مرجع[۲] بنا کردند[۹-۵]. مراجع [۱۰-۸] روشي جهت مدل‌سازي موتورهاي قفس سنجابي که هارمونیك‌هاي mmf را با استفاده از روش تابع سیم‌پیچي بررسي مي‌کند، ارائه داده‌اند. مرجع [۱۱] نیز یك مدل براي ماشین القایي بر پایه تابع سیم پیچي جهت بررسي خطاهاي ماشین و هارمونیك‌هاي جریان معرفي کرده است. روش دیگر براي مدل‌سازي ماشین القایي که نسبت به روشهاي تابع سیم پیچي از دقت بالایي بر خوردار است، روش المان محدود[۳] مي باشد که در مرجع [۱۲] آمده است.

V.Ostovic در اوایل دهه۱۹۸۰ روش مدار معادل مغناطیسي دو بعدي را براي مدل سازي حالت دائمي و حالت گذراي ماشین القایي در حالت متعادل ارائه داد [۱٦-۱۳]. مرجع [۱۷] موتور القاي قفس سنجابي را با استفاده از روش مدار معادل مغناطیسي در حالت سالم مدلسازي و شبیه سازي کرده است. مرجع [۱۸] مدار معادل مغناطیسي سه بعدي را براي مدل سازي جریان بین میله‌هاي روتور ارائه کرده. مرجع[۱۹] استفاده از مؤلفه‌هاي هارمونیکي جریان و مقدار موثر سرعت را بهترین الگو براي تشخیص خطاي حلقه به حلقه و کلاف به کلاف پیشنهاد داده و در نهایت مرجع [۲۰] روش مدار معادل مغناطیسي را با در نظر گرفتن اثر اشباع، اثر مورب بودن میله‌هاي رتور، اثر اشباع دندانه هاي رتور در مدل‌سازي موتورالقایي در شرایط سالم و خطاي میله شکسته ارائه کرده است.

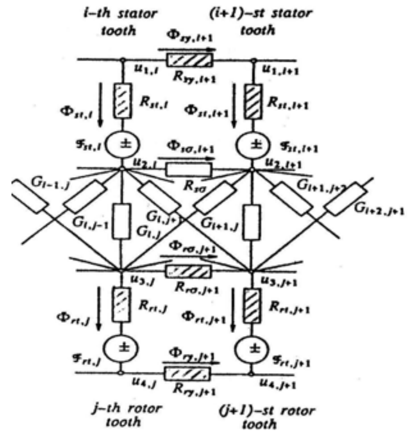
براي ارزیابي انواع روش‌هاي مدل سازي، دو پارامتر دقت مدل و زمان انجام محاسبات بایستي مد نظر قرار گیرد. روش‌هایي که بر اساس تبدیل مختصات مرجع کار مي‌کنند با توجه به فرض‌هاي در نظر گرفته شده زمان انجام محاسبات کمتري داشته اما نسبت به روش‌هاي دیگر از دقت کمتري برخوردار مي باشد. روش‌هاي مبتني بر تابع سیم‌پیچي نیز فرض‌هایي براي تسهیل محاسبات دارند. مثلا در این روش نفوذ پذیري مغناطیسي[٤] آهن بي نهایت در نظر گرفته مي شود. لذا مدل‌سازي ماشین با استفاده از این روش براي بررسي عملکرد ماشین در حالت خطا از دقت کافي برخوردار نخواهد بود. در روش مدار معادل مغناطیسي با استفاده از منحني دقیق B-H هسته و در نظر گرفتن شکل کامل دندانه‌ها علیرغم داشتن دقت بالا زمان انجام محاسبات آن نسبت به روش تابع سیم پیچي زیاد تغییر نمي‌کند. حداکثر ساده سازي در روش مدار معادل مغناطیسي، صرفنظر کردن از رلوکتانس یوغ‌ها نسبت به رلوکتانس فاصله هوایي و دندانه‌ها مي‌باشد که این ساده سازي در نتایج شبیه سازي تاثیري ندارد.

هدف از ارائه این مقاله مدل سازي و شبیه سازي موتور القایي سالم و معیوب تحت خطاهاي حلقه به حلقه، کلاف به کلاف و فاز به فاز به روش مدار معادل مغناطیسي مي‌باشد. ابتدا روش مدار معادل مغناطیسي معرفي و سپس براي مدل سازي ماشین القایي سالم و معیوب مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه انواع خطاهاي حلقه به حلقه و کلاف به کلاف در سیم بندي استاتور مدلسازي و شبیه سازي شده است. براي ارزیابي اعتبار مدل، همان خطاهاي شبیه سازي شده در یك موتور ۳ اسب بخار ساخت شرکت موتوژن ایجاد شد و نتایج عملي اخذ گردید. نهایتا" نتایج حاصله از شبیه سازي و نتایج عملي با همدیگر مقایسه شده و نتیجه گیري کلي ارائه شده است.

روش مدار معادل مغناطیسی

روش مدار معادل مغناطیسي بر اساس دوگاني مدارهاي مغناطیسي و الکتریکي معادل بنا شده است. به عنوان مثال معادل شار مغناطیسي ، پتانسیل مغناطیسي اسکالر و پرمانس[٥] به ترتیب جریان، ولتاژ و رسانایي الکتریکي است. براي استفاده از این روش در ماشین القایي

یوغ بین دندانه‌ها با یک پرمانس، دندانه‌ها با یک پرمانس و یک منبع m.m.f و فاصله هوایي نیز به صورت پرمانس‌هایي بین دندانه‌هاي روبرو در نظر گرفته مي‌شود. شکل (١) مدل مدار معادل يك ماشین القایي را نشان مي‌دهد.



شکل١: مدار معادل مغناطیسي موتور القایي.

معادلات مدار مغناطیسی

بر اساس دوگاني ذکر شده براي شبکه معرفي شده در شکل (١) مي‌توان معادلات جبري زیر را نوشت[١٦]:

$$A_{11}U_1 = -\varphi_1 \quad (١)$$

$$A_{22}U_2 + A_{23}U_3 = \varphi_{st} \quad (٢)$$

$$A_{32}U_2 + A_{33}U_3 = \varphi_{rt} \quad (٣)$$

$$A_{44}U_4 = -\varphi_{rt} \quad (٤)$$

$$U_2 = U_1 - R_{st}\varphi_{st} + F_{st} \quad (٥)$$

$$U_3 = U_4 - R_{rt}\varphi_{rt} + F_{rt} \quad (٦)$$

در معادلات فوق U_1 تا U_4 به ترتیب پتانسیل مغناطیسي اسکالر روي یوغ استاتور، دندانه استاتور، دندانه روتور و یوغ روتور است. φ_{st} و φ_{rt} بردار شار دندانه‌هاي استاتور و روتور، R_{st} و R_{rt} ماتریس رلوکتانس دندانه‌هاي استاتور و روتور و F_{st} و F_{rt} به ترتیب بردار نیروي محرکه مغناطیسي(mmf) استاتور و روتور مي باشد.

ماتریس‌هاي A_{11}، A_{22}، A_{33} و A_{44} پرمانس‌هاي گره ها مي باشند. عناصر ماتریس‌هاي A_{11} و A_{44} به ترتیب به پرمانس قطعات یوغ استاتور و روتور بستگي دارند. عناصر ماتریس A_{22} و A_{33} به ترتیب به پرمانس نشتي شیارها و پرمانس‌هاي فاصله هوایي مربوط هستند. A_{23} و A_{32} نیز فقط به پرمانس‌هاي فاصله هوایي بستگي دارند[١٦]. بردارهاي mmf را بصورت تابعي از جریان‌هاي روتور و استاتور مي توان نوشت:

$$F_{st} = W_s I_s \quad (٧)$$

$$F_{rt} = W_r I_r = I_r \quad (٨)$$

که در آن W_s با استفاده از آرایش سیم بندي استاتور و روتور وتعداد دورهاي هر کلاف استاتور محاسبه مي‌شود و به آن ماتریس تبدیل سیم‌پیچي[٦] مي‌گویند[١٦]. این ماتریس متناظر با تابع سیم‌پیچي[٧] استاتور مي‌باشد. ماتریس w_r با فرض آنکه هر مش روتور همانند سیم پیچي تک حلقه‌اي مي‌باشد و mmf هر دندانه روتور مستقیما به جریان مش محصور کننده آن دندانه بستگي دارد، برابر ماتریس واحد مي باشد.

معادلات الکتریکی

معادلات ولتاژ براي سیم‌پیچي استاتور به شرح زیر است:

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (٩)$$

که در آن:

$$V_s = [v_a \;\; v_b \;\; v_c]^T$$

$$I_s = [i_a \;\; i_b \;\; i_c]^T$$

براي حلقه‌هاي روتور مي‌توان نوشت:

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \quad (١٠)$$

$$V_r = [v_{r1} \;\; v_{r2} \; .....v_{rn}]^T$$

$$I_r = [i_{r1} \;\; i_{r2} \; .....i_{rn}]^T$$

در موتورهاي القایي قفس سنجابي بردار V_r برابر صفر است. R_s و R_r بترتیب ماتریس مقاومت سیم‌پیچي استاتور و میله‌هاي روتور مي‌باشد.

روابط زیر بین شار پیوندي و شار دندانه‌ها برقرار است[١٦]:

$$\lambda_s = W_s^T \phi_{st} \quad (١١)$$

$$\lambda_r = W_r^T \phi_{rt} = \phi_{rt} \quad (١٢)$$

که در آنها λ_s و λ_r به ترتیب شار پیوندي سیم پیچي استاتور و میله‌هاي روتور هستند. گشتاور الکترومغناطیسي بر حسب متغیرهاي مدار معادل مغناطیسي از رابطه زیر به دست مي‌آید:

$$T_e = \sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r}(u_{2,i} - u_{3,j})\frac{dG_{i,j}}{d\gamma} \quad (١٣)$$

که در آن $\frac{dG_{i,j}}{d\gamma}$ مشتق پرمانس فاصله هوایي نسبت به زاویه روتور مي‌باشد. u_2 و u_3 نیز بترتیب پتانسیل

مغناطيسي اسكالر روي دندانه‌هاي استاتور و روتور در فاصله هوايي هستند.

مدلسازی و شبیه سازی ماشین سالم بروش مدار معادل مغناطیسی

متغيرهاي حالت در موتور القايي شامل شارپيوندي استاتور، شار پيوندي روتور، سرعت زاويه‌اي روتور و زاويه روتور نسبت به استاتور مي‌باشند كه از روابط زير پيروي مي‌كنند:

$$\frac{d\lambda_a}{dt} = -R_a i_a + V_a \sin(\theta_e) \quad (١٤)$$

$$\frac{d\lambda_b}{dt} = -R_b i_b + V_b \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \quad (١٥)$$

$$\frac{d\lambda_c}{dt} = -R_c i_c + V_c \sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \quad (١٦)$$

$$\frac{d\lambda_r}{dt} = -R_r . I_r \quad (١٧)$$

$$\frac{dw_m}{dt} = \frac{1}{j}(T_e - T_m) \quad (١٨)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = w_m \quad (١٩)$$

$$\frac{d\theta_e}{dt} = 2\pi f_e \quad (٢٠)$$

كه در آنها T_m, T_e, w_m, f_e و j به ترتيب فركانس شبكه سراسري، سرعت زاويه‌اي روتور، گشتاور الكترومغناطيسي، گشتاور بار و مجموع ممان اينرسي روتور و بار مي‌باشد.

معادلات (١٤) تا (١٨) وابسته به جريان‌هاي استاتور، جريان‌هاي روتور و گشتاور الكترومغناطيسي مي‌باشند. محاسبه آنها با استفاده از روش مدار معادل مغناطيسي امكان پذير است.

در صورتي كه سيم پيچي استاتور بصورت ستاره سر بندي شده باشد، به دليل عدم دسترسی به ولتاژ فاز در موتور القايي بایستی روابط بر اساس متغيرهاي خط بيان شوند. در حالت ستاره مجموع جريان‌هاي سه فاز برابر صفر است پس داريم:

$$M_0 . I_s = 0 \quad (٢١)$$

كه در آن :

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ab} & \lambda_{bc} \end{bmatrix} = M_{yn} \begin{bmatrix} \lambda_a & \lambda_b & \lambda_c \end{bmatrix}^T \quad (٢٢)$$

كه در آن:

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

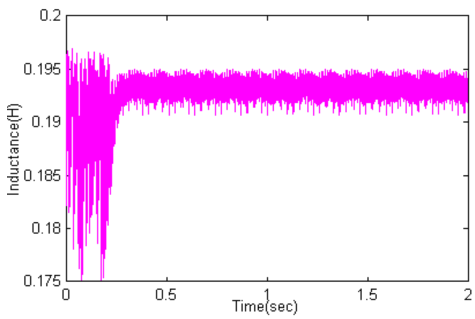
روابط (١٤)، (١٥) بصورت زير تغيير كرده و معادله(١٦) حذف مي‌گردد. بنابراين باجايگزيني دسته معادلات زير مي توان ماشين را با ولتاژ خط شبيه سازي كرد.

$$\frac{d\lambda_{ab}}{dt} = R_b i_b - R_a i_a + V_{ab} \sin(\theta_e) \quad (٢٣)$$

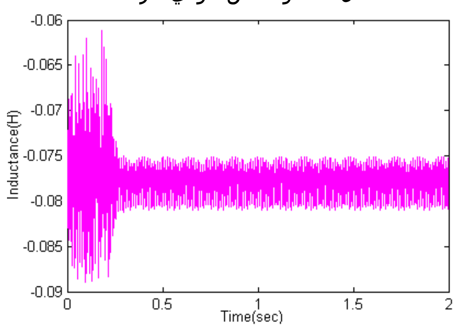
$$\frac{d\lambda_{bc}}{dt} = R_c i_c - R_b i_b + V_{bc} \sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \quad (٢٤)$$

موتور مورد نظر براي انجام شبيه‌سازي يك موتورالقايي سه فاز ، ٣ اسب بخار، ٣٨٠ ولت، ٥٠ هرتز، چهار قطب با اتصال ستاره ساخت شركت موتوژن مي‌باشد (مشخصات كامل آن در پيوست آمده است).

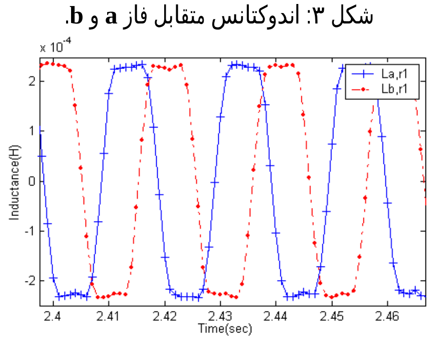
شكل‌هاي(٢) تا (٤) اندوكتانس‌هاي يک موتور القايي نمونه را كه مشخصات آن در ضميمه (١) آمده نشان مي‌دهند.



شكل٢: اندوكتانس خودي فاز **a**.

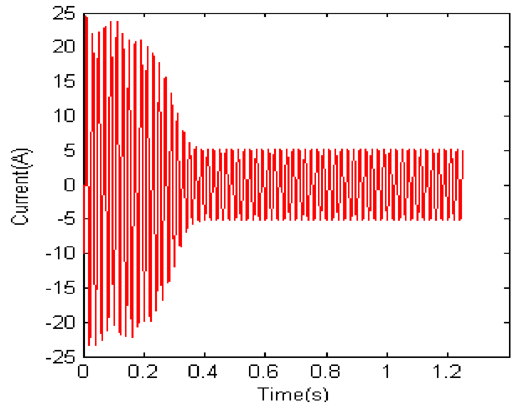


شكل ٣: اندوكتانس متقابل فاز **a** و **b**.

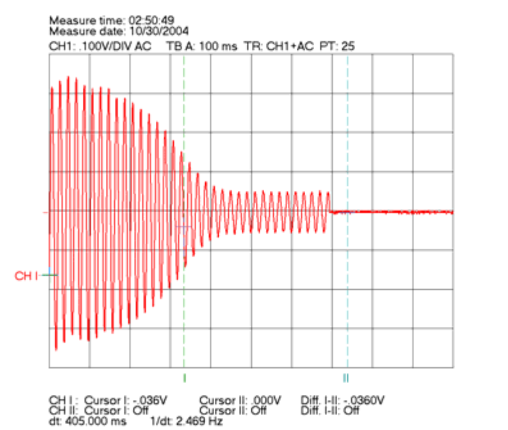


شكل ٤: اندوكتانس متقابل يک مش روتور و فاز**a** و **b**.

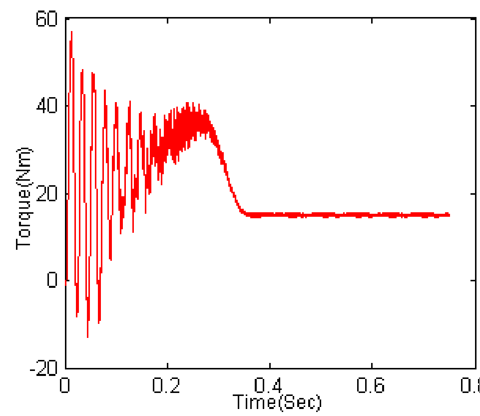
شکل(٥- الف) جریان فـازa اسـتاتور در حالـت شـبیه سـازي و شـکل(٥- ب) ایـن جریـان را در عمـل کـه بـا اسیلوسکوپ دیجیتال اخذ شده نشان مي‌دهـد. همچنـین شکل‌هاي (۶) ، (۷) و(۸) به ترتیب منحني هـاي گشـتاور، سرعت و جریـان یکـي از میلـه هـاي روتـور را در حالـت شبیه‌سازي نشان مي دهد.



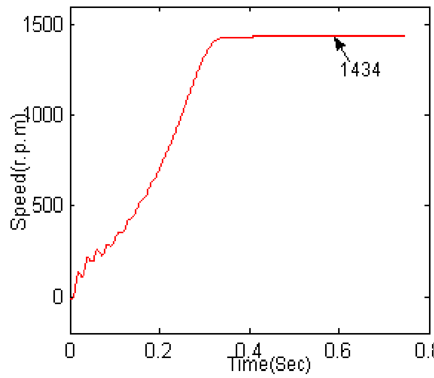
شکل ٥- الف: جریان فاز **"a"** (شبیه سازی).



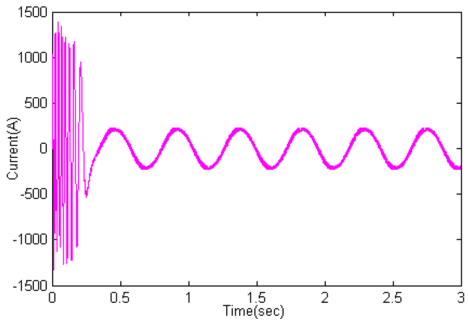
شکل ٥- ب: جریان فاز **"a"** (عملي).



شکل٦: مشخصه گشتاور – زمان (حاصل از شبیه سازي).



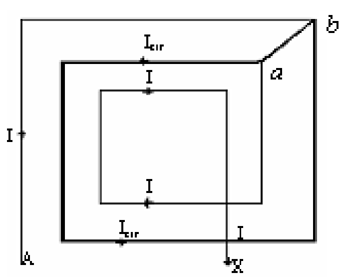
شکل٧: مشخصه سرعت- زمان (حاصل از شبیه سازي).



شکل ٨: جریان یک میله روتور در بار کامل
(حاصل از شبیه سازي).

مدل‌سازی خطای حلقـه بـه حلقـه و خطـای کلاف به کلاف

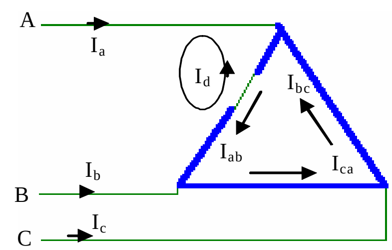
ابتدا ساده‌ترین حالت را که کلاف فقط يك دور دارد در نظر مي‌گیریم و چند نتیجه مهـم را از آنجا بـه دسـت مي‌آوریم. شکل(٩) دیاگرام سیم‌بندي يك فاز با سه کلاف متحدالمرکز يك دوري را نشان مي‌دهد. فرض مي‌شود که اتصال کوتاه کلاف به کلاف بین نقاط a و b مطابق شـکل اتفاق افتد.



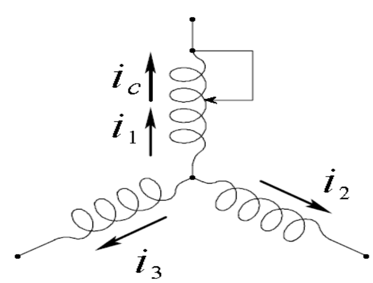
شکل ٩: اتصال کوتاه کلاف به کلاف بین نقاط **a** و **b**.

واضـح اسـت کـه مسـیر جریـان گردشـي (I_{cir}) همان‌طور که در شکل (٩) نشان داده شـده اسـت، بسـته

مي‌شود. براي تحليل مي‌توان مسير A-X را به دو مدار تقسيم كرد كه در يكي از مدارها جريان فاز (I) و در ديگري جريان I_{cir} جاري است. اين دو جريان يعني جريان فاز و جرياني كه در اتصال كوتاه جاري مي‌شود، m.m.f هاي مخالف هم توليد مي‌كنند. در نتيجه هنگامي كه خطاي اتصال كوتاه رخ مي دهد، m.m.f سيم‌پيچي فاز با به وجود آمدن اتصال كوتاه داخلي تغيير مي‌كند و اندوكتانس متقابل بين آن فاز و همة مدارهاي ديگر در ماشين تغيير مي‌كند. به علاوه يك فاز جديد كه فاز اتصال كوتاه شدة d ناميده مي‌شود به مجموعه سيم‌بندي ماشين اضافه مي شود، اين فاز ارتباط رسانايي با فازهاي ديگر نداشته ولي با سيم پيچي هاى استاتور و روتور به طور متقابل كوپل مي‌شود. فاز جديد d به صورت يك مدار مستقل با جريان خطاي I_d عمل مي‌كند. شكل‌هاي(١٠) و (١١) اين مدار مستقل را به ترتيب در اتصال ستاره و اتصال مثلث سيم‌پيچي استاتور نشان مي‌دهند.



شكل ١٠: فرم سيم‌پيچي استاتور هنگامي كه اتصال كوتاه داخلي اتفاق افتاده باشد(اتصال مثلث).

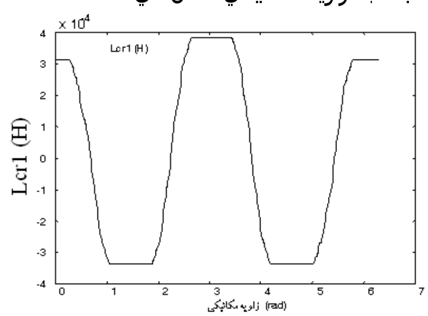


شكل ١١: فرم سيم‌پيچي استاتور هنگامي كه اتصال كوتاه داخلي اتفاق افتاده باشد(اتصال ستاره).

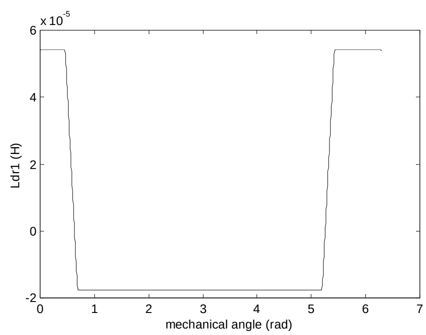
به منظور مدل‌سازي شرايط خطا، بايستي معادلات بر اساس شرايط جديد باز نويسي شوند. به همين منظور مي‌توان دورهاي اتصال كوتاه شده را يک فاز جديد در نظر گرفت با اين تفاوت كه ولتاژ اعمالي به آن صفر است. با توجه به محل وقوع خطا آرايش‌هاي مختلفي در سيم بندي اين فاز به وجود مي آيد. بنابراين تمام تغييرات با توجه به محل خطا و تعداد دور اتصال كوتاه شده در ماتريس w_s اعمال مي‌گردد تا مناسب شرايط جديد گردد. در اين حالت فرض بر اين است كه خطا ١٥ دوري در فاز c رخ داده است. بردارهاي ولتاژ و جريان استاتور با توجه به رابطه (١٣) تغييركرده و روابط حاكم بر موتور سالم با توجه به شرايط جديد بايستي بازنويسي شوند.

$$V_s = [v_a \;\; v_b \;\; v_c \;\; v_D] \qquad (٢٥)$$
$$I_s = [i_a \;\; i_b \;\; i_c \;\; i_f]$$

كه در آن $v_D = 0$ ولتاژ فاز اتصال كوتاه و i_f جريان فاز اتصال كوتاه است. شكل‌هاي(١٢) و (١٣) تغييرات اندوكتانس‌هاي متقابل بين فاز c و فاز d را با حلقه اول رتور نسبت به زاويه مكانيكي نشان مي‌دهند.



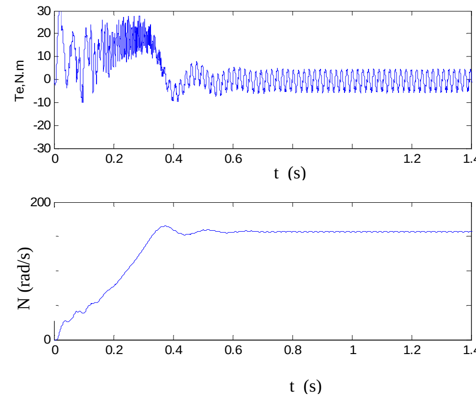
شكل١٢ : تغييرات اندوكتانس متقابل بين فاز **c** وحلقه اول رتور نسبت به زاويه مكانيكي.



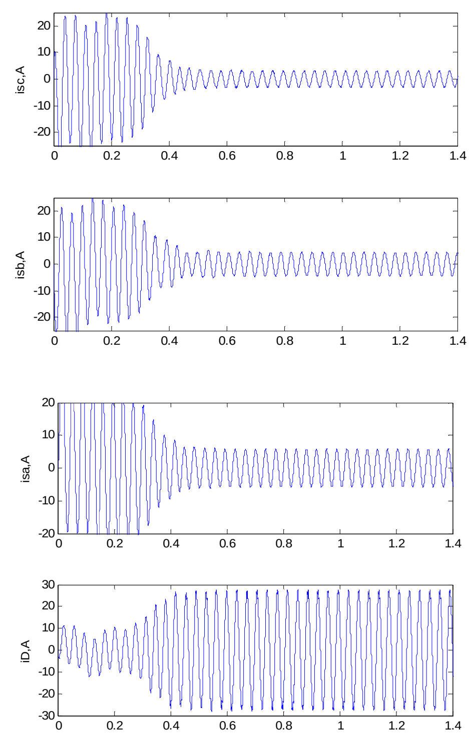
شكل١٣ : تغييرات اندوكتانس متقابل بين فاز **d** و حلقه اول رتور نسبت به زاويه مكانيكي.

شكل (١٤) نمودار تغييرات گشتاور الكترومغناطيسي و سرعت نسبت به زمان را نشان مي دهد. همچنين شكل (١٥) نمودار جريان فاز اتصال كوتاه d و جريان‌هاي فاز a,b,c را نشان مي دهد. وقتي خطاي حلقه به حلقه در فازc رخ مي‌دهد، تعداد دور فاز c تغيير مي‌كند و اين فاز نامتقارن مي‌شود. بدين سبب هارمونيك‌هاي فضايي جديدي به وجود مي‌آيد كه باعث

تغيير شكل نوسانات گشتاور همان‌گونه كه در شـكل (١٤) ديده مي‌شود، مي‌گردد. اين هارمونيك‌ها بـه جريـان‌هـاي استاتور نيز منتقل شده و باعث تغيير شكل اين جريـان‌هـا نسبت به حالت سالم ماشين مـي‌شـوند. همچنـين دامنـه جريان‌ها به علت كاهش m.m.f نسـبت بـه حالـت سـالم ماشين افزايش مي يابد. اثر برآيند خطاي حلقه بـه حلقـه، كاهش m.m.f توليدي استاتور مي‌باشد. به همـين خـاطر ماشين نسبت به حالت سالم خود ديرتر به وضعيت پايـدار خود مي‌رسد يا به عبارت ديگر ديرتر راه‌اندازي مي‌شود.



شكل١٤ : تغييرات گشتاور و سرعت نسبت به زمان در حالت خطاي حلقه به حلقه (٥ دور خطا).



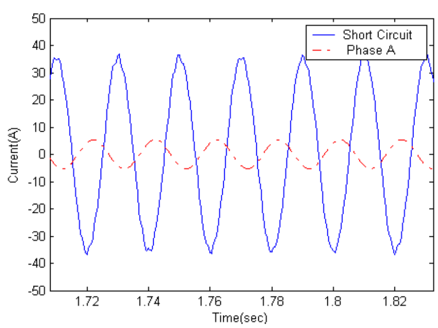
شكل١٥: جريان‌هاي فازهاي a,b,c و فاز اتصال كوتاه با ١٥ دور .

در اثر وقوع خطاي حلقه به حلقه انـدوكتانس‌هـاي موتـور القايي را تغيير مي دهد. اگر بتوان الگوي تغييـرات آنهـا را به سبب اين نوع خطا پيش بيني كرد، آنگاه مـي‌تـوان بـه كمك روش‌هاي تخمين پـارامتر مقـادير انـدوكتانس‌هـاي ماشين را به دست آورد و با توجه به تغييرات آنها، خطـا را تشخيص داد. در جدول(١) مقادير اندوكتانس‌هاي ماشـين در شرايط سالم و براي خطاهاي مختلف فاز a ارائـه شـده است.

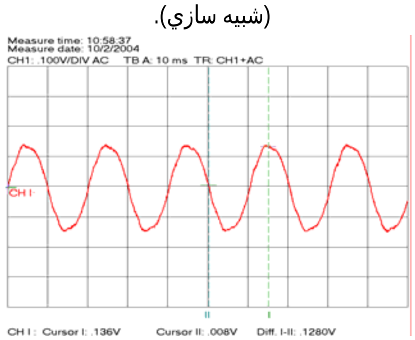
جدول ١: مقادير اندوكتانس‌هاي موتور القايي در حالت سالم و معيوب.

	سالم	٥ دور	٧ دور	١٠ دور
L_{aa} (mH)	١٩٧	١٩١	١٨٨	١٨٤
L_{bb} (mH)	١٩٨	١٩٩	١٩٩	١٩٨
L_{cc} (mH)	١٩٦	١٩٧	١٩٧	١٩٦
L_{ab} (mH)	-٧٩.٦	-٧٨.١	-٧٧.٧	-٧٦.٦
L_{bc} (mH)	-٧٩.٦	-٧٩.٤	-٧٩.٢	-٧٨.٦
L_{ca} (mH)	-٧٩.٦	-٧٨.١	-٧٧.٥	-٧٦.٤

همان‌طوري كه مشاهده مـي‌شـود انـدوكتانس‌هـاي خودي و متقابـل فـاز معيـوب بيشـترين كـاهش را نشـان مي‌دهند و مقـدار انـدوكتانس‌هـاي ديگـر ثابـت هسـتند. شكل‌هاي (١٦) و (١٧) جريان اتصال كوتـاه حلقـه اتصـال كوتاه شده را به ترتيب در حالت‌هاي شبيه سازي و عملـي نشان مي‌دهند



شكل ١٦: جريان اتصال كوتاه و جريان فاز معيوب (شبيه سازي).

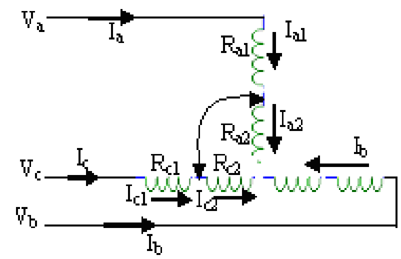


شكل ١٧: جريان اتصال كوتاه (عملي).

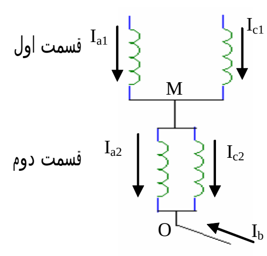
مدل‌سازی خطای فاز به فاز

وقتي خطاي فاز به فاز رخ ميدهد فازهايي كـه بهـم اتصال كوتاه شده‌اند هر كدام تبديل بـه دو فـاز مـي‌شـوند يعني در مجموع پنج جريان مجهول وجـود دارد. در ايـن بخش اتصال كوتاه بين فاز a و فاز c در موتور مـورد نظـر شبيه سازي قرار گرفته است.

سيم‌بندي استاتور با وجود خطاي فاز به فاز در شـكل (١٨) نشـان داده شـده اسـت. شـكل (١٩) مـدار معـادل فازهاي a و c بعد از خطا را نشان مي‌دهد.

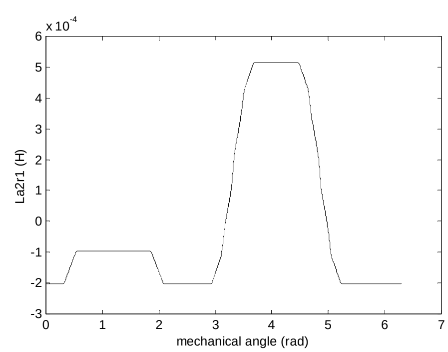


شكل ١٨: سيم‌بندي استاتور با خطاي فاز به فاز.

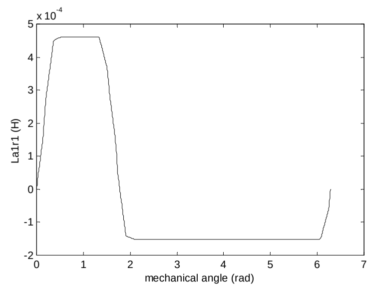


شكل ١٩:.مدار معادل فازهاي **a** و **c** بعد از اتصال كوتاه شدن.

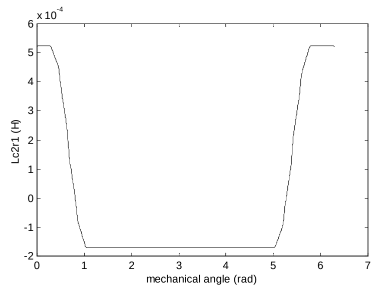
شكل (٢٠) تغييرات انـدوكتانس‌هـاي متقابـل بـين قسمت‌هاي اول و دوم فاز a و حلقه اول رتـور و همينطـور اندوكتانس‌هاي متقابل بين قسمت‌هاي اول و دوم فـاز c و حلقه اول رتور را نسبت به زاويه مكانيكي نشان مي‌دهد.



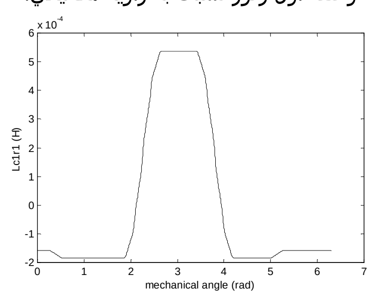
شكل٢٠- **a** : تغييرات اندوكتانس متقابل بين قسمت اول فاز **a** وحلقه اول رتور نسبت به زاويه مكانيكي.



شكل٢٠- **b** : تابع اندوكتانس متقابل بين قسمت دوم فاز **a** وحلقه اول رتور نسبت به زاويه مكانيكي.

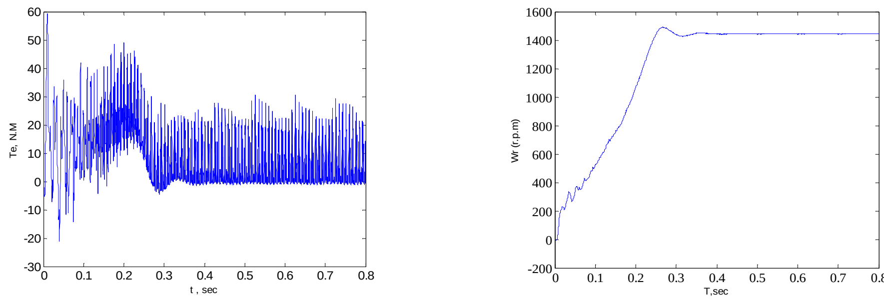


شكل٢٠- **c**: تغييرات اندوكتانس متقابل بين قسمت اول فاز **c** وحلقه اول رتور نسبت به زاويه مكانيكي.

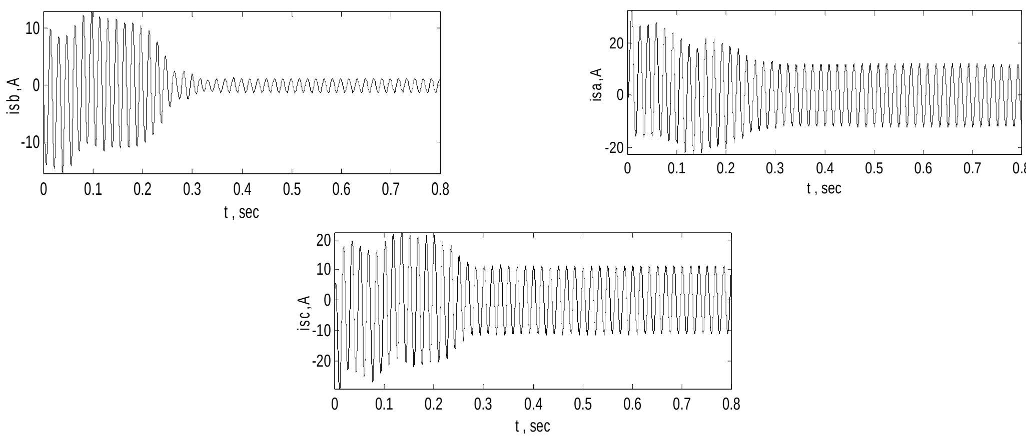


شكل٢٠- **d**: تغييرات اندوكتانس متقابل بين قسمت دوم فاز **c** وحلقه اول رتور نسبت به زاويه مكانيكي.

شكل هاي (٢١) و (٢٢) نتايج حاصل از شبيه‌سازي خطاي فاز به فاز (اتصال كوتاه شدن فـاز a بـه فـاز c در شيار چهارم استاتور) در حالت راه‌اندازي بدون بار را نشـان مي‌دهد. همچنان كه ديـده مـي‌شـود نوسـانات گشـتاور و سرعت موتور در اين نوع خطا نسبت بـه دو خطـاي قبلـي يعني خطاي حلقه به حلقه و كلاف به كلاف تغييـر شـكل قابل توجهي كرده است و از روي نوسانات گشتاور مي‌توان اين خطا را از دو خطاي قبلي تميز داد. علت اين است كـه هارمونيك‌هاي فضايي به وجود آمده از ايـن نـوع خطـا بـا هارمونيك‌هاي به وجود آمده از دو خطـاي قبلـي متفـاوت است و در نتيجه نوسانات گشتاور نيز متفاوت خواهد شـد. از مقايسه جريان فازها در حالت خطاي فاز به فاز و حالـت سالم ماشين مشاهده مـي‌شـود كـه دامنـه جريـان فـاز b تغييري نمي‌كند ولي دامنة جريان فازهاي a و c تقريباً



شکل ۲۱: نمودار تغييرات گشتاور و سرعت موتور در حالت خطاي فاز به فاز در راه اندازي بدون بار.



شکل۲۲: نمودارجريان فازهاي **a** ، **b** ، **c** استاتوردر حالت خطاي فاز به فاز در راه اندازي بدون بار.

ده برابر شده است. بنابراين، خطاي فاز به فاز نسبت به خطاهاي قبلي خطرناك‌تر است و احتمال سوختن سيم‌پيچي در اين نوع خطاها بيشتر است. البته ممكن است اين خطا نتيجة پيشروي خطاي حلقه به حلقه باشد و اگر خطاي حلقه به حلقه در همان مراحل اوليه تشخيص داده شود، از بروز خطاي فاز به فاز جلوگيري مي‌شود. بهمين خاطر است كه بيشتر محققين روي خطاي حلقه به حلقه كار كرده‌اند.

نتیجه گیری

روش مدار معادل مغناطيسي براي مدل كردن خطاي حلقه به حلقه سيم‌پيچي استاتور از دقت بالا و در عين حال از سرعت خوبي برخوردار است.

در مدل‌سازي انواع خطاهاي استاتور هارمونيك‌هاي فضايي در نظر گرفته مي‌شود و طبق نتايج حاصل از شبيه‌سازي‌ها مشاهده مي‌شود كه هارمونيك‌هاي فضايي اثر مستقيمي روي نوسانات گشتاور دارد و نوسانات گشتاور هم روي نوسانات سرعت تأثير مي‌گذارد. همچنين در حالت خطاي استاتور به علت اين كه m.m.f برآيند استاتور كاهش مي‌يابد، و در نتيجه موتور جريان بيشتري را از منبع كشيده و علي‌رغم بالا بودن جريان استاتور m.m.f فاصله هوايي كاهش يافته در نتيجه موتور در راه‌اندازي ديرتر به حالت پايدار مي رسد.

نتايج تجربي و شبيه سازي نشان مي دهند كه دامنة جريان فاز اتصال كوتاه d مستقل از تعداد دور اتصال كوتاه شده مي باشد و همچنين جريان فاز اتصال كوتاه d در خلاف جهت جريان خطادار است.

مراجع

1 - Albrecht, P. F., Appiarius, J. C., R. M. McCoy, et al, (1986). “Assessment of the reliability of motors in utility application-updated.” *IEEE Trans. Energy Con.* Vol. 1, PP. 39-46

2 - Stanley, H. C. (1938) ."An analysis of induction machine.” *IAEE Trans.* Vol. 57, PP. 751-757

3 - Hughes, F. M. and Alderd, A. S. (1964). “Transient characteristic of the induction motors.” *Proc. IEE*, Vol. 111, No. 12, PP. 2041-2050.

4 - Sarkar, A.K. and Berg, G. J. (1970). “Digital simulation of three phase induction motors.” *IEEE Trans. power Apparatus System.* PAS-89, No. 6, PP. 1031-1036.

5 - Krause, P. C. and Thomas, C. H. (1965). “Simulation of symmetrical induction machinery.” *IEEE Trans. power Apparatus System*, PAS-84, PP. 1038-1053

6 - Krause, P. C. (1986)."*Analysis of electric machinery*, McGraw-Hill.

7 - Krause, P. C. (1968). “Method of multiple reference frame applied to the analysis of symmetrical machinery.” *IEEE Tras. Power Appar. Sys.* PAS-87, PP. 218-227

8 - Toliyat, H. A. and Al-Nuiam, A. (1999). “Simulation and detection of dynamic eccentricity in salient-pole synchronous machine.” *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 35, No. 1, PP. 86-93

9 – Toliyat, H.A. and Lipo, T. A. (1995). “Transient analysis of cage induction machine under stator rotor bar and end ring fault.” *IEEE Trans Energy Conver.* Vol. 10, No. 2, PP. 241-247.

10 – Toliyat, H. A., Arefeen, M. S. and Parlos, A. G. (1996). “A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machine." *IEEE Trans. Ind. Appli*. Vol. 32, No. 4, PP. 910-917.

11 - Joksimovic, G. M. and Penman, J. (2000). “The detection of inter-turn short circuit in stator winding of operating motor.” *IEEE Trans. Ind. Appl*, Vol. 47, No. 5, PP. 1078-1084.

12 - Ho, S. L and Fu, W. N. (1998). “Review and further application of finite element methods in induction motors.” *Electrical Machine Power Syst.* Vol. 26, No. 2, PP. 111-125.

13 - Ostovic, V. (1986). “A method for evaluation of transient and steady state performance in saturated induction motors.” *IEEE Trans. Energy Con.* Vol. EC. 1 No. 3, PP. 190-197.

14 - Ostovic, V. (1988). “**A s**implified approach to magnetic equivalent-circuit modeling of induction machines.” *IEEE Trans on industry applications*, Vol. 24, No. 2, March/April, PP. 308-316.

15 - Ostovic, V. (1989). “A novel method for evaluation of transient and steady state in saturated electric machines.” *IEEE Trans. IA.* Vol. 25, No. 1, PP. 96-100.

16 - Ostovic, V. (1989*). Dynamics of saturated electric machines*, Springer-Verlag, PP. 445.

17 - Jong-Ho Jeong, Eun-Woong Lee, Hyun-Kil Cho (2003). “Analysis of transient state of the squirrel cage induction motor by using magnetic equivalent circuit method.” *6th international conference on electrical machine and system (ICEMS)*, PP. 720-723.

18 - Meshgin-kelk, H., Milimonfared, J. and Toliyat, H. A. (2004). “Current and axial flux in healthy and faulty induction motors.” *IEEE Trans. IA*, Vol. 40, No. 1, PP. 128-134.

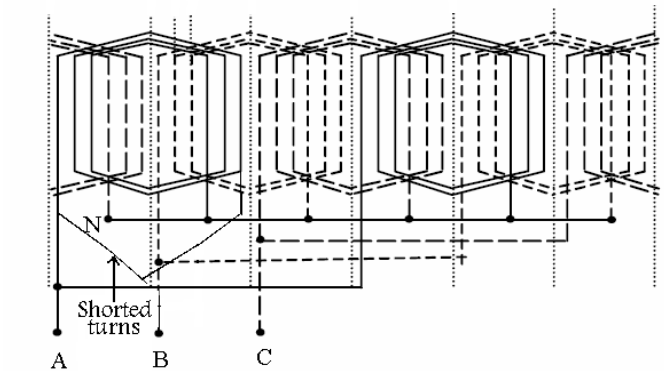
19 - Henao, H., Martis, C. and Capolino, G. A. (2004). “An quivalent internal circuit of the induction machine for advance spectral analysis.” *IEEE Trans. IA*, Vol. 40, No. 3, PP. 726-734.

20 - Scott Sudhoff D., Brian Kuhn, T., Keith Corzine, A. and Brian Branecky, T. (2007). “Magnetic equivalent circuit modeling of induction motors.” *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 22, Issue 2, PP. 259-270.

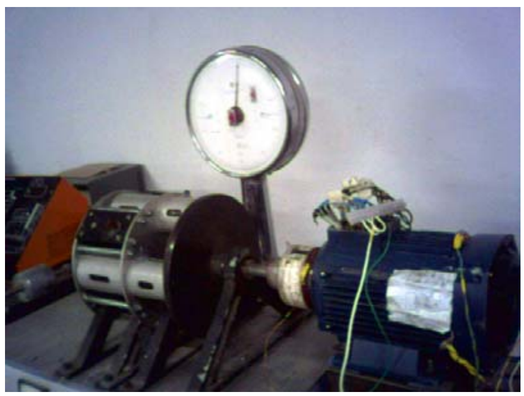
واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Coil
2 - Reference Frame Transform
3 - Finite Element
4 - Permeability
5 - Permeance
6 - Winding Transform Matrix
7 - Winding Matrix

پیوست



شکل ۲۳: سیم بندی استاتور و دورهای اتصال کوتاه شده.



شکل ۲۴: موتور القایی 2.2kW و ترمز فوکو به عنوان بار.

اطلاعات موتور القايي

۳ اسب بخار، ۳۶ شیار استاتور، ۲۸ میله روتور، ۴ قطب

دهانه شیار استاتور	۲/۳ mm
دهانه شیار روتور	۱/۱mm
عرض دندانه استاتور	۵/۵ mm
عرض دندانه روتور	۸/۹ mm
طول فاصله هوايي	۰/۳ mm
قطر داخلي استاتور	۹۰mm
قطر خارجي استاتور	۸۴/۶mm
تعداد دورهاي يک کلاف	۴۴ دور
تعداد کلاف‌هاي يک فاز	۶ دور
مقاومت هر فاز استاتور	۳ اهم
مقاومت میله‌هاي روتور	۷۵ میکرو اهم