

مدل دقیق جهت محاسبه اندوکتانس‌های ماشین‌های القایی در شرایط انواع عدم تقارن

حمید رضا اکبری رکن آبادی همایون مشگین کلک جعفر میلی منفرد
دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیر کبیر
تهران - ایران

واژه های کلیدی: محاسبه اندوکتانس، ماشین القایی، عدم تقارن، روش تابع سیم پیچ

چکیده

در این مقاله، روش دقیقی جهت محاسبه اندوکتانسهای ماشینهای القایی در شرایط عدم تقارن در تمام جهات ارائه شده است. سپس توابع شکاف هوایی و شعاع متوسط برای تعیین مدل هندسی ماشین القایی در شرایط انواع خروج از مرکزیت، عدم همراستایی محور رتور با استاتور و انحنای محور رتور با در نظر گرفتن اثر شیارهای استاتور و رتور و تورب میله های رتور ارائه شده است. در آخرین مرحله با استفاده از روش پیشنهادی و مدل هندسی ماشین، تأثیر تورب میله ها و میزان پیشرفت خطا در هر یک از شرایط خروج از مرکزیت، عدم همراستایی و انحنای محور رتور بر روی اندوکتانسهای موتور القایی قفس سنجابی سه فاز، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج شبیه سازی ارائه شده است.

۱- مقدمه

در تحلیل ماشینهای الکتریکی، روشهای تحلیلی که از تبدیلات ریاضی استفاده می کنند با قبول فرضیات زیادی

عملا قادر به تحلیل دقیق ماشینهای الکتریکی به ویژه در شرایط خطا نیستند. در این تحلیلها فاصله هوایی ماشین یکنواخت فرض شده و از هارمونیکهای فضایی حاصل از توزیع سیم بندی و نایکنواختی شکاف هوایی صرف نظر شده است. در مقابل روشهای تحلیل میدان مغناطیسی با داشتن دقت قابل قبول دارای سرعت بسیار کم و حافظه مورد نیاز بسیار بالایی هستند. روش تحلیلی دیگری 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، روش "تابع سیم پیچ" نام دارد. در [1] شکل توابع اندوکتانس ماشین القایی قفس سنجابی با در نظر گرفتن توزیع سیم بندیها و روش تابع سیم پیچ ارائه شده است. با توجه به این که در روش تابع سیم پیچ، هیچ محدودیتی در نحوه سیم بندی استاتور و قرار گرفتن میله های رتور وجود ندارد، تمام هارمونیکهای فضایی حاصل از توزیع سیم بندی، در مدلسازی وارد می شود. بنابراین این روش

در [14] با ارائه روشی جدید، ترکیبی از روشهای MWFA و مدار معادل مغناطیسی (MEC)، اثر شیارهای استاتور و رتور، تورب میله های رتور و افت نیروی محرکه مغناطیسی هسته، بر روی اندوکتانسهای ماشین در شرایط سالم و خروج از مرکزیت مورد بررسی قرار گرفته است. در جدید ترین تحقیق انجام شده برای محاسبه اندوکتانسهای ماشین القایی در شرایط عدم تقارن، مدل تابع سیم پیچ توسعه یافته است [15]. در این تحقیق برای محاسبه اندوکتانسها، شعاع متوسط ثابت در نظر گرفته شده است، در صورتیکه این پارامتر تابعی از موقعیت زاویه ای رتور (θ_r)، مرجع زاویه ای روی استاتور (ϕ) و موقعیت طولی روی محور موتور (Z) می باشد. در این تحقیق با استفاده از روش توسعه یافته، فقط حالت خروج از مرکزیت ایستای رتور با اثر تورب میله ها شبیه سازی شده و پیشنهاد شده که برای تطابق بیشتر نتایج شبیه سازی با نتایج حاصل از آزمایش، اثر شیارهای استاتور و رتور نیز در مدل لحاظ شود.

در این مقاله ابتدا روش ارائه شده در [15] اصلاح شده است. سپس توابع دقیقی برای شکاف هوایی و شعاع متوسط جهت محاسبه اندوکتانسها در شرایط انواع خروج از مرکزیت رتور، عدم همراستایی محور رتور و انحنای محور رتور با در نظر گرفتن اثر شیارهای استاتور و رتور و تورب میله های رتور ارائه شده است.

۲- معادلات ماشین القایی

یک ماشین القایی که دارای m مدار استاتور و n مدار رتور می باشد در نظر گرفته می شود. در ماشین القایی قفس سنجایی، قفس رتور را می توان متشکل از n حلقه که دقیقا مانند هم هستند و یک حلقه طوقه در نظر گرفت. حال می توان معادلات ماشین القایی را به صورت بردار-ماتریس نوشت.

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

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

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

ابزار مناسبی برای تحلیل ماشین در شرایط عدم تقارن و تشخیص خطا می باشد. روش تابع سیم پیچ برای مدلسازی انواع خطاهای سیم بندی استاتور [2] و [3]، خطای میله شکسته و حلقه انتهایی رتور [4] و [5]، مورد استفاده قرار گرفته و روشهای مختلفی برای تشخیص این نوع خطاها ارائه شده است. در [6] و [7] ماشین القایی قفس سنجایی با خروج از مرکزیت ایستا و پویا توسط تابع سیم پیچ کلاسیک شبیه سازی شده و بر اساس آن روشی برای تشخیص خروج از مرکزیت رتور از روی طیف هارمونیک جریانی استاتور ارائه شده است. لیکن با توجه به فرضیات روش تابع سیم پیچ، تحلیل فوق نادرست بود. زیرا استفاده از روابط تابع سیم پیچ کلاسیک برای حالت فاصله هوایی متغیر، برابری اندوکتانسهای متقابل L_{ba} و L_{ab} را نقض می کند. لذا در [8] فرض فاصله هوایی یکنواخت اصلاح گردید و روابط جدیدی برای محاسبه اندوکتانس در روش تابع سیم پیچ به دست آمد که آنرا "تابع سیم پیچ اصلاح شده" (MWFA) نامیدند. بعد از اصلاح روش تابع سیم پیچ برای حالت فاصله هوایی نا یکنواخت، تحقیقات زیادی در زمینه مدلسازی خطای خروج از مرکزیت و تشخیص آن توسط MWFA انجام شده است [9]، [10] و [11]. در [12] توابع دقیقتری برای شکاف هوایی و شعاع متوسط جهت محاسبه اندوکتانسهای ماشین القایی قفس سنجایی سه فاز در حالت خروج از مرکزیت مرکب ارائه شده است. در [13] با تعریف اندوکتانس در واحد طول، اندوکتانسهای ماشین القایی با در نظر گرفتن اثر تورب میله ها محاسبه شده است. شکل و دامنه اندوکتانس تعریف شده در این مقاله ثابت است و عدم تقارن در جهات طولی و شعاعی در نظر گرفته نشده است.

در تمام مقالات ذکر شده، از شیارهای رتور و استاتور صرفنظر شده و شبیه سازی بر این فرض بوده است که ماشین در راستای طولی متقارن است. در این صورت مدلسازی پدیده هایی نظیر عدم همراستایی محور رتور با استاتور، انحنای محور رتور و اثر تورب میله های رتور (با در نظر گرفتن عدم تقارن در جهات شعاعی و طولی) غیر ممکن است.

$$\lambda_r = L_{rs} \cdot I_s + L_{rr} \cdot I_r \quad (4)$$

۳- مدل اصلاح شده جهت محاسبه اندوکتانسها در

شرایط عدم تقارن

در [15], Bossio برای محاسبه اندوکتانسهای ماشین القایی در شرایط عدم تقارن، مدل تابع سیم پیچ اصلاح شده (MWF) را توسعه داد و نام مدل جدید را "تابع سیم پیچ اصلاح شده دو بعدی" (2-DMWF) نامید. در ماشین القایی برای هر یک از سیم پیچهای استاتور و حلقه های رتور که شامل دو میله مجاور و قسمتی از حلقه های انتهایی می باشد، می توان این تابع را تعریف کرد. این تابع به صورت زیر می باشد.

$$N(\phi, z, \theta_r) = n(\phi, z, \theta_r) - \frac{1}{2\pi L(g^{-1}(\phi, z, \theta_r))} \times \int_0^{2\pi L} \int_0^L n(\phi, z, \theta_r) g^{-1}(\phi, z, \theta_r) dz d\phi \quad (8)$$

برای به دست آوردن روابط اندوکتانس، دو مدار A و B را در نظر می گیریم. هر یک از این دو مدار می تواند یکی از سیم پیچهای استاتور یا حلقه های رتور باشد. توزیع نیروی محرکه ناشی از جاری شدن جریان i_A در مدار A برابر است با:

$$F_A(\phi, z, \theta_r) = N_A(\phi, z, \theta_r) i_A \quad (9)$$

در سیستم خطی شبه انرژی با انرژی برابر است در نتیجه:

که در آن، N_A تابع سیم پیچ اصلاح شده دو بعدی می باشد.

در معادلات فوق، V_r و V_s به ترتیب بردارهای ولتاژ مدارهای استاتور و رتور هستند. V_s بردار معلوم ولتاژ تغذیه ماشین و V_r برای ماشینهای القایی قفس سنجابی، بردار صفر است. λ_r و λ_s به ترتیب بردارهای شار دور مدارهای استاتور و حلقه های رتور می باشند. R_r و R_s ماتریسهای مقاومت مدارهای استاتور و رتور هستند که از تحلیل مش بدست می آیند. L_{ss} ماتریس $m \times m$ شامل اندوکتانسهای خودی و متقابل استاتور، L_{rr} ماتریس $n \times n$ شامل اندوکتانسهای خودی و متقابل حلقه های رتور و L_{sr} نیز، ماتریس اندوکتانس متقابل مدارهای استاتور و حلقه های رتور می باشد که یک ماتریس $m \times n$ است.

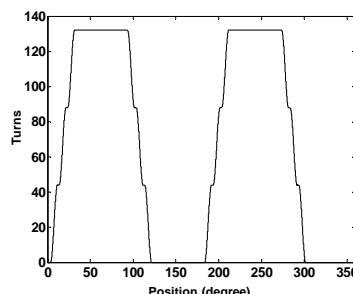
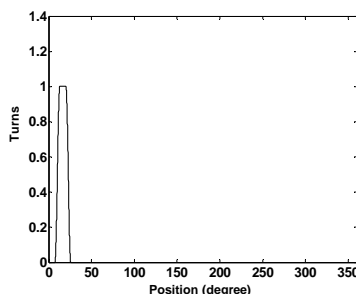
معادلات دیفرانسیل مکانیکی ماشین به صورت زیر می باشد.

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (5)$$

$$T_e = \frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_{rm}} \quad (6)$$

$$W_{co} = \frac{1}{2} I^T \cdot L \cdot I = \quad (7)$$

$\frac{1}{2} (I_r^T \cdot L_{rr} \cdot I_r + I_r^T \cdot L_{rs} \cdot I_s + I_s^T \cdot L_{sr} \cdot I_r + I_s^T \cdot L_{ss} \cdot I_s)$
با توجه به معادلات بالا برای مدل سازی ماشینهای القایی ابتدا باید اندوکتانسها محاسبه شوند. اندوکتانسها نقش بسیار مهمی در مدل سازی ماشین دارند و باید به دقت محاسبه شوند.



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

با توجه به رابطه (۱۴)، توابع دور، سیم پیچ، شکاف هوایی و شعاع متوسط تابعی از موقعیت زاویه ای روتور (θ_r) ، مرجع زاویه ای روی استاتور (ϕ_r) و موقعیت طولی روی محور موتور (z) می باشد. بنابراین اندوکتانسهای ماشین القایی را در شرایط انواع عدم تقارن در تمام جهات می توان محاسبه کرد.

جهت مدلسازی اثر شیار، می توان تغییرات رلوکتانس بالای شیار را متناظر با یک فاصله هوایی متغیر که فقط به مشخصات هندسی شیار بستگی دارد مرتبط کرد [16]. در این صورت علاوه بر هارمونیکهای فضایی ناشی از توزیع سیم بندی، هارمونیکهای شیار نیز در مدلسازی وارد می شود.

در این مقاله تغییرات MMF بالای شیارها به صورت سینوسی در نظر گرفته شده است. شکل (۱) توابع دور مربوط به فاز a استاتور و حلقه اول رتور (در یک مقطع از رتور) را نشان می دهد.

۴- محاسبه اندوکتانسها در شرایط انواع عدم تقارن

در این بخش، اندوکتانسهای ماشین القایی قفس سنجایی سه فاز که اطلاعات آن در ضمیمه آمده است، در شرایط عدم تقارن محاسبه شده است. برای محاسبه اندوکتانسها، با استفاده از رابطه ۱۴، دو تابع مهم شکاف هوایی و شعاع متوسط مورد نیاز می باشد. بنابر این توابع دقیقی برای شکاف هوایی و شعاع متوسط در شرایط عدم تقارن نظیر تورب میله های رتور، عدم همراستایی محور رتور با استاتور و انحناى محور

شار جزئی عبوری از سطح دیفرانسیلی $r(\phi, z, \theta_r) dz d\phi$ حاصل از جریان مدار A برابر است با:

$$d\phi = \mu_0 F_A(\phi, z, \theta_r) g^{-1}(\phi, z, \theta_r) r(\phi, z, \theta_r) dz d\phi \quad (10)$$

شار گذرنده از مدار B حاصل از جریان مدار A برابر است با:

$$\phi_B = \mu_0 \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} \int_{z_1(\Phi)}^{z_2(\Phi)} r(\phi, z, \theta_r) N_A(\phi, z, \theta_r) i_A g^{-1}(\phi, z, \theta_r) dz d\phi \quad (11)$$

شار دور عبوری از B (λ_B) برابر است با حاصلضرب تعداد دور B و ϕ_B . اما چون تابع دور سیم پیچ B، (n_B) ، در موقعیت مکانی سیم پیچ B برابر تعداد دور سیم پیچ است و در سایر جاها صفر است، شار دور گذرنده از مدار B حاصل از جریان مدار A را می توان به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\lambda_B = \mu_0 \int_0^{2\pi L} \int_0^{2\pi L} r(\phi, z, \theta_r) n_B(\phi, z, \theta_r) N_A(\phi, z, \theta_r) \times \quad (12)$$

$$i_A g^{-1}(\phi, z, \theta_r) dz d\Phi$$

بنابر این اندوکتانس متقابل بین مدارهای A و B با تقسیم

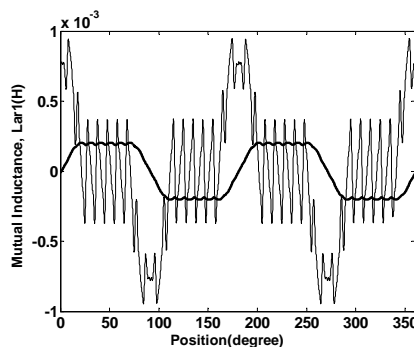
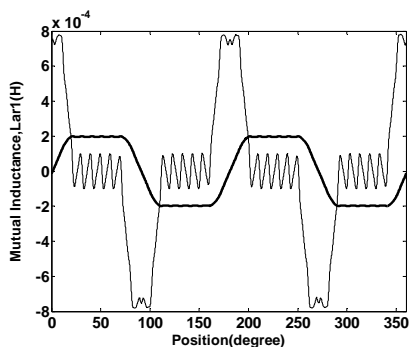
رابطه (۱۲) بر i_A به دست می آید.

$$L_{BA}(\theta_r) = \frac{\lambda_B}{i_A} \quad (13)$$

$$L_{BA}(\theta_r) = \mu_0 \int_0^{2\pi L} \int_0^{2\pi L} \frac{r(\phi, z, \theta_r) n_B(\phi, z, \theta_r) N_A(\phi, z, \theta_r)}{g(\phi, z, \theta_r)} dz d\phi \quad (14)$$

در نتیجه، رابطه به دست آمده در [15]، به صورت (۱۴)

اصلاح می شود.



شکل (۲) - اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور (Lar1) و مشتق آن، بدون اثر تورب میله ها (سمت راست) و با اثر تورب میله ها (سمت چپ).

دست آورد. در نتیجه، تابع فاصله هوایی با اثر تورب میله‌ها به صورت زیر بیان می‌شود.

$$g_s(\phi, z, \theta_r) = g(\phi, \theta_r - \frac{\lambda}{l} z) \quad (15)$$

شعاع متوسط نیز برابر است با:

$$r_{av}(\phi, z, \theta_r) = r_{sta}(\phi) - \frac{g_s(\phi, z, \theta_r)}{2} \quad (16)$$

در رابطه بالا، l طول محور رتور، λ : میزان تورب میله‌های رتور بر حسب رادیان، θ_r : موقعیت زاویه ای رتور بر حسب رادیان، ϕ : موقعیت زاویه ای نسبت به ناظر ساکن در استاتور، $g(\phi, \theta_r)$: تابع فاصله هوایی در مقطع ابتدایی رتور و $r_{sta}(\phi)$ تابع شعاع داخلی استاتور می‌باشد. به علت در نظر گرفتن اثر شیارهای استاتور، شعاع استاتور تابعی از (ϕ) می‌باشد.

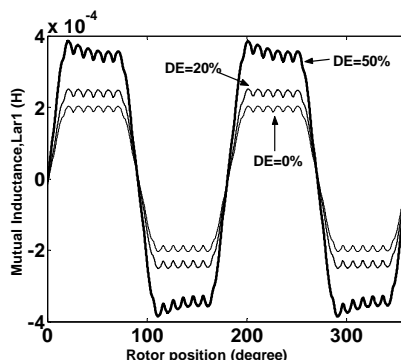
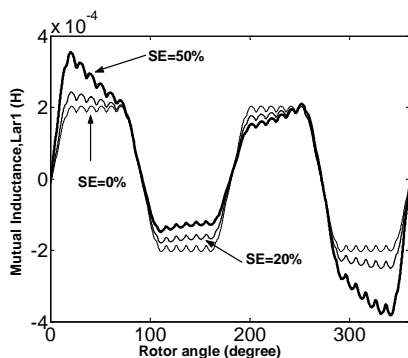
در شکل (۲) اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور (L_{ar1}) و مشتق آن با اثر تورب میله‌ها و بدون اثر آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تورب میله‌ها باعث یکنواخت تر شدن شکل اندوکتانسها می‌شود.

نکته مهمی که باید مورد توجه قرار گیرد این است که تورب میله‌ها هیچ تاثیری بر روی اندوکتانسهای خودی و متقابل استاتور و همچنین اندوکتانسهای رتور ندارد. تورب میله‌ها فقط بر روی اندوکتانسهای متقابل (L_{sr}) تاثیر می‌گذارد.

رتور به دست آمده و اندوکتانسهای ماشین در این شرایط محاسبه شده است. تاثیر تورب میله‌ها و میزان پیشرفت خطا در هر یک از شرایط خروج از مرکزیت، عدم همراستایی و انحنای محور رتور بر روی اندوکتانسهای ماشین مورد بررسی قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

۴-۱- تورب میله‌های رتور

در ماشینهای الکتریکی به منظور کاهش نوسان گشتاور و کاهش تمایل به قفل شدن مغناطیسی ماشین، میله‌های رتور به صورت مورب قرار می‌گیرند. تورب میله‌ها در ماشینهای الکتریکی باعث می‌شود که شکاف هوایی در راستای طولی ماشین متغیر گردد. بنابراین برای محاسبه اندوکتانسها در این حالت باید از رابطه (۱۴) استفاده کرد. برای به دست آوردن تابع فاصله هوایی می‌توان ماشین را در راستای محور طولی به مقاطع عرضی تقسیم بندی کرد که در هر مقطع عرضی از ماشین میله‌ها بدون تورب اند. موقعیت میله‌ها در مقاطع مختلف نسبت به موقعیت میله‌ها در مقطع ابتدایی در جهت مماسی جابجایی دارند که این جابجایی به موقعیت طولی آن مقطع بستگی دارد و به صورت خطی تغییر می‌کند. بنابر این با مشخص بودن موقعیت میله‌ها در مقطع ابتدایی و زاویه تورب میله‌ها می‌توان موقعیت میله‌ها را در مقاطع مختلف به



شکل (۳) - تغییرات اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور نسبت به موقعیت زاویه ای رتور به ازای مقادیر مختلف خروج از مرکزیت پویا (سمت راست) و ایستا (سمت چپ).

$$r_{av}(\phi, z, \theta_r) = r_{sta}(\phi) - \frac{g_e(\phi, z, \theta_r)}{2} \quad (18)$$

در روابط بالا، δ_s : در صد خروج از مرکزیت ایستا، δ_d : در صد خروج از مرکزیت پویا، 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 میله‌ها یا بدون اثر آن) می‌باشد. در شکل (۳) 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. 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 (رابطه ۱۷). واضح است که در حالت خروج از مرکزیت ایستا، اندوکتانسهای خودی و متقابل حلقه‌های رتور تابعی از θ_r می‌باشند و اندوکتانسهای خودی و متقابل سیم‌بندیهای 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 (۴) مشاهده می‌شود، اثر شیارهای استاتور و رتور می‌باشد. در شکل (۵) نیز اندوکتانس متقابل بین فاز a استاتور و حلقه اول رتور و مشتق آن، در حالت خروج از مرکزیت مرکب با اثر تورب میله‌ها و بدون اثر آن نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز با اثر تورب میله‌ها شکل اندوکتانس یکنواخت‌تر شده است.

۲-۴- خروج از مرکزیت رتور

همان‌طور که در [12] بیان شده است پدیده خروج از مرکزیت رتور به سه نوع تقسیم بندی می‌شود.

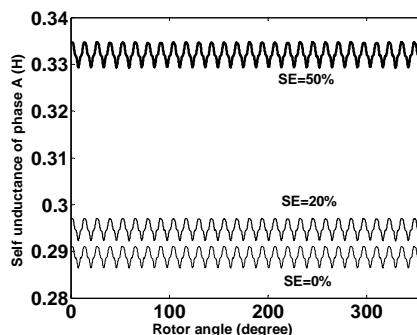
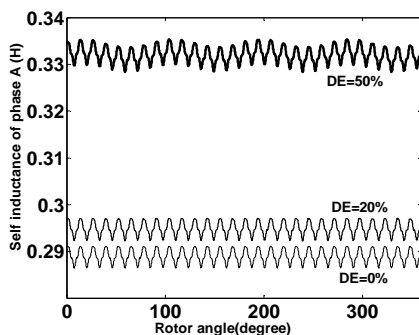
۱- خروج از مرکزیت ایستا: در این نوع خروج از مرکزیت، محور رتور از دید ناظر ساکن همواره ساکن است. موقعیت کمترین فاصله هوایی نیز همیشه ساکن است. خروج از مرکزیت ایستا می‌تواند بر اثر تغییر شکل استاتور یا جابجایی محور رتور نسبت به استاتور (به شرطی که با آن موازی بماند) به وجود آید.

۲- خروج از مرکزیت پویا: در این نوع خروج از مرکزیت محور رتور همواره با چرخش رتور جابجا می‌شود. بنابر این موقعیت کمترین یا بیشترین فاصله هوایی نیز با چرخش رتور می‌چرخد.

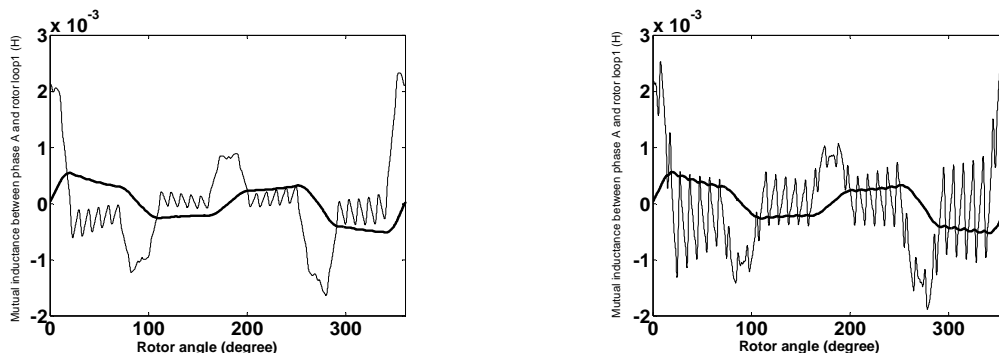
۳- خروج از مرکزیت مرکب: در این حالت هر دو نوع خروج از مرکزیت به طور همزمان در ماشین وجود دارد.

خروج از مرکزیت از هر نوعی که باشد باعث عدم تقارن فاصله هوایی در راستای شعاعی می‌شود. بنابر این در صورتیکه از تورب میله‌ها صرف نظر شود برای محاسبه اندوکتانسها می‌توان از روابط [12] استفاده کرد. اما با وجود تورب میله‌ها علاوه بر راستای شعاعی در راستای طولی نیز عدم تقارن به وجود می‌آید و باید از رابطه (۱۴) استفاده کرد. در این صورت روابط شکاف هوایی و شعاع متوسط در حالت خروج از مرکزیت مرکب به صورت (۱۷) و (۱۸) می‌باشد.

$$g_e(\phi, z, \theta_r) = g_h(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_s \cos(\phi - \phi_0) - \delta_d \cos(\phi - \phi_0 - \theta_r)) \quad (17)$$



شکل (۴)-اندوکتانس خودی فاز a استاتور نسبت به موقعیت زاویه ای رتور در دو حالت خروج از مرکزیت ایستا(سمت راست) و پویا (سمت چپ).



شکل (۵) - 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 (سمت چپ) و بدون اثر تورب میله ها (سمت راست)

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 و برای محاسبه اندوکتانسها در این حالت باید از (۱۴) استفاده کرد.

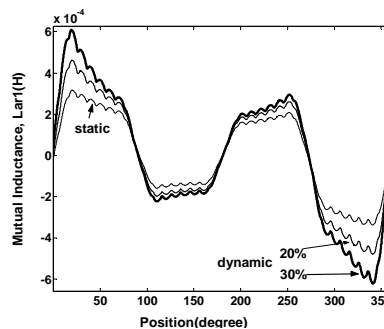
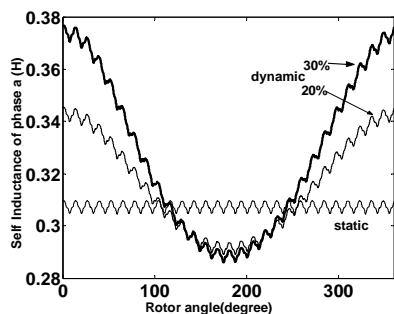
رابطه زیر تابع فاصله هوایی ماشین را در حالت انحراف پویای محور رتور بیان می کند.

$$g_{mis}(\phi, z, \theta_r) = g_h(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_s(z) \cos(\phi - \phi_0) - \delta_d \cos(\phi - \theta_r - \phi_0)) \quad (19)$$

به علت این که پارامترهای خروج از مرکزیت در امتداد محور طولی ماشین به صورت خطی تغییر می کند، پارامترهای خروج از مرکزیت هر مقطع از رتور را می توان بر حسب پارامترهای خروج از مرکزیت ابتدا و انتهای ماشین بیان کرد. بنابر این میزان خروج از مرکزیت در مقاطع مختلف به صورت (۲۰) تغییر می کند.

۳-۴- عدم همراستایی محور رتور با استاتور

بیش از نیمی از خطاهایی که در ماشینهای الکتریکی رخ می دهد مربوط به عیوب یاتاقان، بلبرینگها، محور و اتصالات می باشد. مهمترین مشکلی که این خطاها ایجاد می کند از بین رفتن انطباق محور رتور از مرکز ماشین می باشد. در این شرایط در صورتیکه محور رتور با محور استاتور موازی نباشد، اصطلاحا این پدیده را "عدم همراستایی محور رتور" گویند. این پدیده همانند پدیده خروج از مرکزیت رتور می تواند دو وضعیت ایستا و پویا داشته باشد. در صورتیکه رتور حول محوری ساکن بچرخد انحراف محوری ایستا و چنانچه محور چرخش رتور جابجا گردد انحراف محوری پویا رخ داده است. پدیده انحراف محوری رتور را می توان حالت کلی تری از پدیده خروج از مرکزیت در نظر گرفت که در آن پارامترهای خروج از مرکزیت تابعی



شکل (۶) - اندوکتانسهای موتور القایی در سه حالت عدم همراستایی ایستا ($\delta_s(0) = 20\%$, $\delta_s(l) = 60\%$, $\delta_D = 20\%$) پویا ($\delta_s(0) = 20\%$, $\delta_s(l) = 60\%$, $\delta_D = 20\%$) و پویای ($\delta_s(0) = 20\%$, $\delta_s(l) = 60\%$, $\delta_D = 30\%$). اندوکتانس متقابل بین حلقه اول رتور و فاز a استاتور (سمت راست)، اندوکتانس خودی فاز a استاتور (سمت چپ).

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 مقاله برای مدلسازی تغییرات شکاف هوایی در راستای محور طولی تابع سینوسی انتخاب شده است که نسبت به تابع خطی تطابق بیشتری با واقعیت دارد.

$$g_b(\phi, z, \theta_r) = g_r(\phi, z, \theta_r)(1 - \delta_s(z) \cos(\phi - \phi_0)) \quad (22)$$

$$r_{av}(\phi, z, \theta) = r_{sta}(\phi) - \frac{g_b(\phi, z, \theta_r)}{2} \quad (23)$$

$$\delta_s(z) = \delta_m \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \quad (24)$$

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 (۷) اندوکتانسها در حالت انحنای محور رتور با حالت سالم مقایسه شده است. 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.

$$\delta_s(z) = \delta(0) + \frac{\delta(l) - \delta(0)}{l} z \quad (20)$$

که در آن $\delta(0)$ و $\delta(l)$ به ترتیب میزان خروج از مرکزیت در ابتدا و انتهای رتور می باشد.

شعاع متوسط نیز به صورت زیر بیان می شود.

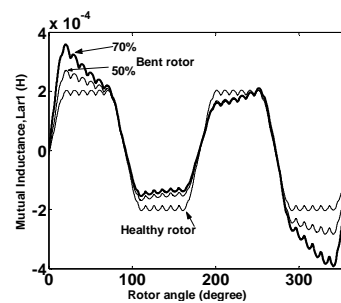
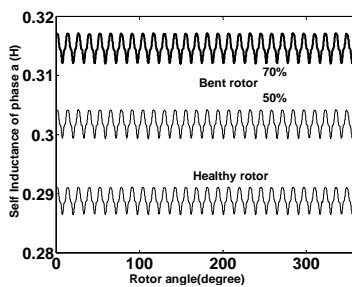
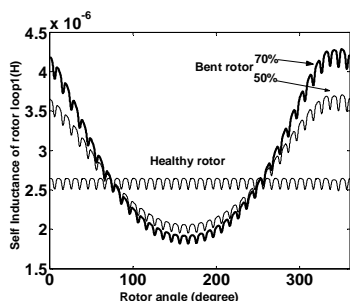
$$r_{av}(\phi, z, \theta_r) = r_{sta}(\phi) - \frac{g_{mis}(\phi, z, \theta_r)}{2} \quad (21)$$

مشخص است که در حالت ایستا، δ_d برابر صفر است.

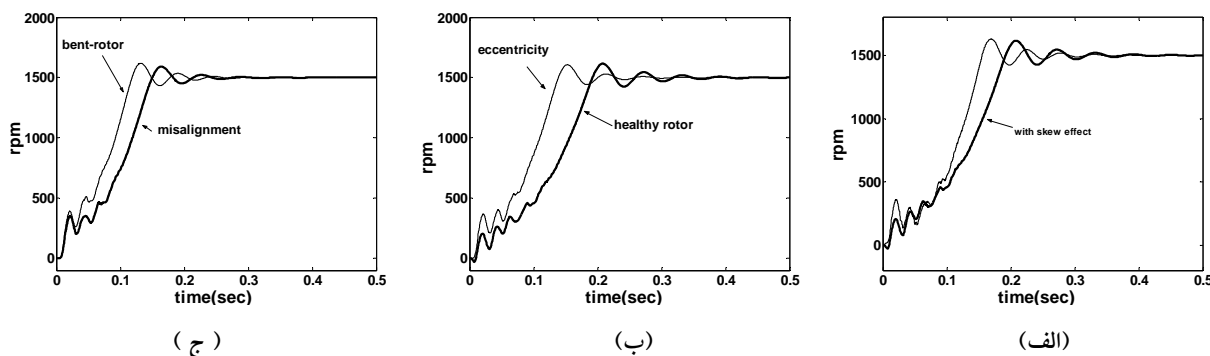
در شکل (۶) اندوکتانسهای موتور القایی سه فاز در حالات عدم همراستایی ایستا و پویا نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در حالت ایستا فقط اندوکتانس خودی فاز a استاتور ثابت است و بقیه اندوکتانسها تابعی از موقعیت زاویه ای رتور هستند. در حالت پویا نیز دامنه اندوکتانسها افزایش یافته و هیچکدام از اندوکتانسها ثابت نیستند.

۴-۴-۴- انحناى محور رتور

در ماشینهای الکتریکی علاوه بر نیروهای مماسی که باعث تولید گشتاور می شوند، نیروهای شعاعی نیز وجود دارند. در ماشینهای متقارن و متعادل، بر آیند نیروهای شعاعی صفر است. اما اگر به هر دلیلی (عدم تقارن و تعادل الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی) برآیند نیروهای شعاعی وارد بر رتور یکدیگر را خنثی نکنند کششی در جهت بر آیند نیروهای شعاعی به وجود می آید که به آن "کشش نامتعادل مغناطیسی" گفته می شود [17]. در ماشینهای الکتریکی با طول زیاد، جرم زیاد رتور و نیروهای نامتعادل مغناطیسی ممکن است باعث انحنای محور رتور شود. انحنای محور



شکل (۷) - اندوکتانسهای موتور القایی در حالت سالم و انحنای محور رتور ($\delta_m = 70\%$, 50%). از سمت راست به چپ: اندوکتانس متقابل بین حلقه اول رتور و فاز a استاتور، اندوکتانس خودی فاز a استاتور و اندوکتانس خودی حلقه اول رتور.



شکل (۸) - سرعت رتور هنگام راه اندازی بدون بار. الف: با تورب و بدون تورب میله ها-ب: حالت سالم و خروج از مرکزیت (SE=25%) -ج: حالت انحراف ($\delta_s(0) = 20\%$, $\delta_s(1) = 40\%$) و انحنای ($\delta_m = 50\%$) محور رتور.

نتیجه افزایش نرخ تغییرات انرژی نسبت به حالت سالم می باشد. برای نمونه مشتق اندوکتانس در حالت خروج از مرکزیت مرکب در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود حداکثر دامنه مشتق بیش از دو برابر حالت سالم (شکل ۲) می باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، با تصحیح روش ارائه شده در [15] و ارائه توابع فاصله هوایی و شعاع متوسط برای انواع شرایط عدم تقارن، ابتدا اندوکتانسهای ماشین القایی قفس سنجابی سه فاز در شرایط خروج از مرکزیت، انحراف و انحنای محور رتور با در نظر گرفتن اثر شیارها و تورب میله ها، محاسبه شده، سپس ماشین القایی در این شرایط شبیه سازی شده است. با توجه به این که در مدل اصلاح شده، توابع دور، سیم پیچ، شکاف هوایی و شعاع متوسط تابعی از موقعیت زاویه ای روتور (θ_r)، مرجع زاویه ای روی استاتور (ϕ) و موقعیت طولی روی محور موتور (z) می باشد انواع عدم تقارن در تمام جهات را می توان با این روش مدلسازی کرد. توابع شکاف هوایی و شعاع متوسط بیانگر مدل هندسی موتور در همه شرایط می باشد. بنابراین دقت اندوکتانسهای محاسبه شده تا حدود زیادی به دقت این توابع بستگی دارد.

عدم همراستایی ایستا و انحنای محور رتور را می توان حالت کلی تری از خروج از مرکزیت ایستا و عدم همراستایی

۵- شبیه سازی ماشین القایی

در این بخش با استفاده از اندوکتانسهای محاسبه شده و روابط (۱) - (۷) موتور القایی قفس سنجابی سه فاز شبیه سازی شده است.

شکل (۸-الف)، سرعت رتور هنگام راه اندازی بدون بار در دو حالت با تورب و بدون تورب میله ها را نشان می دهد. مشاهده می شود که با اثر تورب میله ها نوسانات سرعت هنگام راه اندازی موتور کمتر است ولی موتور دیر تر به سرعت نامی می رسد. این پدیده از قبل نیز مورد انتظار بود، زیرا گشتاور الکترومغناطیسی به مشتق اندوکتانس متقابل (LSF) بستگی دارد. با مورب شدن میله ها شکل اندوکتانس یکنواخت تر شده و مشتق آن کاهش می یابد. در نتیجه با مورب کردن میله های رتور اگرچه نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی کاهش می یابد، دامنه آن نیز کاهش می یابد.

در شکل‌های (۸-ب) و (۸-ج) سرعت رتور هنگام راه اندازی بدون بار در شرایط سالم، خروج از مرکزیت، انحراف ایستای رتور و انحنای محور رتور نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود شکل کلی سرعت موتور در شرایط انحراف و انحنای محور رتور مانند حالت خروج از مرکزیت می باشد. همچنین در هر سه شرایط خطا نسبت به حالت سالم، موتور سریعتر به حالت پایدار می رسد. راه اندازی سریعتر موتور در شرایط انحنای محور رتور و خروج از مرکزیت رتور به علت افزایش مشتق اندوکتانس متقابل (LSF) و در

- Ind. Applicat. Vol. 35, pp. 1000-1006, sep. 1999.
- [6] H. A. Toliyat, M. Areffen, and A. Parlos, "A Method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines," IEEE Trans. Ind. Applicat. Vol.32, pp.910-918, July 1996.
- [7] M. G. Joksimovic, D. M. Durovic, j. Penman, and N. Arthur, "Dynamic simulation of dynamic eccentricity in induction machines - winding function approach," IEEE Trans. Energy conversion, vol.15, pp. 143-148, June 2000.
- [8] N. A. Al-Nuim and Toliyat, "A novel method for modeling dynamic air-gap eccentricity in synchronous machines based on modified winding function theory," IEEE Trans. Energy conversion, vol.13, pp. 156-162, June 1998.
- [9] H. A. Toliyat, N. A. Al-Nuaim, "Simulation and detection of dynamic air-gap eccentricity in salient pole synchronous machines," IEEE Trans. Ind. Applicat., pp.1-7, October 1997.
- [10] S. Nandi, A. Ahmed, H. A. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages," IEEE Trans. Energy Conversion, vol.16, pp. 253-260, Sept. 2001.
- [11] S. Nandi, R. Bharadwaj, and H. A. Toliyat, "Performance analysis of a three phase induction motor under mixed eccentricity condition," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 17, pp. 392-399, Sept. 2002.
- [12] J. Faiz, I. T. Ardekani, H. A. Toliyat, "An evaluation of inductances of a squirrel-cage induction motor under mixed eccentric conditions," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 18, No. 2, June 2003.
- [13] M. G. Joksimovic, D. M. Durovic and A. B. Obradovic, "Skew and linear rise of MMF across slot modeling – winding function approach," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.14, pp.315-320, Sept. 1999.
- 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 حالت عدم همراستایی ایستا و انحنای محور رتور فقط اندوکتانس‌های 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. در شبیه سازیها مشاهده شد که با تورب میله ها گشتاور الکترومغناطیسی یکنواخت تر شده ولی دامنه آن کاهش می یابد. همچنین در شرایط خروج از مرکزیت، انحنای و انحراف محور رتور نسبت به حالت سالم، موتور سریعتر به حالت پایدار می رسد.

مراجع

- [1] H. A. Toliyat, T. A. Lipo, and J. C. White, "Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications" , part-1(motor analysis)", IEEE Trans. on energy conversion, Vol.6 pp.679-692, Dec.1991.
- [2] X. Luo, Y. Liao, H. Toliyat and T. A. Lipo, "Multiple coupled circuit modeling of induction machines ",IEEE Trans. , Ind. Application, Vol. 31, pp. 311-318, Mar. 1995.
- [3] M. G. Joksimovic and J. Penman, "The detection of inter turn short circuits in the stator windings of operating motors ", IEEE Trans. Ind. Application, Vol.47, pp.1078-1084, Oct.2000.
- [4] H. A. Toliyat and T. A. Lipo, "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults," IEEE Trans. Energy conversion, Vol. 10,no.2, pp. 241-247, June 1995
- [5] J. Milimonfared, H. M. Kelk A. Der Minassians, S. Nandi, H. A Toliyat, "A novel approach for broken bar detection in cage induction motors," IEEE Trans.

پیوست ۱

مشخصات موتور القایی قفس سنجابی

۳	تعداد فاز
۴	تعداد قطب
۲۲۰V	ولتاژ نامی
۵۰ Hz	فرکانس نامی
۳ HP	توان نامی
۲۸	تعداد میله های رتور
۳۶	تعداد شیارهای استاتور
۵۰ mm	طول استاتور
۰/۳ mm	طول فاصله هوایی
۹۰ mm	قطر داخلی استاتور
۹۰ mm	طول هسته
۴۴	تعداد دور سیم پیچی در هر شیار استاتور
۲/۳ mm	عرض دهانه شیار استاتور
۱/۱ mm	عرض دهانه شیار رتور
۵/۵۵ mm	عرض دندانه استاتور
۸/۹ mm	عرض دندانه رتور
موتور مذکور ساخت شرکت موتوژن ایران مدل 100L4A می‌باشد.	

- [14] H . M. Kelk, J. Milimonfared and H. A. Toliyat, "A Comprehensive method for the calculation of inductance coefficients of cage induction machines, " IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 18, No. 2, June 2003.
- [15] G. Bossio, C. D. Angelo, J. Solsona, G. Garcia, M. I. Valla, "A 2-D model of the induction machine: an extension of the modified winding function approach," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, March 2004.
- [16] Viado Ostovic, "Computer aided analysis of electrical machines, a mathematical approach," Prentice Hall, 1994.
- [17] A. C. Smith and D. G. Dorrel, "Calculation and measurement of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with eccentric rotor, " IEE Proceeding, Pt. B. vol. 143, no. 3, pp. 202-210, May 1996.