

پیاده سازی توزیع واقعی سیم پیچها در مدل تابع سیم پیچ و شبیه سازی بلادرنگ رفتار موتور القائی

ابوالقاسم راعی
استادیار
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

وحید رشتچی
دانشجوی دکترا
دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان

جعفر میلی منفرد
دانشیار
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله روشی عددی برای محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها، در مدل تابع سیم پیچ ارائه شده است. این روش ما را از محاسبات دستی بی نیاز نموده و امکان لحاظ نمودن توزیع واقعی سیم پیچها را بسادگی فراهم میکند. خطای نتایج شبیه سازی ناشی از ساده سازی و نقطه ای فرض گرفتن توزیع سیم پیچها خصوصا در حالت گذرا، و دقت کامل نتایج با لحاظ نمودن توزیع واقعی، با استفاده از داده های تجربی نشان داده شده است. همچنین روش پیشنهادی ضمن انعطاف بخشی، امکان دستیابی به سرعت بالای شبیه سازی در حد بلادرنگ را فراهم نموده است.

کلمات کلیدی

موتور القائی، تابع سیم پیچ، روش عددی، شبیه سازی بلادرنگ

Implementation of Actual Distribution of Windings in Winding Function Model and Real Time Simulation of Induction Motor Behaviour

A. Raie
Assistant Professor
Electrical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

V. Rashtchi
Ph. D Student
Electrical Engineering Department,
Zanjan University

J. Milimonfared
Associate Professor
Electrical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

Abstract

This paper presents a numerical method for calculation of all inductances and their derivatives

in winding function model. The scheme substitutes manual function extraction for windings, inductances, and their derivatives. Also it has made it possible to implement any desired winding distribution including the actual one. It is shown when actual distribution is implemented, exact match of experimental data and simulation results is obtained, while otherwise significant error in simulation results especially in transient response, can be seen. The scheme has provided flexibility and simplicity for changing parameters and also has made it possible to achieve real time simulation.

Keywords

Induction motor, Winding function, numerical method, real time simulation

مقدمه

تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی رفتار موتور القائی در شرایط غیر متعارف، مثلا پس از وقوع انواع خطاهای روتور و استاتور، نقش مهمی را برای بررسی و ارزیابی روشهای تشخیص خطا و استراتژی‌های حفاظتی و احیانا دستیابی به روشهای بهتر بازی میکند. بدیهی است مطالعه رفتار موتور تحت چنین شرایطی، بصورت تجربی امکان پذیر نبوده و مدل مرسوم dq نیز بدلیل مبتنی بودن بر توزیع سینوسی و تعادل فازها، برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی، قابل استفاده نمیباشد. مناسبترین مدلی که برای شبیه‌سازی رفتار موتور القائی در حوزه زمان و تحت چنین شرائطی مطرح شده است، مدل تابع سیم‌پیچ میباشد. از آنجا که در این مدل، هندسه ماشین، توزیع سیم‌پیچها و اتصالات لحاظ شده است. انواع خطاهای استاتور و روتور و نیز خطاهای مکانیکی مانند ناهم محوری روتور در آن بسادگی قابل نمایش است [۱ و ۲].

مدل تابع سیم‌پیچ با همه مزایایی که برای آن بر شمرده شد با کاستی‌هایی نیز مواجه می‌باشد. منشا این کاستی‌ها نوعا فرضیاتی است که برای ساده‌سازی مدل و محاسبات مربوطه بکار گرفته میشوند، که حاصل آن عدم تطابق کامل نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی خواهد بود. از جمله این ساده‌سازی‌ها میتوان به صرف نظر کردن از اشاع هسته، یکنواخت گرفتن فاصله هوایی، نقطه‌ای گرفتن توزیع سیم‌پیچهای استاتور و نقطه‌ای گرفتن میله روتور اشاره کرد. اگر چه در برخی مدل‌های کامل تر اثر میله‌های روتور و شیارهای استاتور در نایکنواختی فاصله هوایی منظور شده [۳] و لیکن به سایر موارد و میزان اثر آنها پرداخته نشده است. از مسائل جنبی دیگری که در استفاده از این مدل و بسته به نوع کاربرد، با آن مواجه میشویم، سختی تغییر برخی از مشخصه‌های مدل و مسئله کندی شبیه‌سازی می‌باشند. مطالعاتی که تغییرات مکرر در برخی از مشخصه‌ها را می‌طلبند، مانند تغییر تعداد حلقه‌های سیم‌پیچها در شیار استاتور، تغییر در تعداد دوره‌های خطای دور به دور و... اگر چه امکان پذیر هستند ولیکن پروسه طولانی و خسته‌کننده‌ای را در استخراج توابع چند ضابطه‌ای اندوکتانسها نیاز دارند. همچنین در کاربردهایی که تکرار شبیه‌سازی را به دفعات زیاد اقتضاء میکنند، بدلیل حجم و زمان بالای محاسبات که در محیط‌های رایج مانند Matlab میتواند متجاوز از یک ساعت برای هر شبیه‌سازی باشد، عملا مدل تابع سیم‌پیچ غیر قابل استفاده خواهد بود.

این مقاله به سه مورد از مشکلات مطرح شده پرداخته و راه حل عملی برای رفع آنها ارائه می‌نماید. اولاً نحوه لحاظ نمودن توزیع واقعی سیم‌پیچها در شیار استاتور و سطح مقطع روتور، در مدل و اثر قابل توجه آنها در منحنی گشتاور، سرعت و جریانها خصوصا در حالت گذرا ارائه میشود. ثانيا روشی عددی برای محاسبه اندوکتانسها ارائه می‌شود که بواسطه آن انعطاف بالایی در تغییرات دلخواه مانند تعداد دورسیم پیچها در شیار استاتور، ترکیب سیم پیچهای استاتور و... حاصل میگردد. ثالثا تمهیداتی که منجر به کاهش زمان شبیه‌سازی در حد بلادرنگ شده است، مطرح میشود.

۱ - معادلات مدل تابع سیم پیچ

در مدل تابع سیم پیچ، جریان هر میله روتور و هر فاز استاتور به عنوان متغیرهای مجزا تلقی شده و با در نظر گرفتن کوپلاژ مغناطیسی بین میله‌های روتور و فازهای استاتور، اندوکتانسهای متقابل بصورت تابعی از موقعیت زاویه‌ای روتور محاسبه میشوند. همچنین MMF ایجاد شده در فاصله هوایی، با توزیع واقعی در نظر گرفته میشود. این ویژگیها در روابط و معادلاتی که در ادامه ارائه خواهند شد، مد نظر قرار گرفته‌اند.

که در ادامه ارائه خواهند شد، مد نظر قرار گرفته‌اند.
روابط (۱) الی (۸) معادلات الکتریکی روتور و استاتور ماشین را نشان می‌دهند.

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

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

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

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

$$V_s = [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]^T \quad (5)$$

$$I_s = [I_a \quad I_b \quad I_c]^T \quad (6)$$

$$I_r = [I_{r1} \quad I_{r2} \quad \dots \quad I_{rm}]^T \quad (7)$$

$$V_r = [0] \quad (\text{برای موتور قفس سنجابی}) \quad (8)$$

روابط (۹) الی (۱۱) معادلات مکانیکی حاکم بر ماشین را نشان می‌دهند.

$$T_e = I_s^T \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_m} I_r \quad (9)$$

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

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \quad (11)$$

روابط (۱۲) الی (۱۶) ماتریسهای اندوکتانس و مقاومت بکار رفته در معادلات (۱) الی (۴) را نشان می‌دهند.

$$R_s = \text{diag}([R_{sa} \quad R_{sb} \quad R_{sc}]) \quad (12)$$

$$R_r = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & -R_b \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \dots & 0 \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -R_b & 0 & \dots & \dots & 2(R_b + R_e) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{L}_{ss} = \begin{bmatrix} L_{saa} + I_{Is} & L_{sab} & L_{sac} \\ L_{sba} & L_{sbb} + I_{Is} & L_{sbc} \\ L_{sca} & L_{scb} & L_{scc} + I_{Is} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{L}_{rr} = \begin{bmatrix} L_{nr} + 2(I_b + I_c) & L_{r12} - I_b & L_{r13} & \dots & L_{r1n} - I_b \\ L_{r21} - I_b & L_{nr} + 2(I_b + I_c) & L_{r23} - I_b & \dots & L_{r2n} \\ L_{r31} & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{rn1} & L_{rn2} & L_{rn3} & \dots & L_{nr} + 2(I_b + I_c) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sar1} & L_{sar2} & \dots & L_{sarn} \\ L_{sbr1} & L_{sbr2} & \dots & L_{sbrn} \\ L_{scr1} & L_{scr2} & \dots & L_{scrn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

در روابط فوق e نشانگر میله انتهایی روتور و n تعداد میله های روتور می باشد. محاسبه اندوکتانسهای خودی و متقابل بر اساس تئوری تابع سیم پیچ با استفاده از رابطه (۱۷) صورت میگیرد که متغیرهای آن عبارتند از:

φ موقعیت زاویه ای روتور نسبت به استاتور
 θ موقعیت زاویه ای در سطح داخلی استاتور برای انتگرال گیری
 L طول روتور
 r شعاع متوسط فاصله هوایی
 $g^{-1}(\varphi, \theta)$ تابع معکوس هوایی

$$L_{ij}(\varphi) = \mu_0 L r \int_0^{2\pi} g^{-1}(\varphi, \theta) N_i(\varphi, \theta) N_j(\varphi, \theta) d\theta \quad (17)$$

در صورت یکنواخت بودن فاصله هوایی، $g^{-1}(\varphi, \theta) = 1/g$ خواهد بود. اندوکتانسهای خودی با مساوی قرار دادن i, j و از همان رابطه (۱۷) بدست می آیند.

در معادله (۱) ولتاژ فازهای استاتور ظاهر شده است که به دلیل عدم دسترسی به نقطه زمین ماشین، این ولتاژها قابل دسترس نمی باشند. برای رفع این مشکل با استفاده از معادله (۱)، $(v_{as} - v_{bs})$ و $(v_{bs} - v_{cs})$ را تشکیل داده و با توجه به اینکه $I_a + I_b + I_c = 0$ است به معادلات (۱۸) الی (۳۰) بر حسب ولتاژ خطوط دست میابیم.

$$\Lambda_{sll} = L_{ssl} \mathbf{I}_{sll} + L_{srl} \mathbf{I}_r \quad (18)$$

$$\Lambda_r = L_{rsl} \mathbf{I}_{sll} + L_{rr} \mathbf{I}_r \quad (19)$$

$$\Lambda_{sll} = [\Lambda_{sab} \quad \Lambda_{sbc}], \quad \Lambda_{sab} = \Lambda_{sa} - \Lambda_{sb}, \quad \Lambda_{sbc} = \Lambda_{sb} - \Lambda_{sc} \quad (20)$$

$$\mathbf{I}_{sll} = [I_a \quad I_b]^T \quad (21)$$

$$L_{srl} = [L_{sar} - L_{sbr} \quad L_{sbr} - L_{scr}]^T \quad (22)$$

$$L_{rsl} = [L_{sar}^T - L_{sbr}^T \quad L_{sbr}^T - L_{scr}^T]^T \quad (23)$$

$$DL_{srl} = [DL_{sar} - DL_{scr} \quad DL_{sbr} - DL_{scr}]^T \quad (24)$$

$$D = \frac{\partial}{\partial \theta_{rm}}$$

$$R_{sll} = \begin{bmatrix} R_{sa} & -R_{sb} \\ R_{sc} & R_{sb} + R_{sc} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\frac{d\Lambda_{sll}}{dt} = V_{sll} - R_{sll} I_{sll} \quad (26)$$

$$\frac{d\Lambda_r}{dt} = -R_r I_r \quad (27)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_{lr}) \quad (28)$$

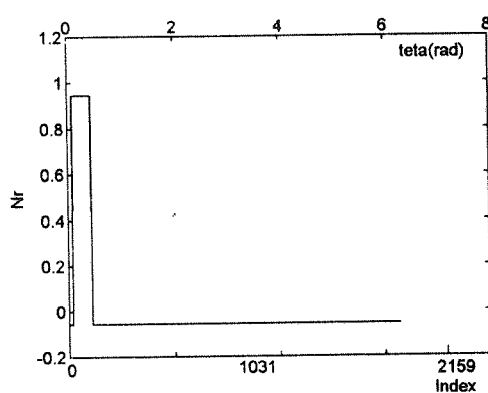
$$T_e = I_{sll}^T \frac{\partial L_{srl}}{\partial \theta_{rm}} I_r \quad (29)$$

$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_m \quad (30)$$

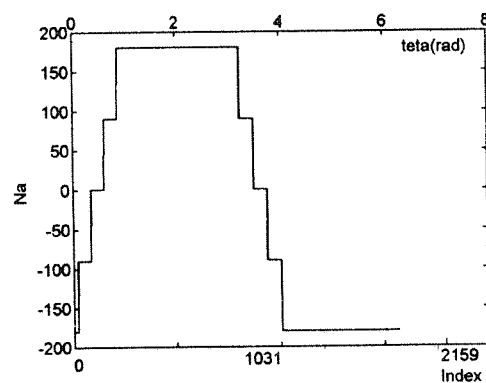
۲ - محاسبه اندوکتانسها

الف - روش تحلیلی با توزیع نقطه ای سیم پیچها

اندوکتانسهای متقابل بطور مرسوم، با فرض تغییرات پله‌ای تابع سیم پیچ استاتور و روتور محاسبه میشوند. بعنوان نمونه، برای ماشین مورد مطالعه توابع سیم پیچ حلقه اول روتور و فاز a استاتور در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. تابع سیم پیچ روتور از 0 تا 2π شیفت داده شده و در تابع سیم پیچ استاتور ضرب و انتگرالگیری مربوطه طبق رابطه (۱۷) بصورت پارامتریک انجام میشود. نتیجه چنین کاری که نسبتاً طولانی بوده و بصورت دستی انجام میشود، یک تابع چند ضابطه‌ای میباشد که اندوکتانس متقابل را بصورت تابعی از موقعیت زاویه‌ای روتور نسبت به استاتور بدست میدهد. مشتق اندوکتانس متقابل نیز یک تابع چند ضابطه‌ای میباشد که از تابع اندوکتانس بدست می‌آید.



ب) تابع سیم پیچ روتور



الف) تابع سیم پیچ استاتور

شکل (۱) توابع سیم پیچ فاز a استاتور و حلقه اول روتور.

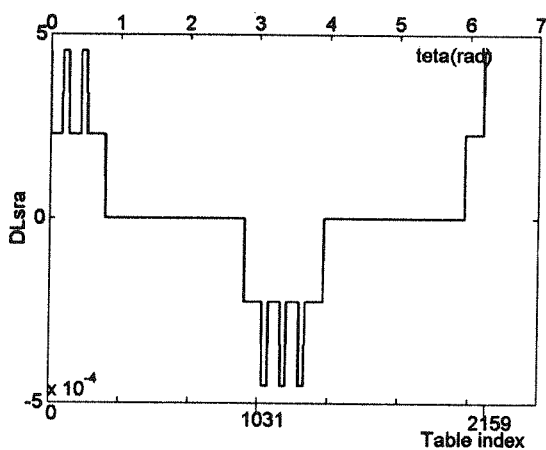
منحنی تغییرات اندوکتانس متقابل حلقه اول روتور با فاز a استاتور و مشتق آن برای توابع سیم پیچ شکل (۱)، در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که توضیح داده شد، نوعا محاسبه توابع بصورت دستی انجام شده و اگر کوچکترین تغییری در تابع سیم پیچ استاتور مثلا به منظور ایجاد خطا داده شود، تمامی محاسبات میبایست از نو تکرار شوند.

ب - محاسبه اندوکتانسها با توزیع واقعی سیم پیچها

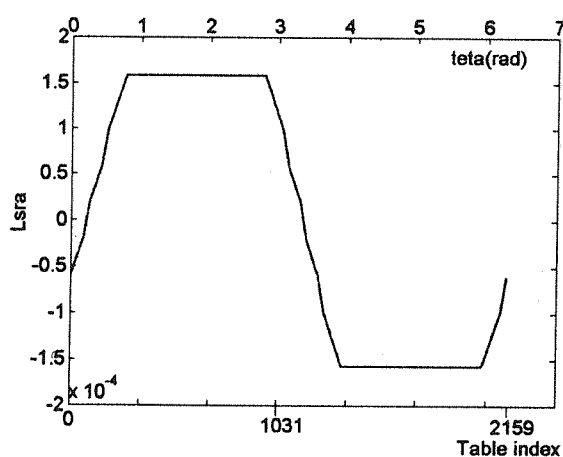
فرض پله‌ای بودن تابع سیم پیچ، اگر چه باعث سادگی مدل میشود، ولی چندان واقعی نیست و اثر این تقریب نیز بسته به مورد استفاده، چندان قابل صرفنظر نمی‌باشد. سیم پیچهای استاتور در شیارهایی با سطح مقطع غیر صفر توزیع شده‌اند و فرض تغییرات پله‌ای تابع سیم پیچ در واقع فرض نقطه‌ای بودن سیم پیچها در شیارهای استاتور می‌باشد. در [۴] برای نزدیک شدن به توزیع واقعی، تغییرات mmf در طول شیار استاتور، بصورت خطی در نظر گرفته شده است. این فرض که باز هم تقریبی است، بدین دلیل صورت گرفته است که محاسبه اندوکتانسها را به روش تحلیلی و در قالب تابع چند ضابطه‌ای امکان پذیر سازد.

در این مقاله برای اولین بار توزیع واقعی سیم پیچهای استاتور لحاظ میشود و همچنین سطح مقطع میله‌های روتور نیز صفر در نظر گرفته نمیشود. واقعی ترین توزیعی که برای سیم پیچ استاتور میتوان در نظر گرفت این است که دانسیته توزیع سیم پیچ را در سطح مقطع شیار استاتور بصورت یکنواخت فرض کنیم. در رابطه با روتور نیز اگرچه برای موتور قفس سنجابی فقط یک میله در هر شیار وجود دارد، ولی بدلیل سطح مقطع غیر صفر، اگر میله روتور را متشکل از بینهایت سیم پیچ فرض کنیم که با دانسیته یکنواخت در مقطع شیار روتور توزیع شده‌اند، بطور مشابه میتوان توزیعی نزدیک به واقعیت را بدست آورد. با این مفروضات، به تعیین توابع توزیع شیارهای استاتور و روتور می‌پردازیم.

شکل (۳) شیارهای استاتور و روتور را برای موتور نمونه و مورد مطالعه نشان میدهد. با توجه به این شکل، توابع توزیع سیم پیچهای استاتور و روتور در موقعیت زاویه‌ای θ نسبت به ابتدای شیار را میتوان بصورت نرمالیزه شده با رابطه (۳۱) تعریف نمود.



ب) مشتق اندوکتانس متقابل



الف) اندوکتانس متقابل

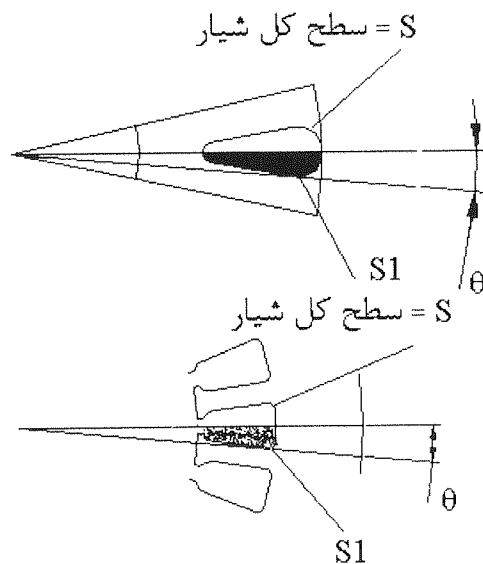
شکل (۲) اندوکتانس متقابل بین حلقه اول روتور و فاز a استاتور و مشتق آن در محاسبه تحلیلی.

$$disf(\theta) = \frac{S_1}{S} \quad (31)$$

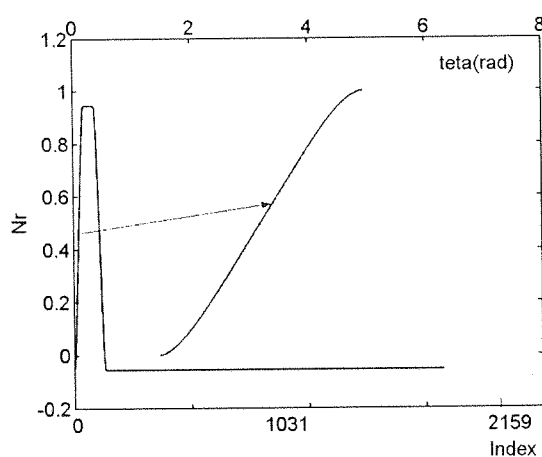
برای بدست آوردن این تابع، بادر دست داشتن ابعاد و شکل هندسی شیارهای استاتور و روتور، میتوان چندین نقطه از تابع $disf(\theta)$ را با استفاده از ابزارهای موجود مانند Auto CAD محاسبه کرده و سپس با برازش منحنی، نقاط بیشتری از این توزیع را بدست آورد. پس از بدست آوردن تابع توزیع، برای بدست آوردن توزیع سیم پیچها در طول شیار استاتور، کافی است

تابع فوق در تعداد دورهای یک شیار یعنی N ضرب شود. واضح است که برای روتور این ضریب برابر یک خواهد بود. با استفاده از این روش، برای موتور مورد بحث توابع توزیع و سیم پیچ فاز a استاتور و حلقه اول روتور تعیین شده و در شکل (۴) آمده است. برای مشاهده شکل دقیق توابع توزیع، از بزرگنمایی استفاده شده است.

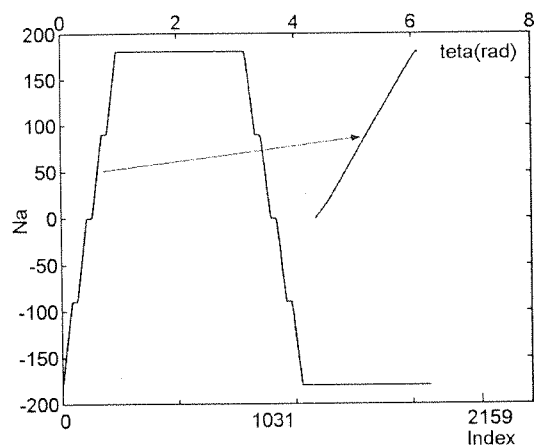
اگر چه بدین ترتیب توانسته‌ایم توابع توزیع سیم‌پیچها را با دقت کافی بدست آوریم، ولیکن نکته قابل توجه این است که دیگر امکان محاسبه اندوکتانسها با روش تحلیلی و مرسوم و بصورت تابع چند ضابطه‌ای وجود ندارد. شاید به همین دلیل بوده است که توابع توزیع واقعی تاکنون استفاده نشده‌اند. راه حل پیشنهادی ما برای محاسبه اندوکتانسها، استفاده از روشهای عددی می‌باشد که در بخش ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. بر خلاف تصور ابتدائی و همانطور که خواهیم دید، استفاده از توزیع واقعی سیم پیچها و بکارگیری روشهای عددی در محاسبه اندوکتانسها، پیاده‌سازی را ساده تر و قابل انعطاف تر نموده و به افزایش سرعت محاسباتی نیز کمک خواهد کرد.



شکل (۳) شیارهای استاتور و روتور.



(ب) تابع سیم پیچ حلقه اول روتور



(الف) تابع سیم پیچ فاز a استاتور

شکل (۴) توابع سیم پیچ فاز a استاتور و حلقه اول روتور، با توزیع واقعی.

۴ - روش عددی برای محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها

برای محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها بصورت عددی، فاصله $0 - 2\pi$ به K قسمت مساوی تقسیم میشود. توابع سیم پیچ

فازهای a,b,c استاتور و یک حلقه روتور بصورت گسسته تولید و در چهار جدول با K عنصر ذخیره میگردند. انتگرال رابطه (۱۷) با \sum جایگزین شده و $d\theta = \frac{2\pi}{K}$ به $\Delta\theta = \frac{2\pi}{K}$ تبدیل میشود. بنابر این اندوکتانس متقابل میله اول روتور با فاز $X=(a|b|c)$ استاتور در موقعیت زاویه ای $\theta[i] = \frac{2\pi i}{K}$ بدست می آید. در این رابطه N_r و N_x جداول توابع سیم پیچ فاز X استاتور و حلقه اول روتور می باشند.

$$L_{sxr1}[\theta_i] = \frac{\mu_0 r L}{g} \times \frac{2\pi i}{K} \left(\sum_{j=i}^{K-1} N_x[j] N_r[j-i] + \sum_{j=0}^{i-1} N_x[j] N_r[K-i+j] \right) \quad (31)$$

رابطه (۳۱) به ازای $i=0 \dots K$ عناصر جدول تابع اندوکتانس را بدست میدهد که در آن با انتخاب اندیسهای مناسب، شیفت لازم توابع سیم پیچ نسبت به یکدیگر لحاظ شده است. اندوکتانسهای خودی و متقابل استاتور و نیز اندوکتانس خودی و متقابل میله های روتور که بصورت جدول نبوده و تک مقداری می باشند نیز میتوانند از رابطه (۳۱) با $i=0$ و با استفاده از جداول سیم پیچهای مورد نظر محاسبه شوند. مشتق توابع اندوکتانسهای متقابل روتور و استاتور نیز بصورت گسسته در جدولی با K عنصر و از رابطه (۳۲) به ازاء $i=0 \dots K$ بدست می آیند.

$$DL_{sxr1}[\theta_i] = (L_{sxr1}[\theta_{i+1}] - L_{sxr1}[\theta_i]) \times \frac{K}{2\pi i} \quad (32)$$

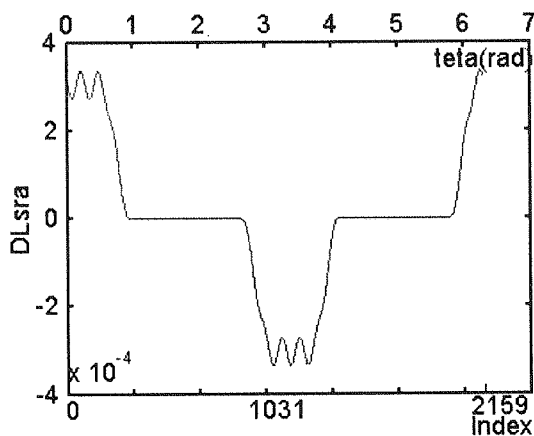
شکل (۵) اندوکتانس متقابل بین حلقه اول روتور و فاز a استاتور و مشتق آن را که با استفاده از روش عددی و از روابط (۳۱) و (۳۲) بدست آمده اند، نشان میدهد. در استفاده از این روش عددی، نکاتی چند در زمینه پیاده سازی و مزایای حاصله قابل توجه می باشند که در ادامه به آنها می پردازیم.

K که تعداد عناصر جداول می باشد بصورت مضربی از کوچکترین مضرب مشترک تعداد شیارهای استاتور و روتور یعنی بصورت $K=k * LCP(N_r, N_s)$ انتخاب میشود. بدین ترتیب شروع قطاع های شیارهای روتور و استاتور با اندیس صحیح در جدول قابل نمایش بوده و خطای روند کردن در تشکیل توابع سیم پیچ نخواهیم داشت. همچنین برای افزایش تعداد تقسیمات و کاهش خطای عددی، ضریب k لحاظ شده است.

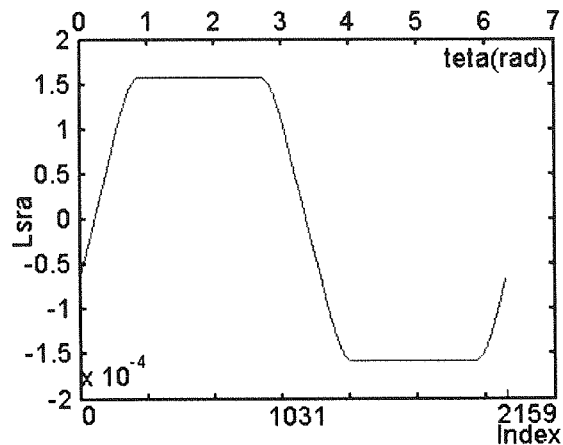
برای یک موتور متقارن، میتوان بجای سه جدول برای سیم پیچهای استاتور، یک جدول تشکیل داده و برای فازهای مختلف از شیفت داده شده حلقوی آن استفاده کرد. از آنجا که کاربرد اصلی این مدل در حالت های غیر متعارف موتور است، سه جدول با توزیعی دلخواه برای فازهای a,b,c بکار رفته است.

مزیت مهم بدست آمده این است که روشهای دستی حذف شده و برنامه ای با ورودیهای، تعداد شیارهای استاتور، تعداد میله های روتور، تعداد سیم پیچها در هر شیار، ترکیب سیم پیچها در شیارهای استاتور و توابع توزیع روتور و استاتور بهمراه سایر پارامترها، اندوکتانسها و مشتق آنها را محاسبه میکند. بدین ترتیب انعطاف زیادی حاصل شده و ورودیهای برنامه میزان انعطاف بدست آمده را نشان میدهد. بعنوان نمونه شکلهای (۱) و (۲) و (۴) و (۵) این مقاله که مربوط به توزیع نقطه ای و توزیع واقعی می باشند از چنین برنامه ای بدست آمده اند.

روابط بکار رفته در محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها که ساده ترین روابط برای انتگرال گیری و مشتق گیری عددی می باشند و بسادگی قابل پیاده سازی هستند، با انتخاب تعداد تقسیمات مناسب، دقت مطلوبی را بدست می دهند. ارزیابی روش در بخش (۶) صورت گرفته است.



(ب) مشتق اندوکتانس متقابل



(الف) اندوکتانس متقابل

شکل (ه) اندوکتانس متقابل بین حلقه اول روتور و فاز a استاتور و مشتق آن با در نظر گرفتن توزیع واقعی سیم پیچها و محاسبه به روش عددی.

۵ - تمهیدات انجام شده برای افزایش سرعت شبیه سازی

الف - حذف محاسبات مربوط به توابع چند ضابطه ای

در هر بار اجرای حلقه اصلی برنامه شبیه ساز، میبایست اندوکتانس متقابل و مشتق اندوکتانس متقابل هر میله روتور با هر فاز استاتور یعنی $2 \times 3 \times N_p$ اندوکتانس متقابل و مشتق آنها به ازاء $0 < \theta < 2\pi$ که موقعیت زاویه ای روتور است، بدست آید. اگر اندوکتانسها و مشتق آنها بصورت توابع چند ضابطه ای با M ضابطه داده شوند، بطور متوسط $2 \times 3 \times N_p \times M$ مرتبه، θ مقایسه شده و $2 \times 3 \times N_p$ مرتبه محاسبه تابع انجام میشود. مقایسه θ با ضوابط یک تابع M ضابطه ای نوعا با M سطح جملات if else صورت میپذیرد که هر سطح شامل دو مقایسه و یک AND می باشد و پس از تعیین محدوده θ ، مقدار تابع نیز میبایست محاسبه شود.

اگر اندوکتانسها و مشتق آنها بنحوی که در بخش ۴ توضیح داده شد، بصورت عددی محاسبه شده و در جداولی ذخیره شده باشند، کافی است که $2 \times 3 \times N_p$ اندیس محاسبه شده و به جداول مربوطه جهت تعیین اندوکتانس یا مشتق آن مراجعه شود. اولین اندیس از رابطه $index = round(\frac{K \times \theta}{2\pi})$ بدست می آید و برای هر یک از سایر اندیسها یک جمع کافی است. بنابر این حجم محاسبات تقریبا به $2 \times 3 \times N_p$ جمع و به همین مقدار مراجعه به جدول کاهش می یابد.

لازم به ذکر است که برای موتور نمونه مورد استفاده در این مقاله $M=16$ می باشد و بعبارتی سرعت این محاسبات بیش از ۱۶ برابر افزایش می یابد. همچنین لازم به ذکر است که در پردازشگرهای رایج که از روش پردازش موازی استفاده میکنند جملات if else تو در تو بمراتب زمان برتر از دستورات متوالی میباشند.

ب - حذف درونیابی از محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها

در [۱]، ایده استفاده از جدول به جای توابع چند ضابطه ای بگونه ای متفاوت از روش مورد بحث این مقاله مطرح شده است. در [۱]، توابع چند ضابطه ای برای توزیع نقطه ای سیم پیچها، ابتدا بصورت دستی بدست آمده، سپس بصورت گسسته در جدولی با تعداد عناصر k که کوچکترین مضرب مشترک تعداد شیارهای استاتور و روتور می باشد قرار داده میشوند. سپس با توجه به خطی بودن اندوکتانس بین نقاط جدول، به ازاء موقعیت زاویه ای روتور یعنی θ ، اندیس و دو عنصر مجاور در برگزیده θ بدست آمده و با درونیابی اندوکتانس و با استفاده از این دو عنصر مشتق اندوکتانس محاسبه میشوند. بعبارت دیگر در این حالت $2 \times 3 \times N_p$ اندیس و $2 \times 2 \times 3 \times N_p$ مراجعه به جدول و $2 \times 3 \times N_p$ درونیابی خطی و به همین تعداد نیز محاسبه مشتق صورت می پذیرد.

در روش مورد بحث این مقاله، اولاً توابع چند ضابطه‌ای نوعاً مورد نیاز نیستند و محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها برای توزیع دلخواه سیم پیچها یکبار توسط برنامه کامپیوتری محاسبه شده و بصورت جدول ذخیره میشوند. ثانیاً تعداد تقسیمات یا عناصر جدول به تعدادی گرفته میشود که با تعیین $N_p \times 3 \times 2$ اندیس و بهمین تعداد مراجعه به جدول، با دقت کافی اندوکتانسها و مشتق آنها را بدست داده و ما را از درونیابی بی‌نیاز میکند.

ج - انتخاب زبان برنامه نویسی مناسب

یکی دیگر از عوامل مهم در افزایش سرعت شبیه‌سازی، محیط و زبان برنامه نویسی بوده است. نوعاً برای شبیه‌سازی از زبان Matlab استفاده میشود. این زبان اگر چه پیاده‌سازی را آسان میکند، ولی بدلیل استفاده از توابع کلی و بمراتب پیچیده‌تر و نیز اجرای مفسری، اجرای شبیه‌سازی را بسیار کند میکند. برای رسیدن به سرعت اجرای بالاتر، زبان C مورد استفاده قرار گرفته است و کلیه توابع مورد نیاز، از جمله توابعی که با ماتریسها سر و کار دارند نوشته شده‌اند. لازم به ذکر است که استفاده از زبان C به همراه توابع آماده کتابخانه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت و سرعت اجرا را نسبت به محیط Matlab بمراتب افزایش داد. سپس جایگزینی توابع کتابخانه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت که نتیجه آن بسیار جالب‌تر بوده و بیش از ۱۵ بار سرعت اجرا را نسبت به استفاده از توابع کتابخانه‌ای افزایش داد.

۶- ارزیابی اثر توزیع واقعی سیم پیچها و سرعت اجرای شبیه‌سازی

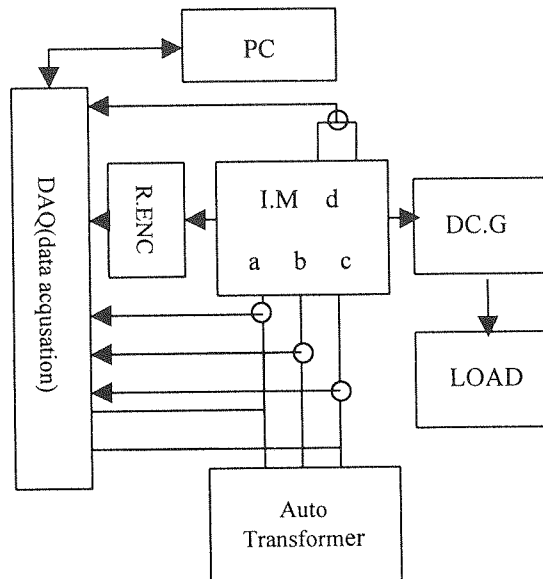
الف - بستر آزمایشگاهی

برای مشاهده اثر توزیع واقعی بر نتایج شبیه‌سازی، موتوری سه فاز، دو قطبی، قدرت 1HP، ولتاژ نامی ۳۸۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز انتخاب شده است. تعداد شیارهای استاتور و روتور این موتور نیز به ترتیب ۱۸ و ۲۴ بوده و شکل سطح مقطع شیارهای روتور و استاتور آن در شکل (۳) آمده است. در هر شیار استاتور یک کلاف ۹۰ دوری قرار گرفته است که چهار کلاف هر فاز نیز به صورت متحد‌المرکز میباشند. پارامترهای این موتور در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) پارامترهای موتور مورد استفاده.

$g=1.09e-3$ mm	فاصله هوایی
$l_e=1.73e-8$ H	اندوکتانس نشدی میله انتهایی روتور
$l_b=1.72e-7$ H	اندوکتانس نشدی میله روتور
$l_s=1.6e-3$ H	اندوکتانس نشدی استاتور
$r_e=4.05e-6$ Ω	مقاومت میله انتهایی روتور
$r_b=2.83e-5$ Ω	مقاومت میله روتور
$r_{sa}=7.6$ Ω	مقاومت هر فاز استاتور
$J=16.2e-3$ kg.m ²	ممان اینرسی بار و موتور

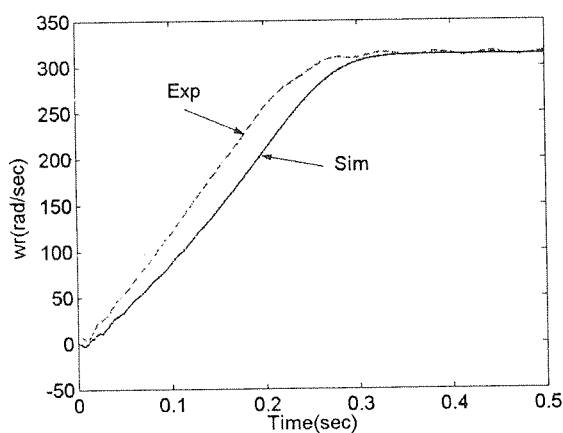
برای این موتور، شبیه‌سازی یک بار با فرض توزیع نقطه‌ای و یکبار با احتساب توزیع واقعی سیم پیچها با روش عددی مذکور در بخش ۴ و ۵ صورت گرفته و نتایج شبیه‌سازیها با نتایج تجربی مقایسه شده است. برای بدست آوردن نتایج تجربی، از سیستم شکل (۶) استفاده شده است. در این سیستم نمونه برداری از ورودیها و خروجیها، بصورت ده بیتی و با فرکانس 5KHZ توسط کارت DAQ و توسط PC صورت میپذیرد.



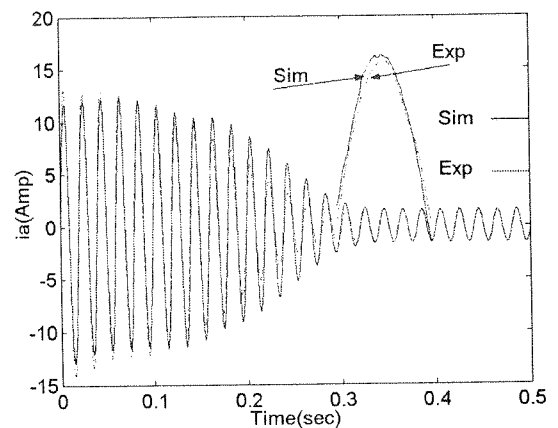
شکل (۶) بستر آزمایشگاهی مورد استفاده در انجام آزمایشها.

ب - مقایسه نتایج شبیه سازی برای توزیع واقعی و نقطه ای

شکل (۷) و (۸) بترتیب نتایج شبیه سازی برای توزیع نقطه ای و توزیع واقعی و مقایسه آنها را با نتایج تجربی نشان میدهند. در هر یک از دو شکل بعنوان نمونه، جریان فاز a استاتور و سرعت موتور آمده است. لازم به ذکر است که کلیه پارامترها، بجز توابع توزیع، در هر دو شبیه سازی یکسان اختیار شده اند.



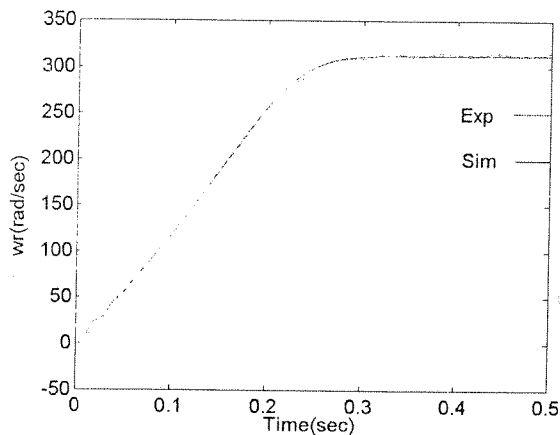
ب) سرعت موتور



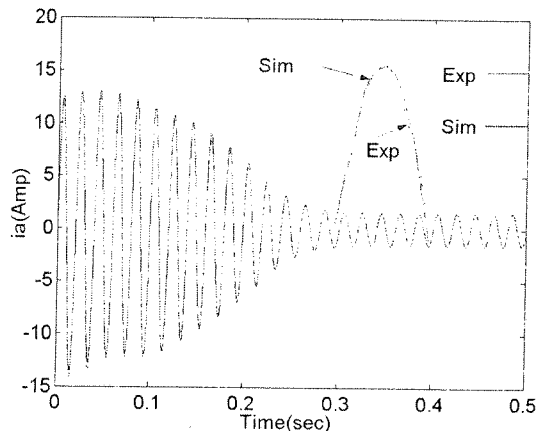
الف) جریان فاز a

شکل (۷) جریان فاز a استاتور و سرعت موتور حاصل از آزمایش و شبیه سازی با فرض توزیع نقطه ای سیم پیچها.

شکلهای (۷) و (۸) نشان میدهند که نتایج شبیه سازی با استفاده از توزیع واقعی بر نتایج تجربی کاملاً منطبق میباشند. در حالیکه نتایج شبیه سازی بدست آمده از توزیع نقطه ای، خصوصاً در حالت گذرا تفاوت فاحشی با نتایج تجربی دارند. شکل (۹) مقایسه نتایج دو شبیه سازی را برای گشتاور خروجی موتور نشان میدهد. نوسانات شکل (۹-الف) که مربوط به شبیه سازی با توزیع نقطه ای است، غیر واقعی بوده و ناشی از جهشهای پله ای در مشتق اندوکتانسهای متقابل میباشند. مشتق اندوکتانسها برای دو شبیه سازی در شکلهای (۲-ب) و (۵-ب) آمده اند. دلیل خطای فاحش سرعت در شبیه سازی با توزیع نقطه ای و در حالت گذرا میتواند مربوط به همین نوسانات گشتاور باشد.

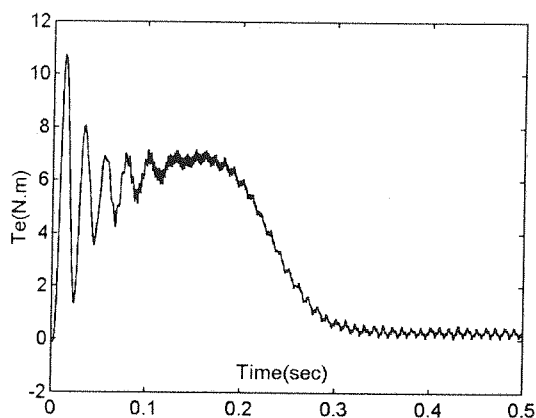


ب) سرعت موتور

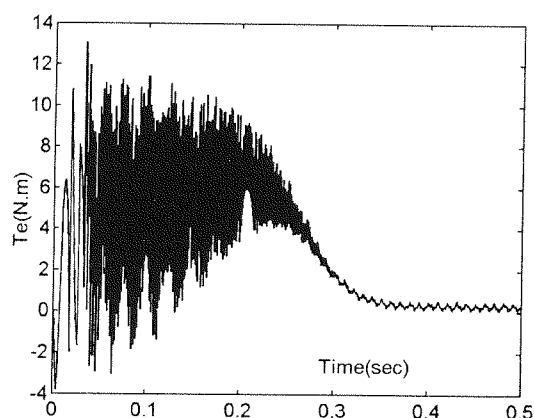


الف) جریان فاز a

شکل (۸) جریان فاز a استاتور و سرعت موتور حاصل از آزمایش و شبیه سازی با فرض توزیع واقعی سیم پیچها.



ب) توزیع واقعی



الف) توزیع نقطه ای

شکل (۹) گشتاور موتور حاصل از شبیه سازی با فرض توزیع نقطه ای و توزیع واقعی سیم پیچها

ج - سرعت اجرای شبیه سازی

جدول (۲) زمان محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها و جدول (۳) زمان شبیه سازی یک ثانیه از عملکرد موتور را نشان میدهند. زمانهای اجرا، برای سیستمی با پردازنده AMD Athlon 1200MHz می باشند. در شبیه سازی، برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل از روش رانگ کوتای مرتبه دوم استفاده شده است.

جدول (۲) نشان میدهد که حتی برای تعداد تقسیمات بزرگ، زمان اجرا کاملاً قابل تحمل است. همچنین لازم به ذکر است که محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها فقط یکبار انجام میشود و شکل (۸) به ازاء $K=2160$ تولید شده و دقت کامل را نشان میدهد. جدول (۳) نشان میدهد که سرعت شبیه سازی تا حد بلادرنگ رسیده و با گام $200\ \mu\text{sec}$ میتوان تا هارمونیک پنجاهم را نیز مورد بررسی قرار داد.

جدول (۲) زمان محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها.

تعداد تقسیمات K	زمان اجرا
720	7msec
2160	57msec
4320	0.26sec
5760	0.6sec
14400	3.6sec

جدول (۳) زمان اجرای شبیه سازی، برای یک ثانیه از عملکرد موتور.

گام شبیه سازی	زمان شبیه سازی
200 μ sec	1.04sec
400 μ sec	0.54sec
500 μ sec	0.43sec

۷- نتیجه گیری و سخن پایانی

مدل تابع سیم پیچ برای موتور القائی که مدلی مفید برای شبیه سازی رفتار موتور در شرایط غیر متعارف است، در فرم معمول و استفاده رایج آن با کاستی هائی مواجه است که در این مقاله به حل برخی از آنها پرداخته شده است. در این مدل برای محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها، نوعا با فرض توزیع نقطه ای سیم پیچهای استاتور و روتور، توابع چند ضابطه ای بصورت دستی تولید میشود. این امر سبب میشود که اولاً در کاربردهائی که تغییرات مکرری را در مشخصه های موتور می طلبند انعطاف لازم را نداشته و مجبور به تکرار محاسبات دستی باشیم و ثانياً بخاطر نقطه ای فرض کردن توزیع سیم پیچها، به دقت کامل در شبیه سازی و خصوصا در حالت گذرا دست نیابیم. مشکل دیگر نیز سرعت شبیه سازی است، که گزارشها حاکی از زمانبری بالای آن میباشد و در کاربردهائی که دفعات تکرار بسیار را اقتضاء میکنند غیر قابل استفاده میشود. در این مقاله برای محاسبه اندوکتانسها و مشتق آنها، روشی عددی ارائه شده است که ما را از محاسبات دستی توابع بی نیاز میکند. همچنین امکان لحاظ نمودن توزیع واقعی سیم پیچها را بسادگی فراهم میکند. با دستیابی به این ابزار، خطای ناشی از ساده سازی و نقطه ای فرض نمودن توزیع سیم پیچها نشان داده شده است. همچنین نشان داده شده است که با لحاظ نمودن توزیع واقعی، نتایج شبیه سازی بر نتایج تجربی کاملا منطبق میشود. در استفاده از روش عددی بالطبع، انعطاف زیادی حاصل شده و تغییر پارامترها بسادگی قابل انجام می باشد. سرعت شبیه سازی با استفاده از روش جدولی، حذف درونیابی و استفاده از زبان C در حد بلادرنگ افزایش داده شده است.

بعنوان نمونه ای از کاربرد نتایج این مقاله، شناسائی دقیق پارامترهای موتور را که مستقیما قابل اندازه گیری نمی باشند، مانند اندوکتانسهای ناشی، مقاومت میله ها و... میتوان نام برد. قابل ذکر است که شناسائی این پارامترها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و ابزار حاصل از نتایج این مقاله انجام شده است. در این کاربرد، دفعات تکرار شبیه سازی هزاران بار بوده و برای حصول همگرایی دقت شبیه سازی نیز ضروری میباشد. عدم دقت ناشی از نقطه ای گرفتن توزیع، مانع همگرایی و کندی شبیه سازی مانع از گرفتن پاسخ در زمان معقول می شود.

زیر نویس ها

- 1-Winding function approach
- 2- Digitaized

مراجع

- [1] Xiaogang Luo, Yuefeng Liao, Hamid A.Toliyat, "Multiple coupled circuit modeling of induction machines", IEEE Trans on Industry Applications, Vol.31, No.2, pp.311-318, April 1995
- [2] Hamid A.Toliyat, Thomas A.Lipo, "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and enf ring faults", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.10, No.2, pp.241-247, June 1995
- [4] Joksimovic.M, Gojko, Durovic D, "Skew AND linear rise of MMF across slot modeling winding function approach", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.14, No.3, pp.315-320, Sep 1999