

مدلسازی و تشخیص خطای موتور آهنربای دائم شار محوری با استفاده از مدار معادل مغناطیسی و مدل ARX

سیده سارا معروفیان^۱، کریم عباسزاده^۲

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، sara.maroufian@ee.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، abbaszadeh@ee.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۲/۸/۱، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۲/۱۱/۳)

چکیده: برای مدلسازی و تشخیص خطای ماشین‌های الکتریکی، روش‌های گوناگونی ارائه شده است. اهداف مورد نظر در این روش‌ها دستیابی به سرعت و دقت بیشتر می‌باشد. مدلسازی با استفاده از روش مدار معادل مغناطیسی یکی از این روش‌هاست که در این مقاله برای مدلسازی و در نهایت تشخیص خطای یک ماشین شار محوری آهنربای دائم مورد استفاده قرار گرفته است. این مقاله از دو بخش مجزا تشکیل شده و در حقیقت ترکیب دو زمینه‌ی کاری متفاوت، یعنی مدلسازی ماشین‌های الکتریکی و مبحث شناسایی سیستم‌هاست. در ابتدا ویژگی‌ها و ساختار موتور معرفی می‌گردد. تحلیل بیشتر شامل تعیین ولتاژ Back-EMF با استفاده از روش مدار معادل مغناطیسی می‌باشد. تشخیص دیامغناطیس شدن آهنرباها با بهره‌گیری از آنالیز فوری ولتاژ Back-EMF انجام شده و در گام بعدی یک مدل ARX برای تحلیل و شناسایی پارامترهای سیستم در حالت سالم و خطادار، به کار گرفته شده است. برای تعیین دیامغناطیس شدن آهنربا دو روش ارائه می‌گردد. مدل اول شار تولید شده توسط آهنربا را با توجه به ولتاژ Back-EMF پیش‌بینی می‌کند در حالی که مدل دوم، درصد نقص در آهنربا را تعیین می‌نماید. میزان اعتبار هریک از مدل‌ها، با استفاده از مجموعه‌ی داده‌های اعتبارسنجی مشخص شده است. مدل اول که میزان شار تولیدی را تعیین می‌کند دقتی در حدود ۸۲ درصد دارد و مدل دوم نیز تعیین درصد خطای آهنربا را با دقت ۹۲ درصد انجام می‌دهد؛ به این ترتیب دقت مطلوبی در تعیین میزان و درصد افت شار قطب‌های آهنربایی به دست می‌آید.

کلمات کلیدی: موتور آهنربای دائم شار محوری- روش مدار معادل مغناطیسی- مدل ARX- شناسایی خطا

Modeling and Fault Detection of an Axial Flux Permanent Magnet Motor Using Magnetic Equivalent Circuit and ARX Model

Seyede Sara Maroufian, Karim Abbaszadeh

Abstract: Investigations on modeling methods and fault detection for electrical machines have lead to different paths. The speed of the method combined with the accuracy achieved, are the goals which are being followed. Magnetic Equivalent Circuit Modeling of the Electrical Machines is one of the proposed methods and has been used for modeling of an Axial Flux Permanent Magnet Motor in this paper. The motor structure and feature are introduced. Further analysis includes determination of the Back-EMF Voltage using Magnetic Circuit Model. Detection of magnets demagnetization is established by Fourier analysis of the Back-EMF voltage. An ARX model is then fitted into the extracted input-output frequency data. Two approaches have been followed to detect PM defections. The first model will predict the generated flux of the defected PM with according to the Back-EMF voltage while the second will detect the percentage of the defection with the help of Back-EMF Fourier analysis.

Keywords: Axial Flux PM Motor, Magnetic Equivalent Circuit, ARX Model, Fault Detection.

۱- مقدمه

چگالی بالای گشتاور در موتورهای آهنربای دائم، سبب شده است تا برای کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار بگیرند. چگالی بالای شار در فاصله ی هوایی و حذف تلفات اهمی از سیستم تحریک از جمله مزایای استفاده از آهنربای دائم در ماشین های الکتریکی است. در مقابل گشتاور دندانه ای که اغلب در سرعت پایین و گشتاور بار بزرگ رخ می دهد و موجب نوسان شفت موتور و ایجاد نویز صوتی می گردد، از معایب آن محسوب می شود [۱-۲]. از سوی دیگر در ماشین های AFPM^۱ به دلیل وارد آمدن نیروهای عمودی بزرگ به شفت، کج محوری بیشتر رخ می دهد [۳]. مشکل دیگر دیامغناطیس شدن کلی یا جزئی آهنربا است که علت آن می تواند پیر شدن آهنربا، استرس های حرارتی و مکانیکی و عکس العمل آرمیچر در حالت اتصال کوتاه باشد. از آنجایی که بخش های آسیب دیده ی آهنربا، قابلیت خود را به طور دائم از دست می دهند، وقوع خطا در عمل ابعاد موثر آهنربا را کاهش می دهد. علاوه بر این دیا- مغناطیس شدن آهنربا عملکرد ماشین را با ایجاد اختلال در شار فاصله ی هوایی و در نتیجه Back-EMF و گشتاور، متاثر می کند. در این زمینه تحقیقات بسیاری انجام شده است [۴-۱۱].

در [۴] برای تشخیص دیامغناطیس شدگی، از آنالیز فرکانسی متغیرهای موتور استفاده شده است. از آنجایی که روش یادشده بر پایه ی آنالیز فرکانسی می باشد، در شرایط کج محوری دینامیک یا هم محور نبودن روتور و استاتور که منجر به تولید مولفه های فرکانسی مشابه دیا- مغناطیس شدگی می گردد، دقت روش باید مجددا مورد بررسی قرار بگیرد. در تحقیق دیگر [۵] نقاط عبور از صفر ولتاژ Back-EMF برای تشخیص دیامغناطیس شدگی به کار گرفته شده است. با وجود اینکه در این روش خطای غیرمتقارن به خوبی شناسایی می گردد، لازم است موثر بودن روش در حالت متقارن بررسی شود. در حالت دوم چگالی شار در زیر تمامی قطب ها، الگوی یکسان دارد، بنابراین گذر از صفرها، بیان گر شرایط غیرعادی نخواهند بود. از سوی دیگر با وجود اینکه این روش در شرایط نامتقارن دقت مناسبی دارد، قادر به تعیین محل خطا نمی باشد. در [۸] روشی تحلیلی برای تشخیص خطا در آهنربا و تعیین مکان آن ارائه شده است که از حل Laplacian/Quasi-Poissonian برای سیستم مغناطیسی بهره می برد.

در این مقاله یک مدل دینامیکی خطی با نام ARX [۱۲]، برای تشخیص خطای احتمالی در آهنربای یک ماشین آهنربای دائم شار محوری ارائه شده است. محققین زیادی مدل های ریاضی گوناگونی را برای شناسایی سیستم های مختلف به کار برده اند. Peng مدلی نمایی از ARX وابسته به بار را، برای توصیف ویژگی های غیرخطی یک نیروگاه حرارتی غیرخطی به کار برد [۱۳]. Kanellos مدل ARX را به مزایای

بادی (Wps) اعمال نمود [۱۴]. استفاده از مدل های دینامیک (خطی یا غیرخطی) نظیر ARX به فهم بهتر مرتبه و عمق دینامیکی سیستم ها کمک می نماید. این مدل ها سریع و واضح بوده و پارامترهای سیستم واقعی را با دقت مناسبی، تعیین می کنند. منظور از واضح بودن^۲ مدل آن است که با استفاده از آن می توان مرتبه و عمق دینامیکی سیستم را تعیین نمود و به درک مناسبی از ساختار سیستم، رفتار و عملکرد آن دست یافت.

داده های مورد نیاز برای آموزش و اعتبارسنجی مدل ARX ارائه شده، با استفاده از مدار معادل مغناطیسی موتور MEC [۱۵]، تولید می گردند. در مدل MEC، هر آهنربا به صورت عمودی به ده قطعه تقسیم شده است. کاهش در شار تولیدی هر قطعه، به معنی نقص در آن قطعه از آهنربا تعبیر می گردد. موتور مورد نظر یک موتور چهار قطب بوده که شامل چهار عدد آهنربا بر روی روتور می باشد (این موتور در آزمایشگاه ماشین های الکتریکی، طراحی و ساخته شده است؛ شکل ۱. چندین حالت دیامغناطیس شدگی آهنربا به مدل ARX برای آموزش ارائه می گردد. در مدل ارائه شده، ولتاژ Back-EMF و شار تولیدی از قطعه های آهنربا به ترتیب به عنوان ورودی و خروجی در نظر گرفته شده اند. از آنجایی که افت شار قطب های آهنربا، در هر یک از سه فاز سیم پیچی استاتور تاثیرگذار است، بررسی یکی از فازها (مثلا فاز A) برای انجام این مدلسازی مناسب و کافی می باشد. پس از این مدل، مدل دیگری برای پیش بینی درصد نقص در آهنربا، معرفی می شود.



(الف)



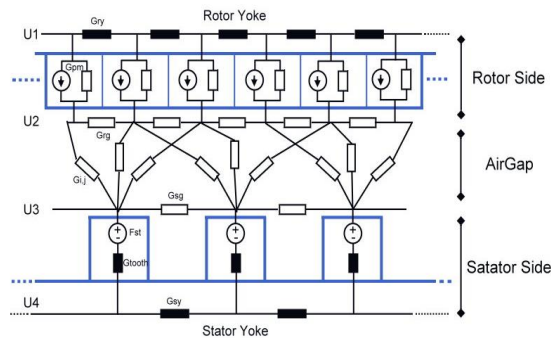
(ب)



(پ)

شکل ۱. الف. ساختار موتور، ب. روتور، پ. استاتور

^۲ Transparency^۱ Axial Flux Permanent Magnet Machines



شکل ۲. نمای شماتیکی از شبکه‌ی پرمانس

با نوشتن معادلات پتانسیل گرہ‌ها برای مدار مغناطیسی ماشین، می‌توان دستگاه معادلات جبری ماشین را برای سطوح پتانسیل مغناطیسی مختلف، واقع در یوغ روتور، یوغ استاتور، فاصله‌ی هوایی زیر آهنرباها و فاصله‌ی هوایی بالای دندان‌های استاتور نوشت. معادلات گرہ برای اولین سطح پتانسیل واقع در یوغ روتور به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} u_{1,1}(G_{ry} + G_{ry}' + G_{pm}) \\ - u_{1,2}G_{ry} - u_{1,4}G_{ry}' \\ - u_{2,1}G_{pm} = \varphi_{rs} \end{aligned} \quad (1)$$

G_{ry} ، G_{ry}' ، G_{pm} به ترتیب پرمانس هر تکه‌ی آهنربا، پرمانس بین دو قطب آهنربایی داخل یوغ روتور و پرمانس بالای دو تکه از آهنربا در داخل یوغ روتور می‌باشد. در این رابطه φ_{rs} شار تولید شده توسط هر قطعه از آهنرباست. رابطه‌ی (۱) پتانسیل گرہ را برای اولین گرہ از سطح پتانسیل اول که در یوغ روتور در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهد. در این رابطه اولین اندیس $u_{1,1}$ نشان‌دهنده‌ی سطح پتانسیل است؛ در حالیکه اندیس دوم بیان‌گر شماره قطعه‌ی آهنربا می‌باشد که برای این سطح پتانسیل مغناطیسی از ۱ تا ۴۰ تغییر خواهد کرد. با توجه به ساختار ماشین، قسمت روتور به ۴۰ بخش تقسیم شده است؛ به این ترتیب سطوح پتانسیل U_1 و U_2 شامل ۴۰ گرہ می‌باشد که هر گرہ با یکی از ۱۰ قطعه‌ی هر یک از ۴ آهنربای نصب شده روی روتور، مرتبط خواهد بود. سایر معادلات گرہ مربوط به این سطح پتانسیل به صورت مشابه نوشته می‌شوند.

با تقسیم استاتور به ۱۵ گرہ (هر گرہ مربوط به یک دندان‌ی استاتور است)، سطوح پتانسیل U_3 و U_4 هر یک ۱۵ معادله‌ی گرہ خواهند داشت. رابطه‌ی (۲) معادله‌ی گرہ را برای اولین گرہ واقع در یوغ استاتور نشان می‌دهد:

$$\begin{aligned} u_{4,1}(2G_{sy}) - u_{4,15}G_{sy} - u_{4,2}G_{sy} \\ + (u_{4,1} - u_{3,1}) \\ - F_{st}G_{tooth} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، G_{tooth} پرمانس دندان‌ی استاتور است. برای سطوح پتانسیل مغناطیسی U_3 و U_4 نیز روش مشابه‌ی اعمال می‌گردد. این سطوح پتانسیل با پرمانس‌های واقع در فاصله‌ی هوایی ماشین در

صحت مدل مغناطیسی موتور با نتایج عملی تایید شده است. علاوه بر این چندین مجموعه‌ی داده برای بررسی اعتبار مدل ARX در تشخیص دیا-مغناطیس شدن آهنربا، تولید گردید. مطالعه‌ی نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های ارائه شده، قادر به پیش‌بینی شار تولیدی از قطعه‌ی خطادار و تعیین درصد نقص در آهنربا با دقت بالای ۸۰ درصد می‌باشند.

۲- مدلسازی ماشین آهنربای دائم شار

محوری

روتور و استاتور موتور مورد نظر در شکل‌های ۱.ب و ۱.پ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، موتور مورد بررسی، یک موتور چهار قطب با سیم‌پیچی توزیع شده در شیارهای استاتور می‌باشد. ویژگی‌ها و پارامترهای طراحی موتور در جدول ۱. آمده است.

جدول ۱. پارامترهای موتور

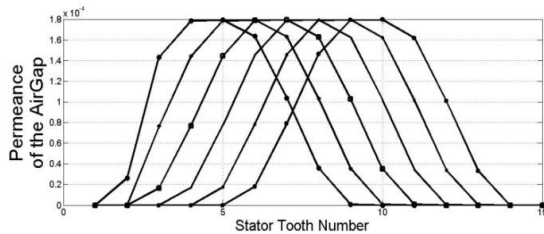
پارامتر	مقدار
تعداد قطب	4
تعداد فازها	3
سرعت	1500 rpm
شعاع خارجی	158 mm
شعاع داخلی	88/5 mm
ضخامت آهنربا	5 mm
گام قطب	118° electrical
ضخامت یوغ استاتور	15 mm
ضخامت یوغ روتور	17 mm

برای مدلسازی دقیق ماشین‌های الکتریکی، غالباً روش اجزای محدود به کار گرفته می‌شود، با این وجود حجم بالای محاسبات مورد نیاز، مشکل ساز خواهد بود. به همین دلیل روش‌هایی با دقت کمتر اما سریع تر نظیر روش مدار معادل مغناطیسی، ارائه شده‌اند. بر پایه‌ی ویژگی‌های مغناطیسی ماده و با تعیین مسیرهای فضایی شار در ماشین، مداری مغناطیسی ساخته می‌شود. ویژگی‌های میدان مغناطیسی را می‌توان با معادله‌سازی قواعد مدارهای الکتریکی؛ یعنی قوانین ولتاژ و جریان Kirchhoff (KVL و KCL) محاسبه نمود [۱۶]. مدل‌های مدار معادل مغناطیسی نتایجی نسبتاً دقیق را به دست می‌دهند؛ از طرف دیگر سرعت این روش‌ها در مقایسه با مدل‌هایی نظیر اجزای محدود با گام‌های زمانی (TSFE) بسیار بالاست [۱۷].

شکل ۲. نمایی شماتیکی از شبکه‌ی پرمانس ایجاد شده را نشان می‌دهد. در این شکل، شش تکه از یک آهنربا تصویر شده است (هر آهنربا به ده بخش تقسیم گردیده است). پتانسیل‌های گرہ که با عنوان U_i به سطوح پتانسیل مغناطیسی نسبت داده شده‌اند، در یوغ استاتور و روتور و فاصله‌ی هوایی بین آن دو قرار دارند.

در رابطه‌ی (۵)، G_{max} پرمانس ماکزیمم بین دندانه‌ی استاتور و تکه‌ی آهنربای روتور در لحظه‌ی است، که این دو کاملاً در مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند. γ جدایی زاویه‌ای بین دندانه‌ی استاتور و تکه‌ی آهنربا می‌باشد. γ_t و γ'_t ویژگی‌های زاویه‌ای ساختار موتور بوده و به عرض و قطر دندانه‌های استاتور و تکه‌های آهنربا و نیز طول فاصله‌ی هوایی وابسته‌اند.

شکل ۳. تغییرات پرمانس را در شش گام و برای تکه‌ی شماره‌ی ۲۲ آهنربا را که با استفاده از رابطه‌ی (۶) محاسبه شده‌است، نشان می‌دهد.



شکل ۳. پرمانس فاصله‌ی هوایی بین دندانه‌های استاتور و تکه‌ی آهنربای شماره‌ی ۲۲ در ۶ مرحله چرخش (محور افقی: شماره‌ی دندانه‌ی استاتور)

پس از کامل کردن شبکه‌ی پرمانس و نوشتن ماتریس تبدیل نیروی مغناطیسی^۱ و ماتریس تبدیل شار^۲ [۱۵]، محاسبه‌ی پتانسیل‌های مغناطیسی گره‌ها انجام می‌شود. ماتریس تبدیل نیروی مغناطیسی که با W'' نشان داده می‌شود، رابطه‌ی بین بردار MMF دندانه و بردار جریان فازها را به صورت زیر برقرار می‌نماید:

$$F_t = W'' I \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶)، F_t و I به ترتیب بردار نیروی محرکه‌ی مغناطیسی و بردار جریان فاز هستند. W'' نیز به نحوه و آرایش سیم‌بندی ماشین بستگی دارد که این آرایش برای سیم‌بندی موتور شبیه‌سازی شده، در جدول ۲ آمده‌است. در این جدول مکان قرارگیری هر یک از کلاف‌ها در داخل شیارهای استاتور دیده می‌شود.

جدول ۲. آرایش سیم‌بندی

Phase A		Phase B		Phase C	
In	Out	In	Out	In	Out
1	4	6	9	11	14
8	5	13	10	3	15
8	11	13	1	3	6
9	12	14	2	4	7
15	12	5	2	10	7

ماتریس تبدیل شار نیز که با W' نشان داده می‌شود، بیان‌گر ارتباط بین شار فازها و دندانه‌های استاتور است [۱۵].

$$\Phi = W' \Phi_t \quad (7)$$

ارتباطند؛ بنابراین معادلات گره مرتبط با آنها، با چرخش روتور تغییر خواهد کرد. روند محاسبه‌ی معادلات گره برای یک گره نمونه در سطوح پتانسیل U_r و U_r' به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} u_{r,1} \left(G_{PM} + G_{rg}' + G_{rg} + \sum_j G_{r,j}' \right) & \quad (3) \\ & - u_{r,1} G_{PM} \\ & - u_{r,1} G_{rg}' \\ & - u_{r,2} G_{rg} \\ & - \sum_j u_{r,j} G_{r,j}' \\ & = -\phi_{rs} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{r,1} \left(\gamma * G_{sg} + \sum_j G_{r,j}' \right) - u_{r,1} G_{sg} & \quad (4) \\ & - u_{r,2} G_{sg} \\ & - \sum_j u_{r,j} G_{r,j}' + (u_{r,1} \\ & - F_{st} - u_{r,1}) G_{tooth} \\ & = * \end{aligned}$$

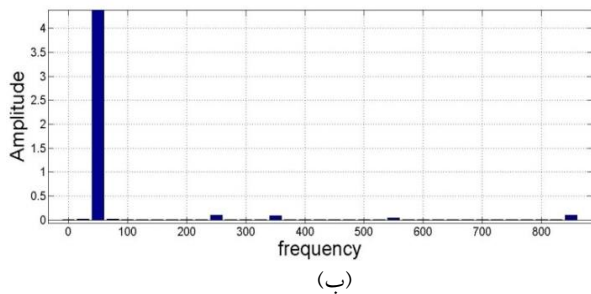
در رابطه‌ی (۳)، G_{rg}' پرمانس نشی بین دو تکه‌ی آهنربا از دو قطب آهنربای مجاور در داخل فاصله‌ی هوایی است. G_{rg} پرمانس نشی بین دو تکه‌ی آهنربا از یک آهنربا، در فاصله‌ی هوایی می‌باشد. G_{sg} نیز پرمانس نشی بین دو دندانه‌ی استاتور در فاصله‌ی هوایی است. $\sum_j G_{r,j}'$ بیان‌گر مجموع پرمانس‌های متصل به گره اول از سطح پتانسیل مغناطیسی نام است؛ اندیس j در این عبارت، شماره‌ی پرمانس واقع در فاصله‌ی هوایی را که متصل به سایر سطوح پتانسیل مغناطیسی است، نشان می‌دهد. اجزای این مجموع با چرخش روتور، تغییر می‌کند. برای نوشتن معادلات گره مربوط به این سطوح پتانسیلی، یک ماتریس پرمانس متغیر با زمان تعریف می‌گردد. در هر گام المان‌های ماتریس با توجه به موقعیت روتور تعیین می‌شود.

به دلیل چرخش روتور، تنها تعداد مشخصی از المان‌های ماتریس پرمانس در هر گام غیر صفر است. به عبارت دیگر با توجه به موقعیت روتور، تعداد معینی از دندانه‌های استاتور با یک تکه از آهنربا در هر لحظه ارتباط شار خواهند داشت. رابطه‌ی زیر این ارتباط و نیز مقدار پرمانس بین دندانه‌های استاتور و تکه‌های آهنربا را مشخص می‌کند [۱۵]:

$$G_{i,j} = \begin{cases} G_{max} & , \leq \gamma \leq \gamma'_t \text{ and } \pi - \gamma'_t \leq \gamma \leq \pi \\ \frac{G_{max}}{2} \frac{1 + \cos \pi \frac{\gamma - \gamma'_t}{\gamma_t - \gamma'_t}}{\gamma_t - \gamma'_t} & \gamma'_t \leq \gamma \leq \gamma_t \\ \frac{G_{max}}{2} \frac{1 + \cos \pi \frac{\gamma - \pi + \gamma'_t}{\gamma_t - \gamma'_t}}{\gamma_t - \gamma'_t} & \pi - \gamma_t \leq \gamma \leq \pi - \gamma'_t \\ G_{max} & \text{other wise} \end{cases} \quad (5)$$

¹ Magnetomotive Force Transform Matrix

² Flux Transform Matrix

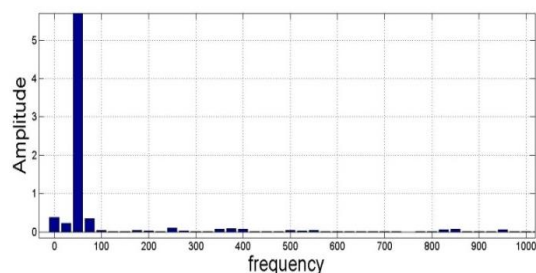


شکل ۵. الف. ولتاژ $Back-EMF$ در حوزه‌ی فرکانس، ب. نمای نزدیک

نمایی نزدیک‌تر از طیف فرکانسی ولتاژ $Back-EMF$ در شکل ۵. ب دیده می‌شود. فرکانس اصلی که برابر با ۵۰ هرتز است، ناشی از ساختار موتور و سرعت چرخش آن می‌باشد. تاثیر تقسیم‌بندی آهنرباهای موتور به ده تکه در این طیف به وضوح قابل مشاهده است. مولفه‌ی DC موجود به دلیل ساختار سیم‌پیچی موتور می‌باشد. در این سیم‌بندی گام کسری، هر فاز استاتور شامل ۵ کلاف است که مجموعاً ۴ قطب را تشکیل می‌دهند؛ بر این اساس به ازای هر فاز سیم‌پیچی، هر قطب دو کلاف روی هم دارد که با یکدیگر تشکیل یک تک‌قطب می‌دهند. در نتیجه سیم‌بندی ماشین نامتقارن بوده و این عدم تقارن منجر به تولید مولفه‌ی DC در طیف فرکانسی ولتاژ $Back-EMF$ می‌گردد. هارمونیک‌های مرتبه‌های بالاتر که دارای دامنه‌ی بزرگ‌تری نسبت به سایر هارمونیک‌ها هستند نیز ناشی از تعداد دندانه‌های استاتور، تعداد قطب‌ها و نیز تقسیم‌بندی آهنرباهای موتور به ده تکه می‌باشند.

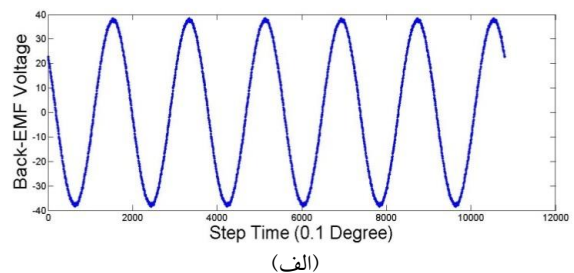
در مرحله‌ی بعد بر اساس این تابع فرکانسی و دامنه‌ی آن در فرکانس‌های مختلف، ساختاری خطی برای شناسایی سیستم ارائه می‌گردد. مدل خطی یادشده که در کاربردهای شناسایی سیستم از آن با عنوان ARX [۱۲] و [۲۱] نام برده می‌شود، قادر خواهد بود تا شار تولید شده توسط هر قطعه از آهنربا را با توجه به ولتاژ $Back-EMF$ پیش‌بینی نماید. پس از آن نیز مدل دیگری برای تعیین درصد خرابی آهنربا معرفی می‌گردد.

شکل ۶. مولفه‌های فرکانسی ولتاژ $Back-EMF$ را برای یک حالت نقص در آهنربا نشان می‌دهد. در این مورد ویژه که برای نشان دادن موثر بودن تحلیل ارائه‌شده، آورده شده است، شار تولیدی یک قطعه از ده قطعه‌ی یکی از آهنرباهای موتور، صفر فرض شده است.

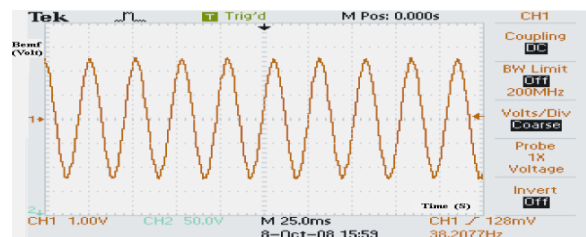


شکل ۶. توزیع طیفی ولتاژ $Back-EMF$ برای یک حالت نمونه‌ی دارای نقص

در گام بعدی ولتاژ $Back-EMF$ القا شده در سه فاز استاتور در طی یک فرآیند مرحله‌به‌مرحله محاسبه می‌گردد. موقعیت روتور به تدریج و در بازه‌های زمانی از مرتبه‌ی 10^{-5} ثانیه تغییر داده می‌شود. در هر مرحله شار وارد شده به هر یک از دندانه‌های استاتور که توسط آهنرباهای روتور تولید شده است، محاسبه شده؛ سپس شار دندانه با استفاده از رابطه‌ی (۷) به شار فاز تبدیل می‌گردد؛ به این ترتیب ولتاژ القایی در هر گام زمانی محاسبه می‌شود. شکل ۴. الف. ولتاژ $Back-EMF$ القا شده در فازهای استاتور را که با استفاده از مدل مغناطیسی محاسبه شده است، نشان می‌دهد. نتیجه‌ی عملی نشان داده شده در شکل ۴. ب. درستی نتیجه‌ی حاصل از مدلسازی به روش مدار مغناطیسی را تایید می‌نماید [۱۸] و [۱۹].



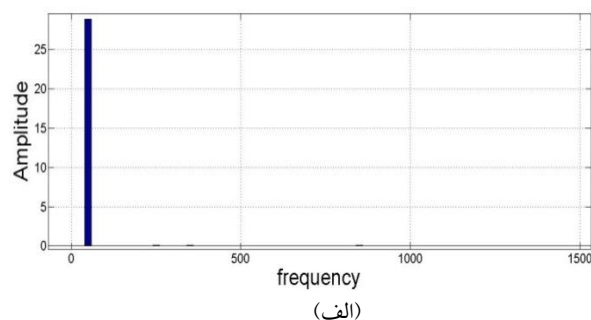
(الف)



(ب)

شکل ۴. ولتاژ $Back-EMF$ القا شده در سیم‌پیچی استاتور. الف. شبیه‌سازی شده با مدل MEC. ب. نتیجه‌ی عملی با نسبت ۱ به ۱۰.

برای شناسایی سیستم لازم است تا ولتاژ $Back-EMF$ را به حوزه‌ی فرکانس انتقال دهیم که این عمل با استفاده از تبدیل فوریه انجام می‌گیرد. شکل ۵. الف. نتیجه‌ی این تبدیل را برای یک دور چرخش روتور نشان می‌دهد. مولفه‌های هارمونیک ولتاژ $Back-EMF$ به دلیل وجود دندانه‌های استاتور، قطب‌های روتور، تقسیم‌بندی آهنرباهای روتور و نیز ترکیب عوامل یادشده، پدید می‌آیند. دامنه‌ی مولفه‌ی اصلی برابر با ۲۹/۴۰۴۱ ولت می‌باشد.



(الف)

همان گونه که در شکل ۶ دیده می شود، نقص در آهنربا، هارمونیک های ولتاژ را تحت تاثیر قرار داده است. دامنه ی مولفه ی اصلی برابر با ۲۸/۸۹۵۶ است که ۱/۷ درصد کاهش را در مقایسه با حالت سالم نشان می دهد. هریک از داده های خروجی از این طیف فرکانسی را می توان برای شناسایی سیستم به کار برد. این داده ها ممکن است شامل دامنه ی مولفه ی اصلی، دامنه ی مولفه ی DC و توزیع طیفی ولتاژ Back-EMF در حالت های مختلف باشد. هر گونه نقصی در آهنرباها ممکن است مولفه ی فرکانسی خاصی را تحت تاثیر قرار داده و یا طیف را از نظر فرکانسی جابجا کند.

۳- حالت خطا دار

۳-۱- مدل ARX

هدف از شناسایی سیستم، ایجاد مدل های ریاضی برای سیستم ها است [۲۰]. این مدل ها به طور کلی به دو دسته تقسیم می شوند: مدل های استاتیکی و مدل های دینامیکی [۱۲]. در سیستم های دینامیکی خروجی فعلی نه تنها به ورودی فعلی وابسته است، بلکه از ورودی ها و خروجی های لحظات قبل نیز تاثیر می گیرد. رایج ترین مدل ورودی-خروجی مدل ARX غیرخطی^۱ است [۱۳].

شکل ۷. ساختار یک مدل خطی عمومی را نشان می دهد که سایر مدل های خطی را با ساده سازی آن می توان ایجاد نمود [۱۲]. مدل ARX نیز مدل توسعه یافته ی AR است و با رابطه ی زیر تعریف می شود:

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)} u(k) + \frac{1}{A(q)} v(k) \quad (۸)$$

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + v(k) \quad (۹)$$

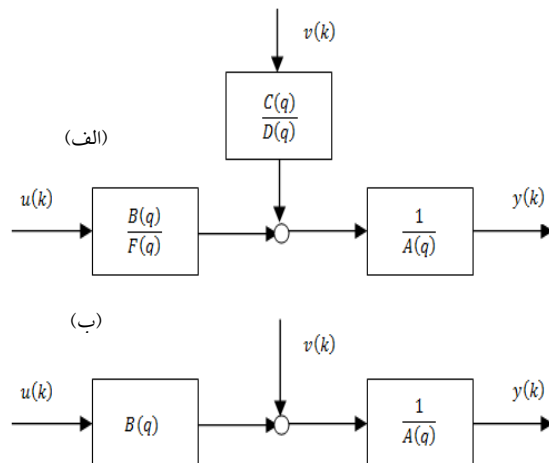
پیش بینی گر بهینه ی^۲ ARX را نیز می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\hat{y}(k|k-1) = B(q)u(k) + (1 - A(q))y(k) \quad (۱۰)$$

و می توان آن را به صورت زیر نیز نوشت:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k|k-1) = & b_1 u(k-1) + \dots \\ & + b_m u(k-m) \\ & - a_1 y(k-1) - \dots \\ & - a_m y(k-m) \end{aligned} \quad (۱۱)$$

عبارت *autoregressive* در اینجا به تابع تبدیل از ورودی $u(k)$ به خروجی $y(k)$ و نیز به تابع تبدیل نويز از $v(k)$ به خروجی



شکل ۷. ساختار مدل های خطی [۱۲]. الف. ساختار مدل خطی

عمومی. ب. ساختار ARX

۳-۲- دیامغناطیس شدن آهنربا

برای اینکه تاثیر دیامغناطیس شدن آهنربا بر عملکرد موتور مشخص گردد، فرض شده است که یک قطعه از ده قطعه آهنربای مربوط به یک قطب آهنربایی روتور، شار ثابتی را که دیگر قطعات تولید می کنند، ایجاد نمی نماید. در کدی که برای مدلسازی موتور آهنربای دائم مورد نظر در نرم افزار MATLAB نوشته شده است، این پدیده به وسیله ی تابع 'rand' و در داخل یک حلقه مدل شده است. در هر بار تکرار حلقه، یک عدد تصادفی در بازه ی مشخص، به قطعه آهنربایی معلوم نسبت داده می شود. تاثیر این الگوی شار دارای اختلال بر روی ولتاژ Back-EMF با استفاده از تبدیل فوریه ی گسسته^۳، بررسی می گردد.

بررسی ها نشان داده اند که اگر تنها یک یا دو قطعه از ده قطعه آهنربای در نظر گرفته شده، مربوط به یک قطب آهنربایی روتور، شاری متفاوت با سایر قطعات تولید نمایند، دامنه ی مولفه های هارمونیک ولتاژ Back-EMF تغییر چندانی نخواهند داشت. بدین ترتیب تاثیر عمده بر روی دامنه ی مولفه ی اصلی دیده خواهد شد. بنابراین برای شناسایی سیستم می توان تنها مولفه های موثر را در نظر گرفته و از دیگر مولفه ها که تاثیر کمتری دارند، چشم پوشی کرد که نتیجه ی آن سادگی در محاسبات و کاهش حجم آن است. با این وجود با افزایش درصد نقص در شار تولیدی آهنربا، تاثیر آن بر سایر مولفه های فرکانسی ولتاژ، قابل توجه خواهد بود؛ بنابراین در مدل دوم که برای تعیین درصد نقص ارائه شده-

³ Forward Shift Operator

⁴ Discrete Fourier Transform

¹ Nonlinear Auto Regressive eXogenous (ARX)

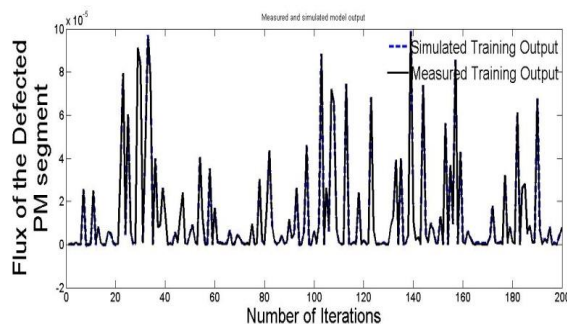
² Optimum ARX Predictor

فارادی تبعیت می‌کند، در نتیجه ولتاژ در هر لحظه به شار همان لحظه و نیز شار در لحظه قبل وابسته بوده و سیستم دارای تاخیر نمی‌باشد. بدین ترتیب خروجی فعلی سیستم با خروجی لحظاتی قبل و نیز ورودی فعلی و لحظاتی پیشین، رابطه‌ی زیر را خواهد داشت:

$$y(k|k-1) = b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) \quad (12)$$

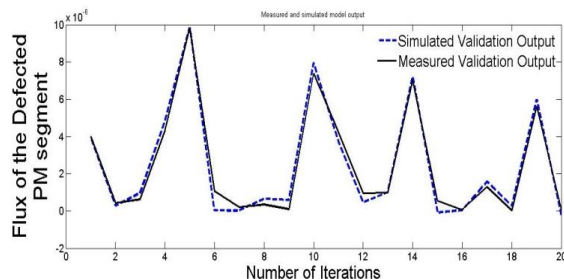
$$A(q) = 1 - 1/435q^{-1} + 0/434q^{-2} \quad (13)$$

$$B(q) = 0/0001053 - 0/0001053q^{-1} \quad (14)$$



شکل ۹. خروجی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای داده‌های آموزش

لازم است صحت مدل در پیش‌بینی خروجی واقعی، با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی^۱ تایید گردد. برای این منظور مشابه روشی که برای تولید داده‌های آموزشی اجرا شد، بسته‌هایی از داده‌های مورد نیاز ایجاد گردید. با توجه به اعداد تصادفی که در هر بار تکرار حلقه به قطعه آهنربای مورد نظر، به عنوان شار اعمال می‌گردید، صحت مدل بررسی شد. شکل‌های ۱۰.الف، ۱۰.ب و ۱۰.پ. نتایج شبیه‌سازی را برای سه بسته‌ی داده‌ای متفاوت نشان می‌دهند.



(الف)

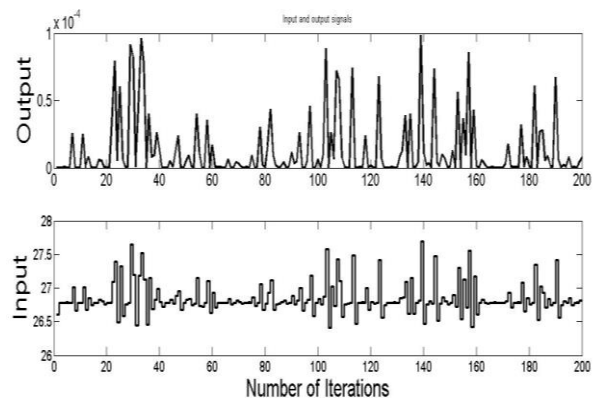
^۱ Validation Data

است، علاوه بر مولفه‌ی اصلی ولتاژ، سایر هارمونیک‌ها نیز باید در نظر گرفته شوند.

۳-۳- شناسایی سیستم با استفاده از مدل ARX

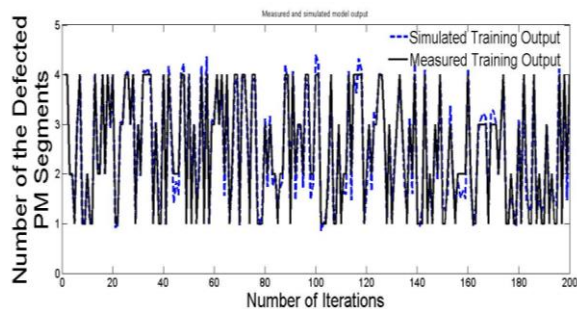
مولفه‌ی اصلی ولتاژ Back-EMF در حوزه‌ی فرکانس و شار تولید شده توسط قطعه آهنربای دارای نقص، به ترتیب به عنوان ورودی و خروجی مدل شناسایی سیستم در نظر گرفته می‌شوند. مدلی با یک ورودی و یک خروجی بر اساس ساختار ARX طراحی می‌گردد؛ ضرایب رگرسیون‌های مدل نیز باید در این طراحی مشخص گردد. برای این منظور بسته‌ای از داده‌ها که شامل ورودی و خروجی مطلوب باشد، ایجاد گردید. اعداد تصادفی که به قطعه آهنربای مورد نظر نسبت داده می‌شوند، در هر بار تکرار حلقه متفاوت خواهند بود. این تفاوت بر دامنه‌ی مولفه‌ی اصلی ولتاژ Back-EMF تاثیر می‌گذارد. مدل مورد نظر به نحوی آموزش داده می‌شود که بتواند شار قطعه آهنربای نقص‌دار را با توجه به ولتاژ Back-EMF تعیین نماید.

ورودی‌ها و خروجی‌هایی که به عنوان داده‌های آموزشی برای مدل ARX استفاده شده‌اند در شکل ۸. دیده می‌شوند. در این شکل نمودار بالایی داده‌های خروجی را نشان می‌دهد؛ محور عمودی مقدار شار تولیدی توسط قطعه آهنربای نقص‌دار را مشخص می‌کند؛ محور افقی نیز نشان‌دهنده‌ی تعداد تکرارها می‌باشد که برابر با ۲۰۰ است. نمودار پایینی در شکل ۸. دامنه‌ی مولفه‌ی اصلی ولتاژ Back-EMF را برای فاز a از سیم‌پیچی نشان می‌دهد. با توجه به اعداد تصادفی در هر بار تکرار، دامنه‌ی مولفه‌ی اصلی نیز متفاوت خواهد بود.



شکل ۸. ورودی و خروجی استفاده شده به عنوان داده‌های آموزش برای مدل ARX. خروجی: شار تصادفی تولید شده. ورودی: دامنه‌ی مولفه‌ی اصلی ولتاژ Back-EMF

خروجی مدل ARX برای داده‌های آموزش که به میزان ۹۸/۳۱ درصد با خروجی سیستم واقعی مطابقت دارد، در شکل ۹. نشان داده شده‌است. مرتبه‌های دینامیکی مدل نیز برابرند با؛ $n_a = 2$ ، $n_b = 2$ و $n_k = 0$. با توجه به صفر بودن n_k سیستم دارای تاخیر نمی‌باشد. عدم تاخیر در مدل ناشی از سیستم مورد بررسی است؛ به این ترتیب که ولتاژ القایی در سیم‌پیچی استاتور ناشی از تغییرات شار بوده و از قانون القای



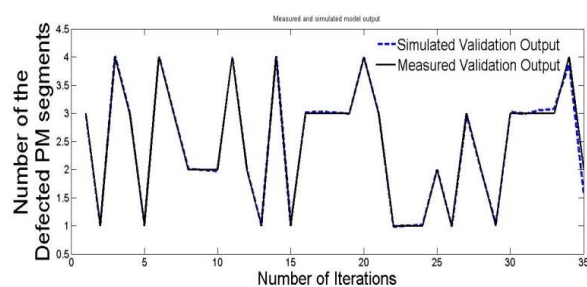
شکل ۱۲. نتایج شبیه‌سازی پیش‌بینی مدل از درصد خطا در آهنربا به همراه خروجی سیستم واقعی

خروجی شبیه‌سازی شده با مدل ARX برای داده‌های آموزشی به میزان ۸۰/۱۲ درصد با خروجی واقعی مطابقت دارد. با این وجود لازم است تا مشابه آنچه برای مدل پیشین انجام شد، صحت مدل ریاضی با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی تایید گردد. مدل ARX اعمال شده دارای دینامیک‌هایی از مرتبه‌ی زیر می‌باشد:

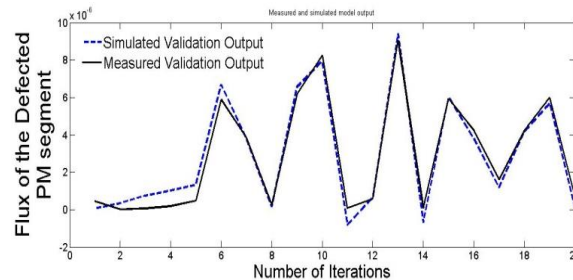
$$n_a = 32, n_b = 10, n_k = 0$$

مرتبه‌های دینامیکی مورد نظر به تمامی ورودی‌ها اعمال شده‌اند. در اینجا نیز مطابق مدل قبل، بسته‌هایی کوچک‌تر از داده، برای بررسی صحت مدل در تخمین خروجی انتخاب شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی به همراه خروجی واقعی در شکل ۱۳. دیده می‌شود.

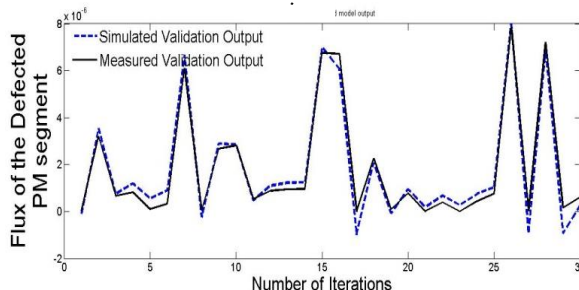
مدل دیگر، ساختاری برای تشخیص درصد خطای دیامغناطیس شدن آهنرباست. ورودی و خروجی مانند حالت قبل است، با این تفاوت که در مدل Back-EMF به گونه‌ای آموزش داده می‌شود تا با توجه به ولتاژ درصد خطا در آهنربا را تعیین نماید. در این مدل مولفه‌ی اصلی ولتاژ و به همراه هارمونیک‌های سوم، پنجم و هفتم، به عنوان DC مولفه‌ی ورودی استفاده شده‌اند. تعداد قطعات آسیب‌دیده‌ی آهنربا که از ۱ تا ۴ متغیر بوده و به صورت تصادفی در بخش‌های مختلفی از قطب‌های آهنربایی فرض می‌شود؛ به عنوان خروجی در نظر گرفته شده‌است. شکل ۱۱. مولفه‌ی اصلی ولتاژ را به عنوان داده‌ی ورودی و نیز خروجی را نشان می‌دهد. شکل ۱۲. نتیجه‌ی تخمین خروجی داده‌های آموزشی را با به همراه خروجی سیستم واقعی نشان می‌دهد. ARX استفاده از مدل



(الف)

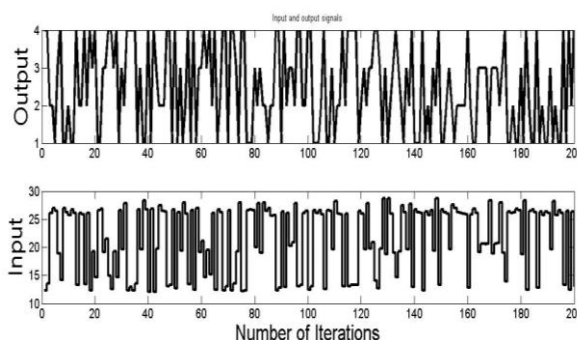


(ب)



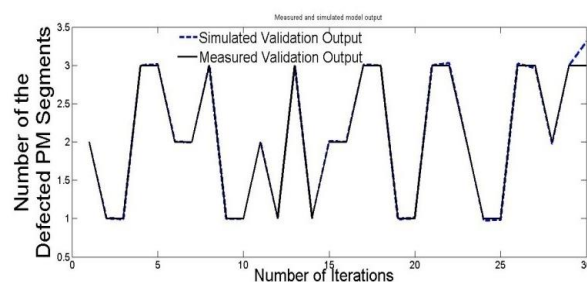
(پ)

شکل ۱۰. شار تولیدشده توسط قطعه آهنربای دارای نقص برای سه بسته داده‌ی اعتبارسنجی (پیش‌بینی ARX به همراه مقدار واقعی شار) در شکل ۱۰. الف. ۲۰ نمونه به عنوان داده‌های اعتبارسنجی به مدل ARX ارائه شده‌اند؛ خروجی شبیه‌سازی شده با دقت ۸۵/۶۵ درصد به خروجی واقعی نزدیک است. شکل‌های ۱۰. ب. و ۱۰. پ. نیز خروجی شبیه‌سازی شده را به همراه خروجی واقعی برای همان مدل ARX نشان می‌دهند. برای مجموعه‌ی دوم و سوم دقت مدل در تخمین خروجی به ترتیب برابر با ۸۲/۵۳ درصد و ۸۲/۰۸ درصد می‌باشد. با بزرگ‌تر نمودن بسته‌ی داده‌های آموزشی، مدل‌های دقیق‌تری قابل حصول خواهد بود. با این وجود نتایج این شبیه‌سازی‌ها نیز دقت مطلوبی را در پیش‌بینی شار نشان می‌دهند؛ بنابراین با آنالیز ولتاژ Back-EMF می‌توان به وجود نقص در آهنربا پی برد.



شکل ۱۱. ورودی و خروجی مدل تشخیص درصد خطای آهنربا

- [2] K. Abbaszadeh, F. Rezaee Alam, S.A. Saied, "Cogging torque optimization in surface-mounted permanent-magnet motors by using design of experiment, Energy Conversion and Management 52, 3075–3082, 2011.
- [3] Seyyed Mehdi Mirimani, Abolfazl Vahedi, Fabrizio Marigenetti, "Effect of Inclined Static Eccentricity Fault in Single Stator-Single Rotor Axial Flux Permanent Machines", IEEE Trans. Magn, vol. 48, NO.1, Jan. 2012.
- [4] Khoobroo, A., Fahimi, B., "A novel method for permanent magnet demagnetization fault detection and treatment in permanent magnet synchronous machines", Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 2231 - 2237, 2010.
- [5] Kwangwoon Lee, Jongman Hong, Sang Bin Lee, Sangtaek Lee. "Quality Assurance Testing for Magnetization Quality Assessment of BLDC Motors used in Compressors ", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2009. IAS 2009. IEEE pp. 1-6, 2009.
- [6] Ki-Chan Kim, Kwangsoo Kim, Hee Jun Kim, Ju Lee. "Demagnetization Analysis of Permanent Magnets According to Rotor Types of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor ", IEEE Trans Mag., vol 45, no. 6 , pp. 2799 – 2802, 2009.
- [7] Wang, J., Wang, W., Atallah, K., Howe, D. "Demagnetization Assessment for Three-Phase Tubular Brushless Permanent-Magnet Machines", IEEE Trans. Mag., vol.44, no.9, pp. 2195 - 2203, 2008.
- [8] Farooq, J.A., Djerdir, A., Miraoui, A. " Analytical Modeling Approach to Detect Magnet Defects in Permanent-Magnet Brushless Motors", IEEE Trans Mag., vol. 44, no. 12, pp. 4599 - 4604, 2008.
- [9] T. Raminosoa, J.A. Farooq, A. Djerdir and A. Miraoui, " Reluctance network modelling of surface permanent magnet motor considering iron nonlinearities" Elsevier, Energy Conversion and Management, vol. 50, Issue 5, pp. 1356-1361, 2009.
- [10] Farooq, J., Srairi, S., Djerdir, A., Miraoui, A. "Use of permeance network method in the demagnetization phenomenon modeling in a permanent magnet motor", IEEE Trans. Mag., vol. 42, no. 4, pp. 1295 - 1298, 2006.
- [11] Ki-Chan Kim, Seung-Bin Lim, Dae-Hyun Koo, Ju Lee. "The Shape Design of Permanent Magnet for Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Partial Demagnetization", IEEE Trans. Mag., vol. 42, no. 10, pp. 3485 - 3487, 2006.



(ب)

شکل ۱۳. نتایج شبیه‌سازی برای دو بسته از داده‌های اعتبارسنجی برای تشخیص درصد خطا در آهنربا

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله بر اساس مدلسازی یک موتور آهنربای دائم شار محوری، به روش مدار معادل مغناطیسی، یک شبکه‌ی پرمانس به دست آمد. به منظور افزایش دقت مدل، هر قطعه از آهنربای روتور به ده بخش تقسیم گردید. تاثیر دیامغناطیس شدن آهنربا بر روی ولتاژ Back-EMF با استفاده از آنالیز فوریه مورد مطالعه قرار گرفت. برای ایجاد یک مدل ریاضی که قادر به پیش‌بینی نقص در آهنربا باشد، داده‌های استخراج‌شده از مدل مدار معادل مغناطیسی به یک ساختار ARX اعمال شد. در مدل معرفی‌شده ولتاژ Back-EMF در حوزه‌ی فرکانس و شار تولید شده توسط قطعه آهنربا به ترتیب به عنوان ورودی و خروجی در نظر گرفته شد. برای ایجاد یک مدل ورودی-خروجی لازم است تا داده‌ها کامل و دربرگیرنده‌ی تمامی حالات ممکن باشند؛ با این وجود برای تولید داده‌های این چنینی زمان زیادی نیاز است. در این بررسی دو نوع مدل ارائه گردید؛ مدل اول برای پیش‌بینی شار تولید شده توسط قطعه آهنربای دیامغناطیس‌شده و مدل دوم جهت تعیین درصد نقص در آهنربا. به این ترتیب قادر خواهیم بود تا با بررسی ولتاژ القایی در یکی از سه فاز سیم-پیچی استاتور و محاسبه‌ی مولفه‌ی اصلی آن، با کمک روش ارائه‌شده، به وجود افت شار در آهنرباها و نیز میزان و درصد نقص پی ببریم. هر دو روش معرفی‌شده را می‌توان در مدلی جامع‌تر و دقیق‌تر ترکیب نمود؛ چنین مدلی قادر خواهد بود تا تمامی حالات نقص در آهنربا را با دقت مناسبی از روی داده‌های استخراج‌شده از ولتاژ Back-EMF، پیش‌بینی نماید.

مراجع

- [1] K. Abbaszadeh, F. Rezaee Alam, M. Teshnehlab, "Slot opening optimization of surface mounted permanent magnet motor for cogging torque reduction", Energy Conversion and Management 55, 108–115, 2012.

- [17] Gennadi Y.Sizov, Chia-Chou Yeh, Nabeel A.O. Demerdash, "Magnetic Equivalent Circuit Modeling of Induction Machines under Stator and Rotor Fault Conditions".
- [18] S. Saied, K. Abbaszadeh, A. Tenconi, S. Vaschetto2, "New Approach to Cogging Torque Simulation Using Numerical Functions", IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011.
- [19] Seyed Amin Saied, Karim Abbaszadeh, and Mehdi Fadaie, "Reduced Order Model of Developed Magnetic Equivalent Circuit in Electrical Machine Modeling", IEEE Trans. Mag., vol. 46, No. 7, Jul. 2010.
- [20] E. Radmaneshfar, M. Karrari, "A New Method for Structure Detection of Nonlinear ARX model: ANOVA_BSD", Proceedings of the World Congress on Engineering 2007 Vol I WCE 2007, London, UK, July 2th - 4th 2007.
- [21] Marjan Golob, Boris Tovornik, "Input-output modelling with decomposed neuro-fuzzy ARX model", ELSEVIER Neurocomputing 71, 875-884, 2008.
- [12] Oliver Nelles, "Nonlinear System Identification, From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models", Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Printed in Germany, 2001.
- [13] Hui Penga, Toru Ozakib, Yukihiro Toyodac, Keiji Odac, "Exponential ARX model-based long range predictive control strategy for power plants", Control Engineering Practice 9, 1353-1360, 2001.
- [14] F.D. Kanellos, G.J. Tsekourasc, N.D. Hatziargyriou, "Wind Parks equivalent ARX models for the simulation of power systems with large wind power penetration, using system identification theory", Electric Power Systems Research 81, 707-7, 2011.
- [15] Vlado Ostovic, "Dynamics of Saturated Electric Machines", University of Osijek.
- [16] Min-Fu Hsieh, You-Chaiuan Hsu, "A Generalized Magnetic Circuit Modeling Approach for Design of Surface Permanent-Magnet Machines", IEEE Trans. Industrial Electronics. vol. 59, No.2, February 2012.