**مجله کنترل**
ISSN 2008-8345
جلد ۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۱۸-۹

# 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] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، sara.maroufian@ee.kntu.ac.ir

[۲] دانشیار، دانشکدهٔ 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 شده‌است. 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 فوریه‌ی 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 شده‌است. 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:** Axail Flux PM Motor, Magnetic Equivalent Circuit, ARX Model, Fault Detection.



[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.2.7 ]

## ۱- مقدمه

چگالی بالای گشتاور در موتورهای آهنربای دائم، سبب شده‌است تا برای کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار بگیرند. چگالی بالای شار در فاصله‌ی هوایی و حذف تلفات اهمی از سیستم تحریک از جمله مزایای استفاده از آهنربای دائم در ماشین‌های الکتریکی است. در مقابل گشتاور دندانه‌ای که اغلب در سرعت پایین و گشتاور بار بزرگ رخ می‌دهد و موجب نوسان شفت موتور و ایجاد نویز صوتی می‌گردد، از معایب آن محسوب می‌شود [۱-۲]. از سوی دیگر در ماشین‌های AFPM[1] به دلیل وارد آمدن نیروهای عمودی بزرگ به شفت، کج‌محوری بیشتر رخ می‌دهد[۳]. مشکل دیگر دیامغناطیس شدن کلی یا جزئی آهنربا است که علت آن می‌تواند پیر شدن آهنربا، استرس‌های حرارتی و مکانیکی و عکس‌العمل آرمیچر در حالت اتصال کوتاه باشد. از آنجایی که بخش‌های آسیب‌دیده‌ی آهنربا، قابلیت خود را به طور دائم از دست می‌دهند، وقوع خطا در عمل ابعاد موثر آهنربا را کاهش می‌دهد. علاوه بر این دیامغناطیس شدن آهنربا عملکرد ماشین را با ایجاد اختلال در شار فاصله‌ی هوایی و در نتیجه Back-EMF و گشتاور، متاثر می‌کند. در این زمینه تحقیقات بسیاری انجام شده‌است[۴-۱۱].

در [۴] برای تشخیص دیامغناطیس‌شدگی، از آنالیز فرکانسی متغیرهای موتور استفاده شده‌است. از آنجایی که روش یادشده بر پایه‌ی آنالیز فرکانسی می‌باشد، در شرایط کج‌محوری دینامیک یا هم‌محور نبودن روتور و استاتور که منجر به تولید مولفه‌های فرکانسی مشابه دیامغناطیس‌شدگی می‌گردد، دقت روش باید مجددا مورد بررسی قرار بگیرد. در تحقیق دیگر [۵] نقاط عبور از صفر ولتاژ back-EMF برای تشخیص دیامغناطیس‌شدگی به کار گرفته شده‌است. با وجود اینکه در این روش خطای غیرمتقارن به خوبی شناسایی می‌گردد، لازم است موثر بودن روش در حالت متقارن بررسی شود. در حالت دوم چگالی شار در زیر تمامی قطب‌ها، الگویی یکسان دارد، بنابراین گذر از صفرها، بیان‌گر شرایط غیرعادی نخواهند بود. از سوی دیگر با وجود اینکه این روش در شرایط نامتقارن دقت مناسبی دارد، قادر به تعیین محل خطا نمی‌باشد. در [8] روشی تحلیلی برای تشخیص خطا در آهنربا و تعیین مکان آن ارائه شده‌است که از حل Laplacian/Quasi-Poissonian برای سیستم مغناطیسی بهره می‌برد.

در این مقاله یک مدل دینامیکی خطی با نام ARX [۱۲]، برای تشخیص خطای احتمالی در آهنربای یک ماشین آهنربای دائم شار محوری ارائه شده‌است. محققین زیادی مدل‌های ریاضی گوناگونی را برای شناسایی سیستم‌های مختلف به کار برده‌اند. Peng مدلی نمایی از ARX وابسته به بار را، برای توصیف ویژگی‌های غیرخطی یک نیروگاه حرارتی غیرخطی به کار برد [۱۳]. Kanellos مدل ARX را به مزارع بادی (Wps) اعمال نمود [۱۴]. استفاده از مدل‌های دینامیک (خطی یا غیرخطی) نظیر ARX به فهم بهتر مرتبه و عمق دینامیکی سیستم‌ها کمک می‌نماید. این مدل‌ها سریع و واضح بوده و پارامترهای سیستم واقعی را با دقت مناسبی، تعیین می‌کنند. منظور از واضح بودن[2] مدل آن است که با استفاده از آن می‌توان مرتبه و عمق دینامیکی سیستم را تعیین نمود و به درک مناسبی از ساختار سیستم، رفتار و عملکرد آن دست یافت.

داده‌های مورد نیاز برای آموزش و اعتبارسنجی مدل ARX ارائه‌شده، با استفاده از مدار معادل مغناطیسی موتور MEC [۱۵]، تولید می‌گردند. در مدل MEC، هر آهنربا به صورت عمودی به ده قطعه تقسیم شده‌است. کاهش در شار تولیدی هر قطعه، به معنی نقص در آن قطعه از آهنربا تعبیر می‌گردد. موتور مورد نظر یک موتور چهار قطب بوده که شامل چهار عدد آهنربا بر روی روتور می‌باشد (این موتور در آزمایشگاه ماشین‌های الکتریکی، طراحی و ساخته شده‌است؛ شکل.۱. چندین حالت دیامغناطیس‌شدگی آهنربا به مدل ARX برای آموزش ارائه می‌گردد. در مدل ارائه‌شده، ولتاژ Back-EMF و شار تولیدی از قطعه‌های آهنربا به ترتیب به عنوان ورودی و خروجی در نظر گرفته شده‌اند. از آنجایی که افت شار قطب‌های آهنربا، در هر یک از سه فاز سیم‌پیچی استاتور تاثیرگذار است، بررسی یکی از فازها (مثلا فاز A) برای انجام این مدلسازی مناسب و کافی می‌باشد. پس از این مدل، مدل دیگری برای پیش‌بینی درصد نقص در آهنربا، معرفی می‌شود.



(الف)



(ب)



(پ)

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

[1] Axial Flux Permanent Magnet Machines

[2] Transparency



[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.2.7 ]

صحت مدل مغناطیسی موتور با نتایج عملی تایید شده‌است. 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

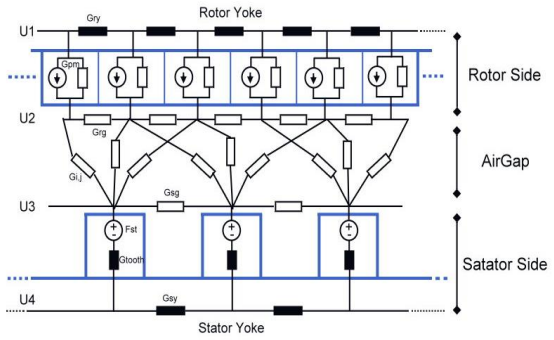
روتور و استاتور موتور مورد نظر در شکل‌های ۱.ب و ۱.پ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، موتور مورد بررسی، یک موتور چهار قطب با سیم‌پیچی توزیع‌شده در شیارهای استاتور می‌باشد. ویژگی‌ها و پارامترهای طراحی موتور در جدول.۱. آمده است.

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، غالبا روش اجزای محدود به کار گرفته می‌شود، با این وجود حجم بالای محاسبات مورد نیاز، مشکل‌ساز خواهد بود. به همین دلیل روش‌هایی با دقت کمتر اما سریع‌تر نظیر روش مدار معادل مغناطیسی، ارائه شده‌اند. بر پایه‌ی ویژگی-های مغناطیسی ماده و با تعیین مسیرهای فضایی شار در ماشین، مداری مغناطیسی ساخته می‌شود. ویژگی‌های میدان مغناطیسی را می‌توان با معادل‌سازی قواعد مدارهای الکتریکی؛ یعنی قوانین ولتاژ و جریان Kirchhoff (KVL و KCL) محاسبه نمود [۱۶]. مدل‌های مدار معادل مغناطیسی نتایجی نسبتا 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 پرمانسی ایجاد شده را نشان می‌دهد. در این شکل، شش تکه از یک آهنربا تصویر شده‌است (هر آهنربا به ده بخش تقسیم گردیده است). پتانسیل‌های گره 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.




شکل.۲. نمای شماتیکی از شبکه‌ی پرمانسی

با نوشتن معادلات پتانسیل گره‌ها 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 دندانه‌های استاتور نوشت. معادلات گره برای اولین سطح پتانسیل واقع در یوغ روتور به صورت زیر خواهد بود:

$$u_{1,1}\left(G_{ry}+G_{ry'}+G_{PM}\right) - u_{1,2}G_{ry} - u_{1,4}.G_{ry'} - u_{2,1}G_{PM} = \varphi_{rs} \qquad (1)$$

$G_{ry}$ ، $G_{ry'}$ ، $G_{PM}$ 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 $\varphi_{rs}$ شار تولید شده توسط هر قطعه از آهنرباست. رابطه‌ی (۱) پتانسیل گره را برای اولین گره از سطح پتانسیلی اول که در یوغ روتور در نظر گرفته شده‌است، نشان می‌دهد. در این رابطه اولین اندیس $u_{1,1}$ نشان‌دهنده‌ی سطح پتانسیلی 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 شده‌است؛ به این ترتیب سطوح پتانسیلی $U_1$ و $U_2$ شامل ۴۰ گره می‌باشد که هر گره با یکی از ۱۰ قطعه-ی هر یک از ۴ آهنربای نصب شده روی روتور، مرتبط خواهد بود. سایر معادلات گره مربوط به این سطح پتانسیلی به صورت مشابه نوشته می-شوند.

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

$$u_{4,1}\left(2G_{sy}\right) - u_{4,15}G_{sy} - u_{4,2}G_{sy} + \left(u_{4,1} - u_{3,1} - F_{st}\right)G_{tooth} = 0 \qquad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، $G_{tooth}$ پرمانس دندانه‌ی استاتور است. برای سطوح پتانسیل مغناطیسی $U_1$ و $U_2$ نیز روش مشابه‌ای اعمال می‌گردد. این سطوح پتانسیل با پرمانس‌های واقع در فاصله‌ی هوایی ماشین در



[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.2.7 ]

ارتباطند؛ بنابراین معادلات گره مرتبط با آنها، با چرخش روتور تغییر خواهد کرد. روند محاسبه‌ی معادلات گره برای یک گره نمونه در سطوح پتانسیل $U_1$ و $U_2$ به صورت زیر می‌باشد:

$$u_{2,1}\left(G_{PM}+G_{rg'}+G_{rg}+\sum_j G^{1}_{2,j}\right) - u_{1,1}G_{PM} - u_{2,3}G_{rg'} - u_{2,2}G_{rg} - \sum_j u_{3,j}G^{1}_{2,j} = -\varphi_{rs} \quad (3)$$

$$u_{3,1}\left(2*G_{sg}+\sum_j G^{1}_{3,j}\right) - u_{3,15}G_{sg} - u_{3,2}G_{sg} - \sum_j u_{2,j}G_{3,j} + (u_{3,1} - F_{st} - u_{4,1})G_{tooth} = 0 \quad (4)$$

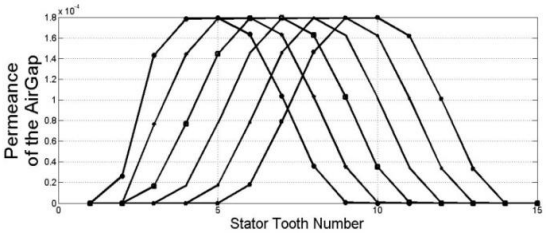
در رابطه‌ی (۳)، $G_{rg'}$ پرمانس نشتی بین دو تکه‌ی آهنربا از دو قطب آهنربای مجاور در داخل فاصله‌ی هوایی است. $G_{rg}$ پرمانس نشتی بین دو تکه‌ی آهنربا از یک آهنربا، در فاصله‌ی هوایی می‌باشد. $G_{sg}$ نیز پرمانس نشتی بین دو دندانه‌ی استاتور در فاصله‌ی هوایی است. $\sum_j G^{1}_{i,j}$ بیان‌گر مجموع پرمانس‌های متصل به گره اول از سطح پتانسیل مغناطیسی iام 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 پرمانسی 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 پرمانسی در هر گام غیرصفر 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]:

$$G_{i,j} = \begin{cases} G_{max} & 0 \le \gamma \le \gamma_t' \ \text{and}\ 2\pi-\gamma_t' \le \gamma \le 2\pi \\ G_{max}\dfrac{1+\cos\pi\frac{\gamma-\gamma_t'}{\gamma_t-\gamma_t'}}{2} & \gamma_t' \le \gamma \le \gamma_t \\ G_{max}\dfrac{1+\cos\pi\frac{\gamma-2\pi+\gamma_t'}{\gamma_t-\gamma_t'}}{2} & 2\pi-\gamma_t \le \gamma \le 2\pi-\gamma_t' \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

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

شکل۳. 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 پرمانسی و نوشتن ماتریس تبدیل نیروی مغناطیسی[1] و ماتریس تبدیل شار[2] [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:

$$\mathcal{F}_t = W''I \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶)، $\mathcal{F}_t$ 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 آمده است. 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].

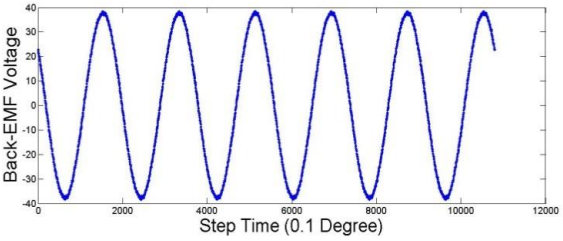
$$\Phi = W'\Phi_t \quad (7)$$

[1] Magnetomotive Force Transform Matrix
[2] Flux Transform Matrix

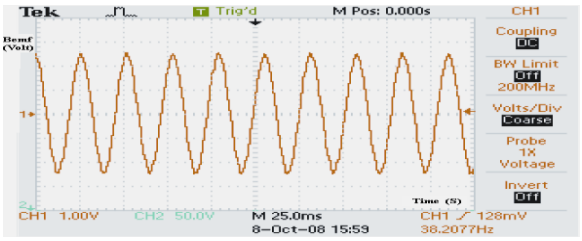


[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.2.7 ]

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 شده‌است، نشان می‌دهد. نتیجه‌ی عملی نشان داده‌شده در شکل.۴.ب. درستی نتیجه‌ی حاصل از مدلسازی به روش مدار مغناطیسی را تایید می‌نماید [۱۸] و [۱۹].



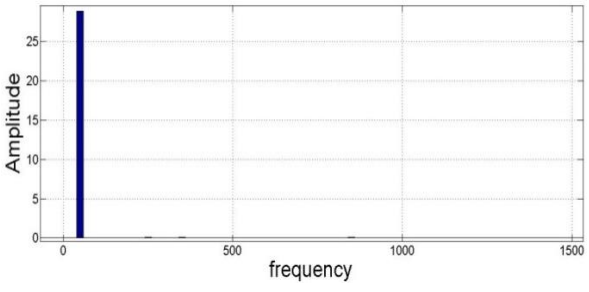

(الف)



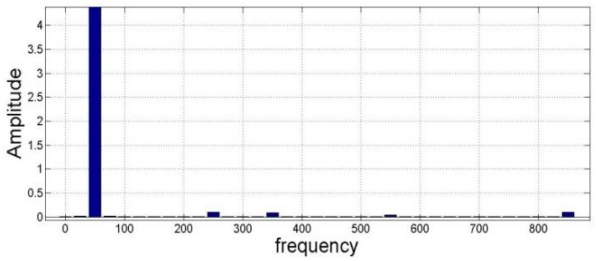

(ب)

شکل.۴. ولتاژ Back-EMF القاشده 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 هارمونیکی 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)



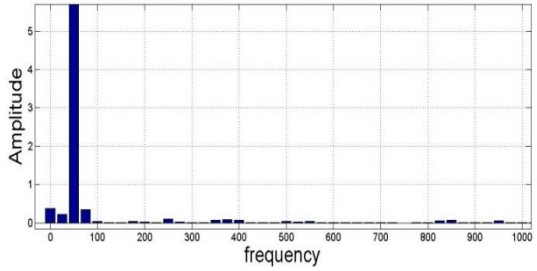

(ب)

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 روتور 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 مجموعا 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 روتور 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 روتور، صفر فرض شده‌است.




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



[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.2.7 ]

همان‌گونه که در شکل.۶ دیده می‌شود، نقص در آهنربا، هارمونیک‌های ولتاژ را تحت تاثیر قرار داده است. دامنه‌ی مولفه‌ی اصلی برابر با ۲۸/۸۹۵۶ است که ۱/۷ درصد کاهش را در مقایسه با حالت سالم نشان می‌دهد. هریک از داده‌های خروجی از این طیف فرکانسی را می‌توان برای شناسایی سیستم به کار برد. این داده‌ها ممکن است شامل دامنه‌ی مولفه‌ی اصلی، دامنه‌ی مولفه‌ی DC و توزیع طیفی ولتاژ Back-EMF در حالت‌های مختلف باشد. هر گونه نقصی در آهنرباها ممکن است مولفه‌ی فرکانسی خاصی را تحت تاثیر قرار داده و یا طیف را از نظر فرکانسی جابجا کند.

## ۳- حالت خطادار

### ۳-۱-مدل ARX

هدف از شناسایی سیستم، ایجاد مدل‌های ریاضی برای سیستم‌ها است[۲۰]. این مدل‌ها به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: مدل‌های استاتیکی و مدل‌های دینامیکی [۱۲]. در سیستم‌های دینامیکی خروجی فعلی نه تنها به ورودی فعلی وابسته است، بلکه از ورودی‌ها و خروجی-های لحظات قبل نیز تاثیر می‌گیرد. رایج‌ترین مدل ورودی-خروجی مدل ARX غیرخطی[1] است [۱۳].

شکل.۷. ساختار یک مدل خطی عمومی را نشان می‌دهد که سایر مدل‌های خطی را با ساده‌سازی آن می‌توان ایجاد نمود[۱۲]. مدل ARX نیز مدل توسعه‌یافته‌ی AR است و با رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

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

$$A(q)y(k)=B(q)u(k)+v(k) \qquad (۹)$$

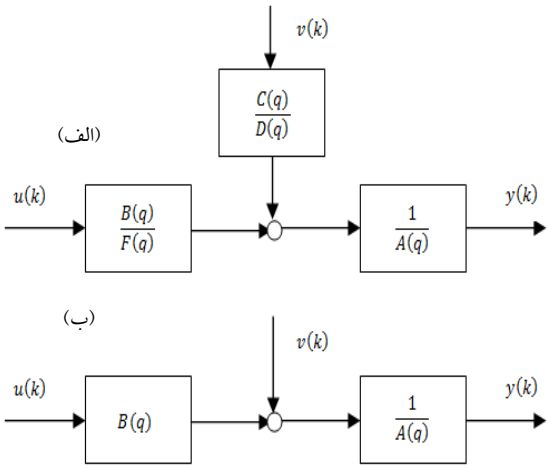
پیش‌بینی‌گر بهینه‌ی ARX[2] را نیز می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

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

و می‌توان آن را به صورت زیر نیز نوشت:

$$\hat{y}(k|k-1)=b_1u(k-1)+\cdots+b_mu(k-m)-a_1y(k-1)-\cdots-a_my(k-m) \qquad (۱۱)$$

عبارت *autoregressive* در اینجا به تابع تبدیل از ورودی $u(k)$ به خروجی $y(k)$ و نیز به تابع تبدیل نویز از $v(k)$ به خروجی $y(k)$ اشاره دارد [12]. $q$ نیز عملگر جابجایی[3] می‌باشد؛ یعنی $q^{-1}x(k)=x(k-1)$. مدل ARX در شکل.۷.ب. نشان داده شده‌است.




شکل.۷. ساختار مدل‌های 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 شده‌است که یک قطعه از ده قطعه آهنربای مربوط به یک قطب آهنربایی روتور، شار ثابتی را که دیگر قطعات تولید می-کنند، ایجاد نمی‌نماید. در کدی که برای مدلسازی موتور آهنربای دائم مورد نظر در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده‌است، این پدیده به وسیله‌ی تابع *'rand'* و در داخل یک حلقه مدل شده است. در هر بار تکرار حلقه، یک عدد تصادفی در بازه‌ای مشخص، به قطعه آهنربایی معلوم نسبت داده می‌شود. تاثیر این الگوی شار دارای اختلال بر روی ولتاژ Back-EMF با استفاده از تبدیل فوریه‌ی گسسته[4]، بررسی می-گردد.

بررسی‌ها نشان داده‌اند که اگر تنها یک یا دو قطعه از ده قطعه آهنربای درنظرگرفته‌شده، مربوط به یک قطب آهنربایی روتور، شاری متفاوت با سایر قطعات تولید نمایند، دامنه‌ی مولفه‌های هارمونیکی ولتاژ Back-EMF تغییر چندانی نخواهند داشت. بدین ترتیب تاثیر عمده بر روی دامنه‌ی مولفه‌ی اصلی دیده خواهد شد. بنابراین برای شناسایی سیستم می‌توان تنها مولفه‌های موثر را در نظر گرفته و از دیگر مولفه‌ها که تاثیر کمتری دارند، چشم‌پوشی کرد که نتیجه‌ی آن سادگی در محاسبات و کاهش حجم آن است. با این وجود با افزایش درصد نقص در شار تولیدی آهنربا، تاثیر آن بر سایر مولفه‌های فرکانسی ولتاژ، قابل توجه خواهد بود؛ بنابراین در مدل دوم که برای تعیین درصد نقص ارائه شده-

[1] Nonlinear Auto Regressive eXogenus (ARX)
[2] Optimum ARX Predictor
[3] Forward Shift Operator
[4] Discrete Fourier Transform



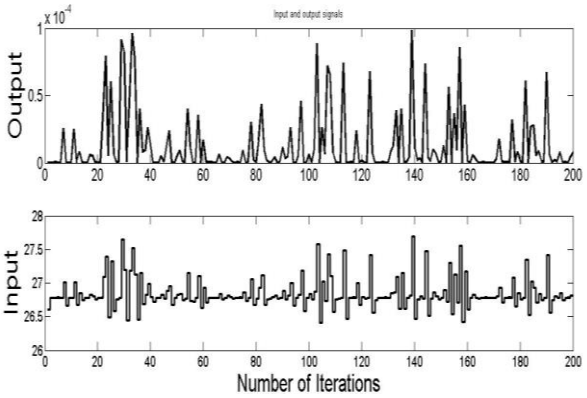
[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.2.7 ]

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 رگرسورهای 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 دامنه-ی 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، دامنه-ی مولفه‌ی اصلی نیز متفاوت خواهد بود.



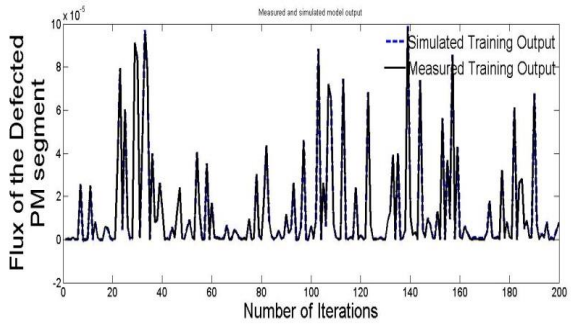

شکل.۸. ورودی و خروجی استفاده شده به عنوان داده‌های آموزش برای مدل ARX. خروجی: شار تصادفی تولیدشده. ورودی: دامنه‌ی مولفه‌ی اصلی ولتاژ Back-EMF

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؛ $n_a = ۲$ ، $n_b = ۲$ و $n_k = ۰$ . 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 فارادی تبعیت می‌کند، در نتیجه ولتاژ در هر لحظه به شار همان لحظه و نیز شار در لحظه‌ی قبل وابسته بوده و سیستم دارای تاخیر نمی‌باشد. بدین ترتیب خروجی فعلی سیستم با خروجی لحظات قبل و نیز ورودی فعلی و لحظات پیشین، رابطه‌ی زیر را خواهد داشت:

$$y(k|k-۱) = b_۱u(k-۱) + b_۲u(k-۲) - a_۱y(k-۱) - a_۲y(k-۲) \quad (۱۲)$$

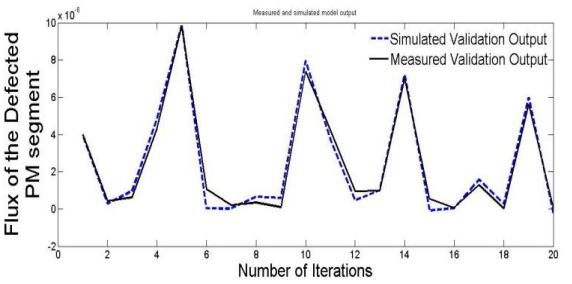
$$A(q) = ۱ - ۱/۴۳۵q^{-۱} + ۰/۴۳۴q^{-۲} \quad (۱۳)$$

$$B(q) = ۰/۰۰۰۱۰۵۳ - ۰/۰۰۰۱۰۵۳q^{-۱} \quad (۱۴)$$




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

لازم است صحت مدل در پیش‌بینی خروجی واقعی، با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی[1] 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.

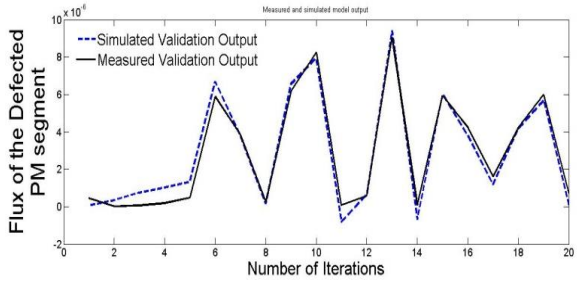



(الف)

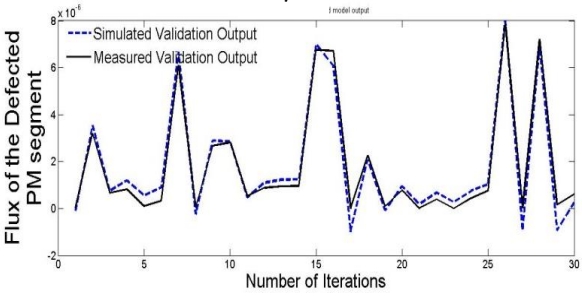
[1] Validation Data



[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.2.7 ]



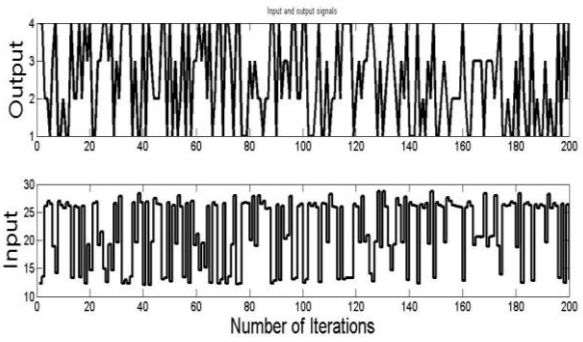

(ب)



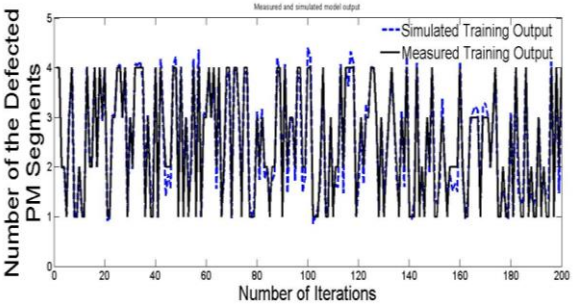

(پ)

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




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

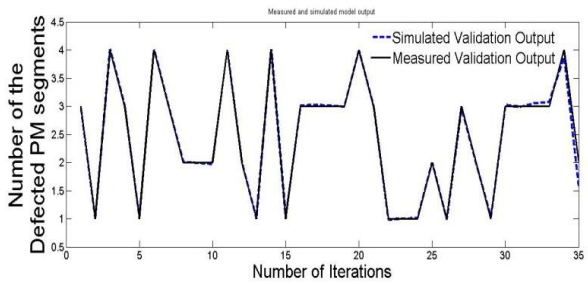
خروجی شبیه‌سازی شده با مدل ARX برای داده‌های آموزشی به میزان ۸۰/۱۲ درصد با خروجی واقعی مطابقت دارد. با این وجود لازم است تا مشابه آنچه برای مدل پیشین انجام شد، صحت مدل ریاضی با استفاده از داده‌های اعتبارسنجی تایید گردد. مدل ARX اعمال شده دارای دینامیک‌هایی از مرتبه‌ی زیر می‌باشد:

$$n_a = ۳۲ , n_b = ۱۰ , n_k = ۰$$

مرتبه‌های دینامیکی مورد نظر به تمامی ورودی‌ها اعمال شده‌اند.

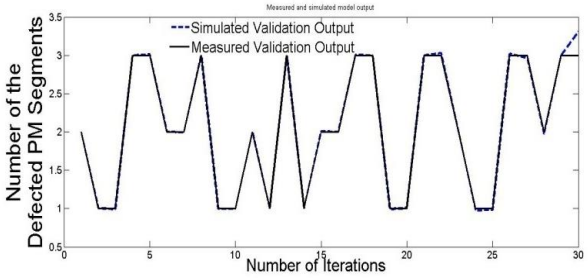
در اینجا نیز مطابق مدل قبل، بسته‌هایی کوچک‌تر از داده، برای بررسی صحت مدل در تخمین خروجی انتخاب شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی به همراه خروجی واقعی در شکل.۱۳. دیده می‌شود.

مدل دیگر، ساختاری برای تشخیص درصد خطای دیامغناطیس شدن آهنرباست. ورودی و خروجی مانند حالت قبل است، با این تفاوت که Back-EMFمدل 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 DCمولفه‌ی 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.ARXاستفاده از مدل




(الف)

[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.2.7 ]




(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 پرمانسی 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 داده-های 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.

[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.

[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.2.7 ]

[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.

[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.

[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09 ]

[ DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.2.7 ]