

An analytical, Numerical and Experimental Study on Demagnetization in Line Start Permanent Magnet Machines

Ali Jabbari ^{a*}, Mohsen Soltani ^a

^a Department of Manufacturing and Production Engineering, Arak University, Arak, 3848177584, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Jabbari A, Soltani M. An analytical, Numerical and Experimental Study on Demagnetization in Line Start Permanent Magnet Machines. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(2):157-173.

 <https://10.52547/masm.3.2.157>

KEYWORDS

Line Start Machine,
Demagnetization,
Induction Motor,
Permanent Magnet Motor,
Analytical Model.

ABSTRACT

Today, electric motors play an important role in energy production in the world. For this reason, it is very important to improve the parameters of the electric motor in order to promote the performance of the motor. One of the ways to improve the performance of electric motors is to use permanent magnets in the structure of induction motors. These types of motors are known as line start motors. The use of permanent magnets eliminates ohmic losses and increases efficiency. Due to the fact that permanent magnetism plays the most important role in these motors, the smallest change in the magnetic properties of them will cause malfunction of the machine. One of the phenomena that changes the properties of the permanent magnet is demagnetization. Although this phenomenon has very destructive effects on machine performance, the design of electric motors is still done without considering this issue. In this paper, a line start motor is designed. This motor is simulated under different demagnetization conditions. The simulation results show that the performance and efficiency of the motor in the demagnetization mode is significantly reduced. Also, the increased current in demagnetized motors causes a further decrease in the magnet's properties. This effect is progressively repeated many times until the property of the applied permanent magnet is lost. Finally, an analytical model for examining and designing electric motors, considering the effects of demagnetization, was presented. The results showed that the use of the analytical model of motor design considering the effects of demagnetization can be a suitable alternative to the use of conventional methods in the design of electric motors.

Extended Abstract

1. Introduction

Today, technology is focused on improving performance by increasing benefits and reducing costs. In recent decades, induction motors with a simple and robust structure and low cost have been mainly used in industry. On the other hand, the very high efficiency and power factor of permanent magnet synchronous motors have been highly regarded in constant speed applications.

In the last three decades, another type of synchronous motor has been presented, which is a combination of an induction motor and a permanent magnet synchronous motor, taking advantage of each in the starting mode and the running mode. Line start motors have a structure similar to induction motors, with the difference that permanent

* Corresponding author. Tel.: +988632625732

E-mail address: a-jabbari@araku.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.3.2.157>

Received: August 07, 2023; Received in revised form: September 06, 2023; Accepted: September 21, 2023

© Author



magnets are used in their rotor. The result of this structure is asynchronous starting and running mode operation at synchronous speed, and as a result, the starting losses are eliminated.

One of the basic problems of permanent magnet motors, including line start motors, is demagnetization. Considering that the obvious advantage of permanent magnet synchronous motors compared to induction motors is higher torque density and much higher efficiency, reducing the magnet flux density in transient operating conditions reduces the efficiency of the motor. If the flux density at any point of the permanent magnet becomes less than the flux density at the elbow point, in this case the new flux density will have a smaller range than the previous one [1]. Usually, in the design algorithm of permanent magnet motors, high reliability is considered for the working point of the magnet in different working conditions in order to prevent demagnetization of the permanent magnet [2].

The first investigations on demagnetization were done in 1990 by Morimoto [3] who investigated the operating point of permanent magnet in a DC machine and determined the load direction limit to prevent demagnetization. Then in 2019 by Mahmoudi Tabar et al [4], this phenomenon was investigated on line start machine. They investigated the parameters affecting the demagnetization of these motors using the finite element method. The study was repeated in a range of different temperatures. In [5], a two-dimensional analytical model was presented for modeling vector potential in surface magnet and internal magnet machines. In [6], a mathematical relationship for the optimal shape of the iron pole in the internal magnet motor was presented and its results were compared with experimental and numerical results. An analytical model for modeling the magnetic field distribution in the internal rotor motor considering multi-piece magnets was investigated [7]. In [8], an analytical model was presented to calculate the magnetic field distribution in permanent magnet switching flux machines. In [9], a mathematical expression was presented to optimize the magnet shape in surface magnet motors. In [10], a new method based on the subdomain method was presented to determine the performance characteristics of the internal magnet machine [11-18].

From the previous researches, it can be concluded that until now, no analytical model has been presented to determine the performance characteristics of the start line machine. Therefore, in this paper, the aim is to investigate the demagnetization in the line start motor analytically, numerically and experimentally and to obtain the governing equations of the sample. The first section includes an introduction of line start machine, the second section will introduce the structure of the proposed line start machine and the third section will be dedicated to the governing equations of the introduced machine. In the fourth section, the obtained results are compared and the last part will be related to the conclusion.

2. The line start machine structure

The schematic of the proposed line start motor can be seen in Figure 1. The rotor of this design includes 48 slots and the stator also includes 36 slots. The design parameters can be seen in Table 1.

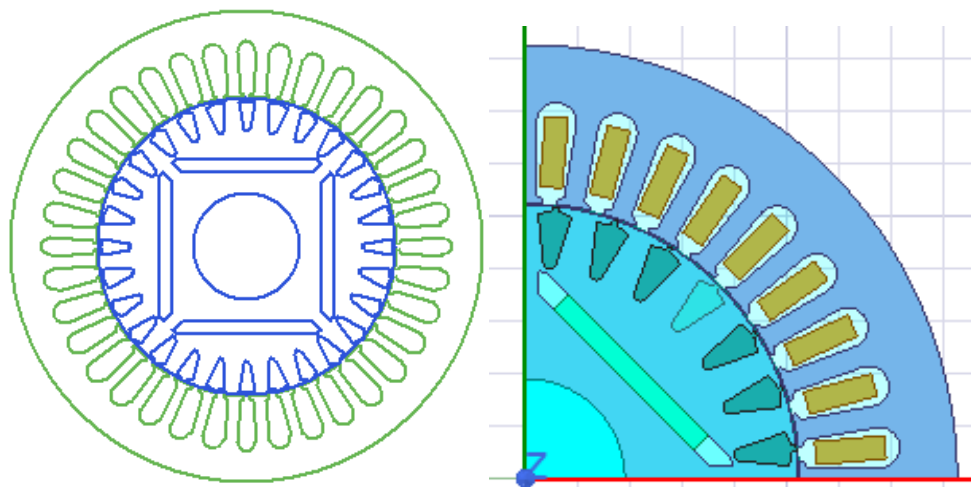


Figure 1. Two dimensional model of the investigated line start motor

Table 1. The line start motor's parameters.

parameter	Value
Rated power (W)	150
Rated speed (rpm)	1500
Voltage (V)	380
Pole number	4
Frequency (Hz)	50
Stator slot number	36
Rotor slot number	48
Slot depth (mm)	20
Stator outer diameter (mm)	160
Stator inner diameter (mm)	102
Rotor outer diameter (mm)	101.3
Rotor inner diameter (mm)	18
Airgap length (mm)	0.5
Winding layers	1
Wire number	200
PM material	NdFeB35
PM dimension	2.5×20
Connection type	Y

The magnet selected in this project is made of NdFeB35, which is one of the common permanent magnets in the market. This magnet is in the form of a cube with a small thickness (2.5 mm). The details of the dimensions and material of the magnet are given in Table 2.

Table 2. The specification of selected permanent magnets

Parameter	Value
Magnet type	NdFeB35
Hc	89000
Br	1.23
μ	1.099
Magnet length	20
Magnet width	20
Magnet thickness	2.5

3. Analytical model

Using the sub-domain method, the magnetic flux density equation in the line start motor is calculated from equation (1).

$$\begin{aligned}
 B_r &= \sum_{2n-1}^{\infty} \left\{ \frac{\mu_0 M_r n p}{\mu_r ((np)^2 - 1)} R_m^{-(np-1)} [r^{np-1} + R_s^{2np} r^{-(np-1)}] \cos(np\theta) \left[\frac{(np-1)(R_m)^{2np} + 2(R_m)^{np-1}(R_r)^{np+1} - (np+1)(R_r)^{2np}}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} (R_s^{2np} - R_r^{2np}) - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} (R_m^{2np} - R_s^{2np}) \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{2np}} \right] \right\} \hat{r} \quad (1) \\
 &+ \sum_{2n-1}^{\infty} \left\{ \frac{-\mu_0 M_r n p}{\mu_r ((np)^2 - 1)} R_m^{-(np-1)} [r^{np-1} - R_s^{2np} r^{-(np-1)}] \sin(np\theta) \left[\frac{(np-1)(R_m)^{2np} + 2(R_m)^{np-1}(R_r)^{np+1} - (np+1)(R_r)^{2np}}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} (R_s^{2np} - R_r^{2np}) - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} (R_m^{2np} - R_s^{2np}) \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{2np}} \right] \right\} \hat{\theta}
 \end{aligned}$$

4. Performance estimation and model evaluation

The finite element analysis method is used to calculate the machine performance. The equipment used in the experimental test is also shown in Figure 3.

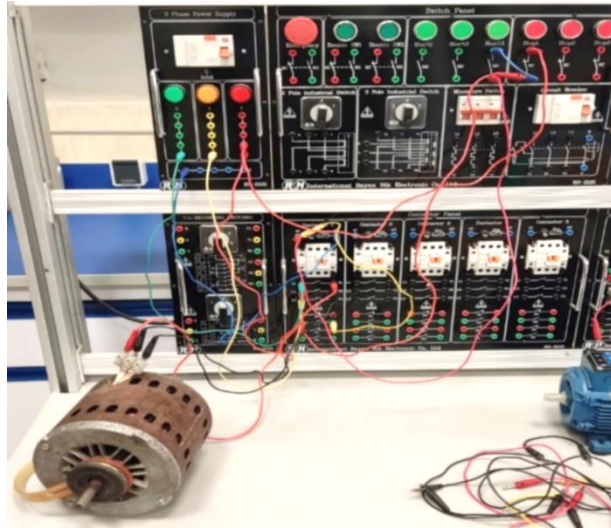


Figure 3. Experimental test setup

The performance characteristics of the line start machine have been analyzed in three analytical, numerical and experimental modes. The graphs of flux density and electric driving force in symmetric and asymmetric states and different percentages of demagnetization are determined. From the comparison of numerical and analytical results for different percentages of demagnetization, it can be seen that the maximum difference between numerical and analytical values for each test sample is about 4%. Therefore, the proposed analytical model is highly accurate.

In Figure 4, the demagnetization is symmetrical and its amount is 50%. In this figure, the air gap flux density waveform curve is compared with the numerical and analytical results. In Figure 5, partial asymmetric demagnetization is considered and its value is 50%, and air gap flux density curves are compared with the analytical and numerical results. In Figure 6, the effect of different percentages of demagnetization on the return electric driving force in the motor is studied. In Figure 7, the comparison of the back-EMF is analyzed by analytical and numerical methods in a healthy motor. In Figure 8, the back-EMF of the motor in the 50% symmetrical demagnetization mode is compared analytically, numerically, and experimentally. In Figure 9, the back-EMF of the motor in 50% asymmetric demagnetization mode is compared analytically, numerically and experimentally.

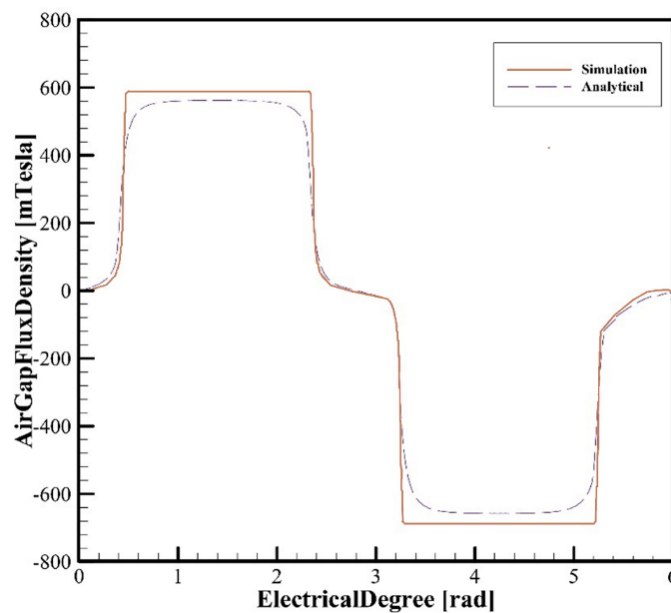


Figure 4. Flux density waveforms at 50% partial demagnetization

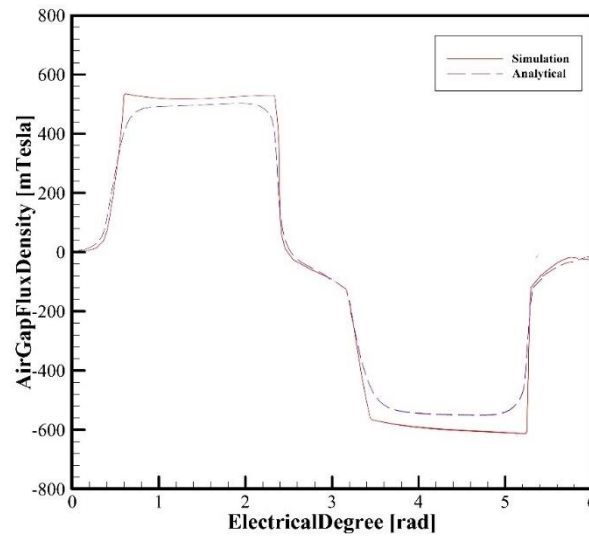


Figure 5. Flux density waveforms at 50% partial asymmetric demagnetization

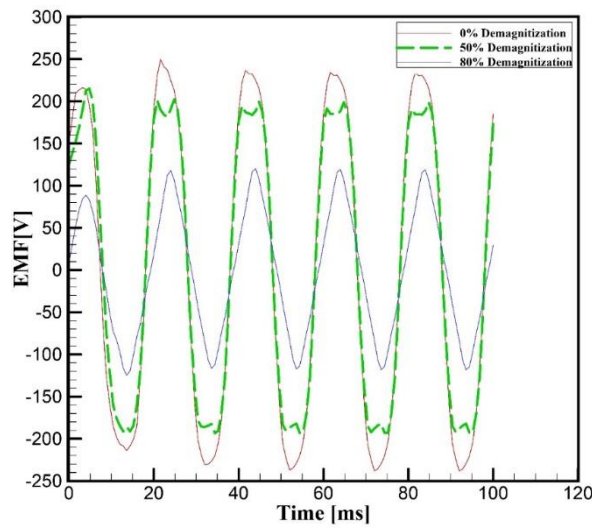


Figure 6. The effect of different demagnetization percentage on back-EMF

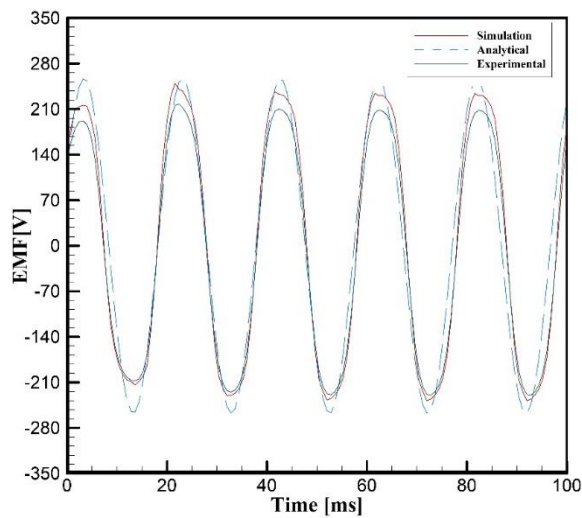


Figure 7. A comparison between analytical and numerical results in healthy motor

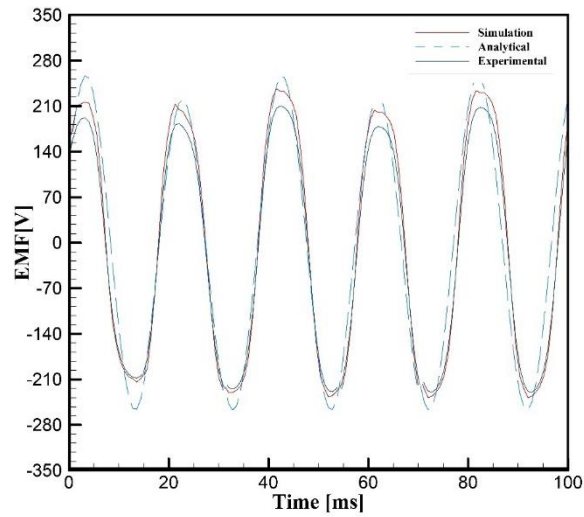


Figure 8. Back-EMF at 50% symmetric demagnetization

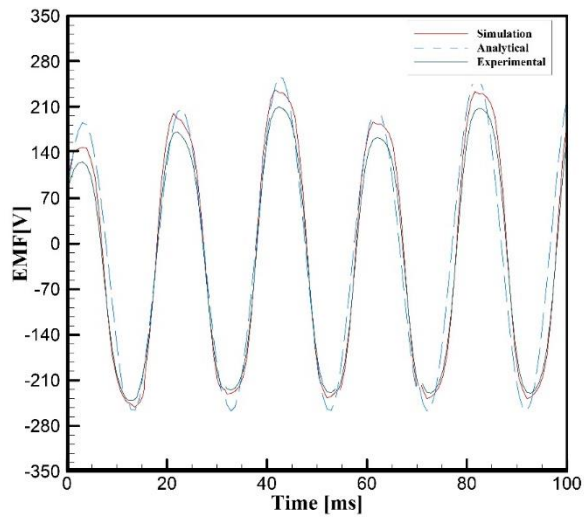


Figure 9. Back-EMF at 50% asymmetric demagnetization



مطالعه تحلیلی، عددی و تجربی پدیده مغناطیس‌زدایی در ماشین مغناطیس دایم راه‌انداز با خط (LSPMM)

علی جباری^{الف*}، محسن سلطانی^ب

^{الف} دانشیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، a-jabbari@araku.ac.ir

^ب دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، soltanimohsen0@gmail.com

چکیده	واژگان کلیدی
<p>امروزه موتورهای الکتریکی، نقش مهمی در تولید انرژی در جهان ایفا می‌کنند. به همین دلیل بهبود پارامترهای موتور الکتریکی به منظور بهبود عملکرد موتور از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از راه‌های بهبود عملکرد موتورهای الکتریکی استفاده از مغناطیس دائم در ساختار موتورهای القایی می‌باشد. این نوع موتورها به‌عنوان موتورهای لاین استارت شناخته می‌شوند. استفاده از مغناطیس دائم باعث حذف تلفات اهمی و به دنبال آن افزایش راندمان می‌شود. با توجه به این‌که مغناطیس دائم مهم‌ترین نقش را در این موتورها دارد، کوچک‌ترین تغییری در خواص مغناطیسی آهنربای استفاده شده، باعث بروز اختلال در عملکرد ماشین خواهد شد. یکی از پدیده‌های مهمی که خواص آهنربای هسته را تغییر می‌دهد، پدیده مغناطیس‌زدایی هست. باوجوداینکه این پدیده اثرات بسیار مخربی بر عملکرد موتور دارد، اما همچنان طراحی موتورهای الکتریکی بدون در نظر گرفتن این مسئله انجام می‌شود. در این مقاله یک موتور لاین استارت طراحی شده است. این موتور تحت شرایط مغناطیس‌زدایی شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند عملکرد و راندمان موتور در حالت مغناطیس‌زدایی کاهش قابل توجهی دارد. همچنین جریان در موتورهای مغناطیس‌زدایی شده افزایش یافته، باعث کاهش بیشتر خواص مغناطیسی آهنربا می‌شود. این اثر به‌صورت پیش‌رونده بارها تکرار شده تا زمانی که خاصیت مغناطیس دائم استفاده شده از بین برود. در نهایت یک مدل تحلیلی برای بررسی و طراحی موتورهای الکتریکی، با در نظر گرفتن اثرات مغناطیس‌زدایی ارائه شد. نتایج نشان داد استفاده از مدل تحلیلی طراحی موتور با در نظر گرفتن اثرات مغناطیس‌زدایی می‌تواند جایگزین مناسبی برای استفاده از روش‌های مرسوم در طراحی موتورهای الکتریکی باشد.</p>	<p>ماشین راه‌انداز خط، مغناطیس‌زدایی، موتور القایی، مغناطیس‌دایم</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰</p>

۱- مقدمه

امروزه تکنولوژی بر روی بهبود عملکرد با افزایش بهره و کاهش هزینه متمرکز شده است. در چندین دهه‌ی اخیر، موتورهای القایی با داشتن ساختاری ساده و مستحکم و هزینه پایین به طور عمده در صنعت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از سویی دیگر بهره و ضریب قدرت بسیار بالای موتورهای سنکرون مغناطیس دائم در کاربردهای سرعت ثابت بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

در سه دهه‌ی اخیر، نوعی دیگر از موتورهای سنکرون ارائه شده است که با ترکیبی از دو موتور القایی و آهنربای دائم از مزایای هر یک در حالت راه‌اندازی و حالت مانا بهره می‌برد. موتورهای لاین استارت دارای ساختاری مشابه با موتور القایی می‌باشند

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۸۶۳۲۶۲۵۷۳۲

آدرس پست الکترونیک: a-jabbari@araku.ac.ir

با این تفاوت که در روتور آن‌ها از آهنربای دائم استفاده می‌شود. نتیجه‌ی این ساختار، راه‌اندازی آسنکرون و عملکرد حالت مانا با سرعت سنکرون و در نتیجه حذف راه‌انداز و تلفات قفسه‌ای است.

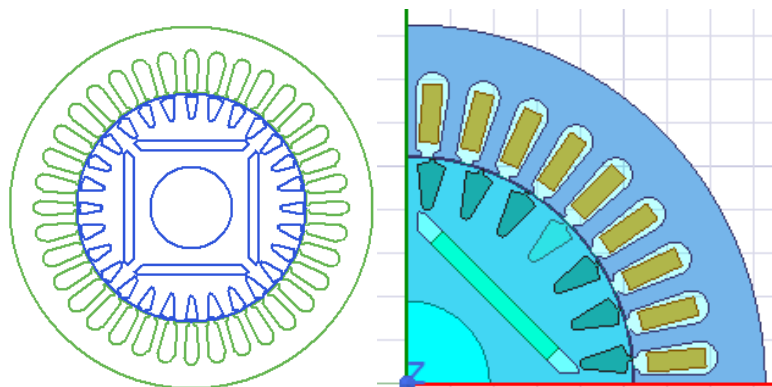
یکی از مشکلات اساسی موتورهای مغناطیس‌دایم از جمله موتور لاین استارت، از بین رفتن خاصیت مغناطیسی آهن‌ربا می‌باشد. با توجه به این‌که مزیت بارز موتورهای سنکرون مغناطیس‌دایم در برابر موتورهای القایی چگالی گشتاور بالاتر و راندمان بسیار بالاتر می‌باشد، کاهش چگالی شار آهن‌ربا در شرایط عملکردی گذرای، موجب کاهش راندمان موتور می‌شود. در صورتی‌که چگالی شار در هر نقطه از آهن‌ربا کمتر از چگالی شار در نقطه زانویی شود در این حالت چگالی شار جدید، دامنه کمتری نسبت به حالت قبل پیدا می‌کند [۱]. معمولاً در الگوریتم طراحی موتورهای مغناطیس‌دایم قابلیت اطمینان بالایی برای نقطه کار آهن‌ربا در شرایط کاری مختلف به جهت جلوگیری از مغناطیس‌زدایی آهن‌ربا در نظر گرفته می‌شود [۲].

اولین بررسی‌ها در مورد مغناطیس‌زدایی در سال ۱۹۹۰ توسط موریموتو^۱ [۳] انجام شد که نقطه کار مغناطیس‌دایم را در یک ماشین DC بررسی کردند و برای جلوگیری از مغناطیس‌زدایی حد مجاز جهت بارگذاری تعیین کردند. سپس در سال ۲۰۱۹ توسط محمودی تبار و همکاران [۴]، این پدیده بر روی موتورهای لاین استارت بررسی شد. آن‌ها با استفاده از روش اجزا محدود پارامترهای مؤثر بر مغناطیس‌زدایی این موتورها را بررسی کردند. مطالعه انجام‌شده در گستره دماهای متفاوت، تکرار شد. در [۵] یک مدل تحلیلی دوبعدی برای مدل‌سازی پتانسیل برداری در ماشین‌های آهن‌ربا سطحی و آهن‌ربا داخلی ارائه شد. در [۶] یک رابطه ریاضی برای شکل بهینه قطب آهنی در موتور آهن‌ربا داخلی ارائه شد و نتایج آن با نتایج تجربی و عددی مقایسه شد. یک مدل تحلیلی برای مدل‌سازی توزیع میدان مغناطیسی در موتور روتور داخلی با ملاحظه آهن‌رباهای چند تکه مورد بررسی قرار گرفت [۷]. در [۸] یک مدل تحلیلی برای محاسبه توزیع میدان مغناطیسی در ماشین‌های شار کلید زنی آهن‌ربای دائم ارائه شد. در [۹] یک عبارت ریاضی برای بهینه‌سازی شکل آهن‌ربا در موتورهای آهن‌ربا سطحی ارائه شد. در [۱۰] یک روش جدید مبتنی بر روش زیر دامنه برای تعیین مشخصات عملکرد ماشین آهن‌ربا داخلی ارائه شد.

از بررسی پژوهش‌های انجام‌شده می‌توان دریافت تاکنون مدلی تحلیلی برای تعیین مشخصات عملکرد ماشین لاین استارت ارائه نشده است. لذا در این مقاله، هدف بررسی مغناطیس‌زدایی در موتور لاین استارت به صورت تحلیلی، عددی و تجربی و به دست آوردن معادلات حاکم بر نمونه می‌باشد. بخش اول شامل مقدمه‌ای از موتورهای لاین استارت، بخش دوم معرفی ساختار ماشین لاین استارت پیشنهادی و بخش سوم به معادلات حاکم بر موتور معرفی شده اختصاص خواهد داشت. در بخش چهارم نتایج به دست آمده مقایسه می‌شوند و بخش آخر مربوط به نتیجه‌گیری خواهد بود.

۲- معرفی ساختار ماشین راه‌انداز خط

شماتیک موتور لاین استارت پیشنهادی را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود. روتور این طرح شامل ۴۸ شیار و استاتور نیز شامل ۳۶ شیار می‌باشند. پارامترهای طرح در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱ مدل دوبعدی موتور لاین استارت پیشنهادی

¹ S. Morimoto

جدول ۱ پارامترهای موتور لاین استارت پیشنهادی

مقدار	پارامتر
۱۵۰	توان نامی (وات)
۱۵۰۰	سرعت نامی (دور بر دقیقه)
۳۸۰	ولتاژ (ولت)
۴	تعداد قطب
۵۰	فرکانس (هرتز)
۳۶	تعداد شیار استاتور
۴۸	تعداد شیار روتور
۲۰	طول شیار (میلی متر)
۱۶۰	قطر خارجی استاتور (میلی متر)
۱۰۲	قطر داخلی استاتور (میلی متر)
۱۰۱/۳	قطر خارجی روتور (میلی متر)
۱۸	قطر داخلی روتور (میلی متر)
۰/۵	طول فاصله هوایی (میلی متر)
۱	تعداد طبقات سیم پیچی
۲۰۰	تعداد سیم در هر شیار
NdFeB35	جنس آهنربا
۲/۵×۲۰	ابعاد آهنربا (mm)
ستاره	نوع اتصال به شبکه

آهنربای انتخاب شده در این طرح از جنس NdFeB35 می باشد که یکی از مغناطیس دائم های مرسوم بازار است. این آهنربا به شکل مکعبی با ضخامت کم (۲/۵ میلی متر) می باشد. جزئیات مشخصات ابعادی و جنس آهنربا در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ مشخصات آهنربای استفاده شده در موتور

مقدار	پارامتر
NdFeB35	نوع آهنربا
۸۹۰۰۰	نیروی بازدارنده مغناطیسی (آمپر بر متر)
۱/۲۳	چگالی شار (تسلا)
۱/۰۹۹	ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی
۲۰	طول آهنربا (میلی متر)
۲۰	عرض آهنربا (میلی متر)
۲/۵	ضخامت آهنربا (میلی متر)

۳- معادلات حاکم بر موتور راه انداز خط پیشنهادی

در این بخش با توجه به هندسه شکل ۱، برای بخش های فاصله هوایی موتور لاین استارت و نواحی مغناطیس دائم معادلات لاپلاس و پواسون نوشته می شوند [۶].

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial S}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial S}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} \right) = \frac{Div(M)}{\mu_r} \quad (2)$$

که در آن μ_r گذردهی مغناطیسی نسبی و S پتانسیل مغناطیسی برداری است. تابع M به صورت چند شرطی تعریف می‌شود:

$$M = \begin{cases} + \frac{B_r}{\mu_0} & -\frac{q\pi}{2p} < \theta < \frac{q\pi}{2p} \\ - \frac{B_r}{\mu_0} & \frac{\pi}{p} - \frac{\pi q}{2p} < \theta < \frac{\pi}{p} + \frac{\pi q}{2p} \\ 0 & -\frac{\pi}{2p} < \theta < -\frac{q\pi}{2p}, \quad \frac{q\pi}{2p} < \theta < \frac{\pi}{p} - \frac{\pi q}{2p}, \quad \frac{\pi}{p} + \frac{\pi q}{2p} < \theta < \frac{3\pi}{2p} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن B_r چگالی شار مغناطیسی پسماند و μ_0 گذردهی مغناطیسی هوا می‌باشد.

معادله (۴) شکل تبدیل شده تابع به رابطه تک شرطی را نشان می‌دهد [۷]:

$$M_r(\theta) = \sum_{2n-1}^{\infty} \left(4 \sin \left(\frac{n\pi q}{2} \right) \cos(np\theta) \frac{B_r}{n\pi\mu_0} \right) \quad (4)$$

با استفاده جداسازی متغیر به صورت M و N در معادله لاپلاس خواهیم داشت:

$$\frac{1}{r} N(\theta) \left(\frac{d}{dr} M(r) \right) + \frac{1}{r^2} M(r) \left(\frac{d^2}{d\theta^2} (N(\theta)) \right) + N(\theta) \left(\frac{d^2}{dr^2} M(r) \right) = 0 \quad (3)$$

معادله پتانسیل مغناطیسی هوا به شکل زیر توسعه می‌یابد:

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} (Cr^{np} + Dr^{-np})(A \sin(n\pi\theta) + B \cos(n\pi\theta)) \quad (4)$$

با در نظر گرفتن شرط صفر بودن انرژی پتانسیل در نواحی خنثی و صفر بودن تابع پتانسیل، معادله پتانسیل در فاصله هوایی

به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_n^{\infty} (Cr^{np} + Dr^{-np})(B \cos(n\pi\theta)) \quad n = 2k - 1 \quad k \in \mathbb{N} \quad (5)$$

با توجه به تعریف تابع M معادله جواب خصوصی به از معادله پواسون به صورت زیر می‌باشد:

$$S = \sum_{2n-1}^{\infty} \left(r \cos(np\theta) \frac{4 \sin \left(\frac{n\pi q}{2} \right) \frac{B_r}{n\pi\mu_0}}{\mu_r [1 - (np)^2]} \right) \quad (6)$$

با بسط جواب عمومی و خصوصی معادله پتانسیل در فاصله هوایی و مغناطیس دائم معادله (۷) به دست می‌آید [۸]:

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} (Cr^{np} + Dr^{-np})(B \cos(n\pi\theta)) \quad \text{for } np \neq 1 \quad (7)$$

$$+ r \cos(np\theta) \frac{4 \sin \left(\frac{n\pi q}{2} \right) \frac{B_r}{n\pi\mu_0}}{\mu_r [1 - (np)^2]}$$

$$S = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} (Cr^{-1} + Dr^{-1})(B\cos(\theta)) + \frac{M_r}{2\mu_r} r \ln r \cos \theta \quad \text{for } np = 1 \quad (8)$$

شدت میدان از گرادیان تابع پتانسیل مغناطیسی به دست می‌آید:

$$H_r = \sum_{2n-1}^{\infty} -\cos(np\theta) \frac{4\sin\left(\frac{n\pi q}{2}\right) \frac{B_r}{n\pi\mu_0}}{\mu_r[1-(np)^2]} - (B\cos(np\theta))(npCr^{np-1} - npDr^{-np-1}) \quad (9)$$

$$H_\theta = \sum_{2n-1}^{\infty} + \frac{1}{r} \sin(np\theta) \frac{4npsin\left(\frac{n\pi q}{2}\right) \frac{B_r}{n\pi\mu_0}}{\mu_r[1-(np)^2]} + \frac{1}{r} (npB\sin(np\theta))(Cr^{np} + Dr^{-np}) \quad (10)$$

چگالی شار از طریق رابطه (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شود [۹].

$$\vec{B}_g = \mu_0 \times \vec{H}_g \quad (11)$$

$$\vec{B}_m = \mu_0 \mu_r \vec{H}_g + \mu_0 \vec{M} \quad (12)$$

با جایگذاری روابط (۹) و (۱۰) در فرمول (۱۱)، چگالی شار در فاصله هوایی (برحسب تابع پتانسیل مغناطیسی) و با جایگذاری این روابط در فرمول (۱۲) چگالی شار مغناطیس دائم به دست می‌آید. در رابطه (۱۳) چگالی شار در فاصله هوایی و در رابطه (۱۴) چگالی شار مغناطیس دائم محاسبه شده است.

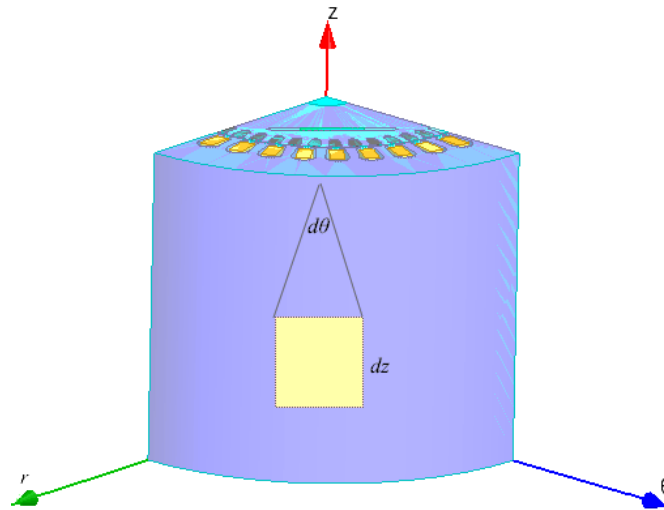
$$B_r = \sum_{2n-1}^{\infty} \left\{ \frac{\mu_0 M_r np}{\mu_r ((np)^2 - 1)} R_m^{-(np-1)} [r^{np-1} + R_s^{2np} r^{-(np-1)}] \cos(np\theta) \left[\frac{(np-1)(R_m)^{2np} + 2(R_m)^{np-1}(R_r)^{np+1} - (np+1)(R_r)^{2np}}{\mu_r + 1 (R_s^{2np} - R_r^{2np}) - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} (R_m^{2np} - R_s^{2np} \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{2np})} \right] \right\} \hat{r} \quad (13)$$

$$+ \sum_{2n-1}^{\infty} \left\{ \frac{-\mu_0 M_r np}{\mu_r ((np)^2 - 1)} R_m^{-(np-1)} [r^{np-1} - R_s^{2np} r^{-(np-1)}] \sin(np\theta) \left[\frac{(np-1)(R_m)^{2np} + 2(R_m)^{np-1}(R_r)^{np+1} - (np+1)(R_r)^{2np}}{\mu_r + 1 (R_s^{2np} - R_r^{2np}) - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} (R_m^{2np} - R_s^{2np} \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{2np})} \right] \right\} \hat{\theta}$$

$$B_r = \sum_{2n-1}^{\infty} \left\{ \left(\frac{(np - \frac{1}{\mu_r})(R_m)^{2np} + (1 + \frac{1}{\mu_r})(R_m)^{np-1}(R_r)^{np+1} - (np + \frac{1}{\mu_r})(R_s)^{2np} - (1 - \frac{1}{\mu_r})\left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{np+1}(R_s)^{2np}}{\mu_r + 1 (R_s^{2np} - R_r^{2np}) - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} (R_m^{2np} - R_s^{2np} \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{2np})} \right) \right. \\ \left. \times \frac{\mu_0 M_r np}{((np)^2 - 1)} R_m^{-(np-1)} [r^{np-1} + R_r^{2np} r^{-(np-1)}] \cos(np\theta) + \frac{\mu_0 M_r np}{((np)^2 - 1)} \left(\frac{R_r}{r}\right)^{np+1} \cos np\theta \right. \\ \left. + \frac{\mu_0 M_r np}{((np)^2 - 1)} \cos np\theta \right\} \hat{r} \quad (14)$$

$$+ \left\{ \left(\frac{(np - \frac{1}{\mu_r})(R_m)^{2np} + (1 + \frac{1}{\mu_r})(R_m)^{np-1}(R_r)^{np+1} - (np + \frac{1}{\mu_r})(R_s)^{2np} - (1 - \frac{1}{\mu_r})\left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{np+1}(R_s)^{2np}}{\mu_r + 1 (R_s^{2np} - R_r^{2np}) - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} (R_m^{2np} - R_s^{2np} \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{2np})} \right) \right. \\ \left. \times \frac{-\mu_0 M_r np}{((np)^2 - 1)} R_m^{-(np-1)} [r^{np-1} + R_r^{2np} r^{-(np-1)}] \sin(np\theta) + \frac{\mu_0 M_r np}{((np)^2 - 1)} \left(\frac{R_r}{r}\right)^{np+1} \sin np\theta \right. \\ \left. + \frac{\mu_0 M_r np}{((np)^2 - 1)} \sin np\theta \right\} \hat{\theta}$$

با توجه به این که میدان مغناطیسی در موتور به صورت غیر یکنواخت می‌باشد برای محاسبه شار نیاز به انتگرال دوگانه از سطح می‌باشد. امان سطحی جانبی در نظر گرفته شده مطابق شکل ۲ می‌باشد:



شکل ۲ تخصیص امان سطحی جانبی موتور لاین استارت

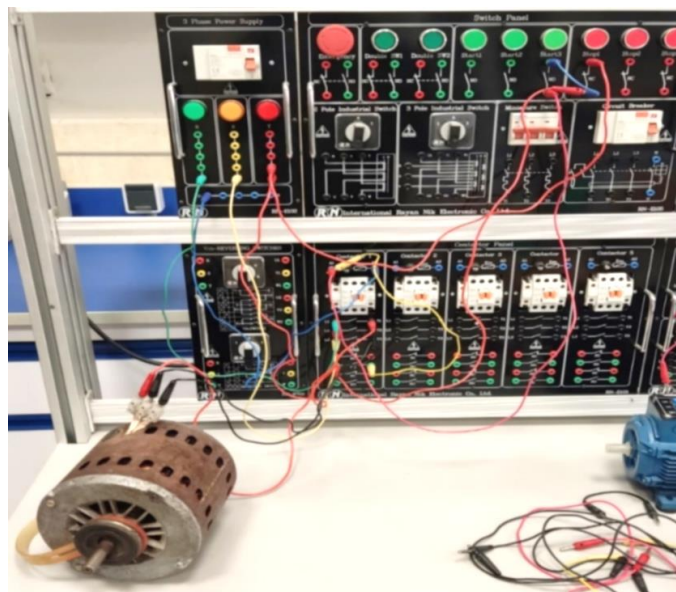
با بسط رابطه شار مغناطیسی و نیروی محرکه رابطه (۱۵) و (۱۶) به دست می‌آید:

$$\Phi = 2rLA_n \sum \frac{1}{np} \sin(np(\theta + \omega t)) \quad (15)$$

$$\epsilon = 2rLA_n \sum \frac{np\omega}{np} \cos(np(\theta + \omega t)) \quad (16)$$

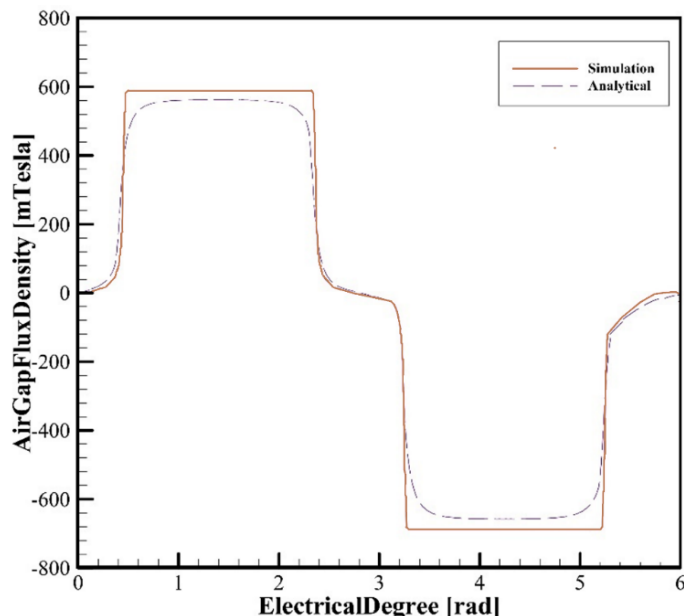
۴- محاسبه عملکرد و ارزیابی مدل

برای محاسبه عملکرد موتور از روش تحلیل اجزای محدود استفاده شده است. تجهیزات مورد استفاده در آزمایش تجربی نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.



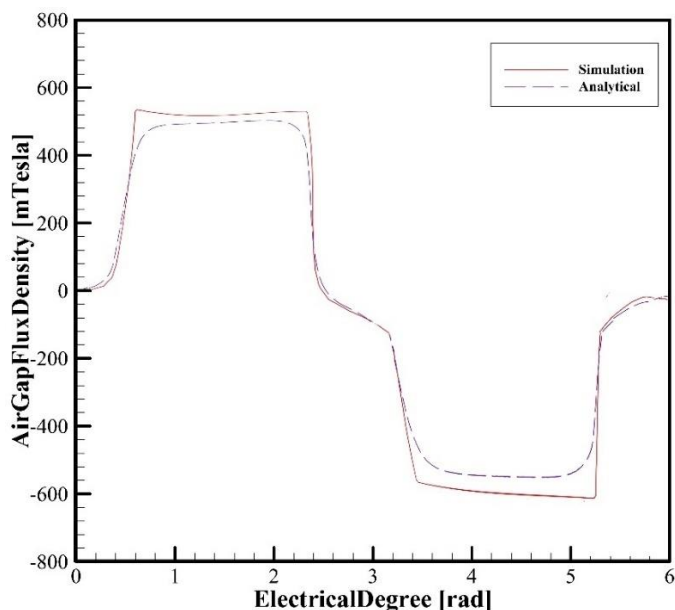
تست تجربی موتور لاین استارت. Error! No text of specified style in document. شکل

نتایج موتور در سه حالت تحلیلی، عددی و تجربی بررسی شده‌اند. نمودارهای چگالی شار و نیروی محرکه الکتریکی در حالت‌های متقارن و غیرمتقارن و درصدهای متفاوت مغناطیس زدایی در ادامه آمده است. در شکل ۴، مغناطیس زدایی به صورت متقارن و میزان آن ۵۰ درصد لحاظ شده است. در این شکل منحنی شکل موج چگالی شار فاصله هوایی با دو روش عددی و تحلیلی مقایسه شده است.

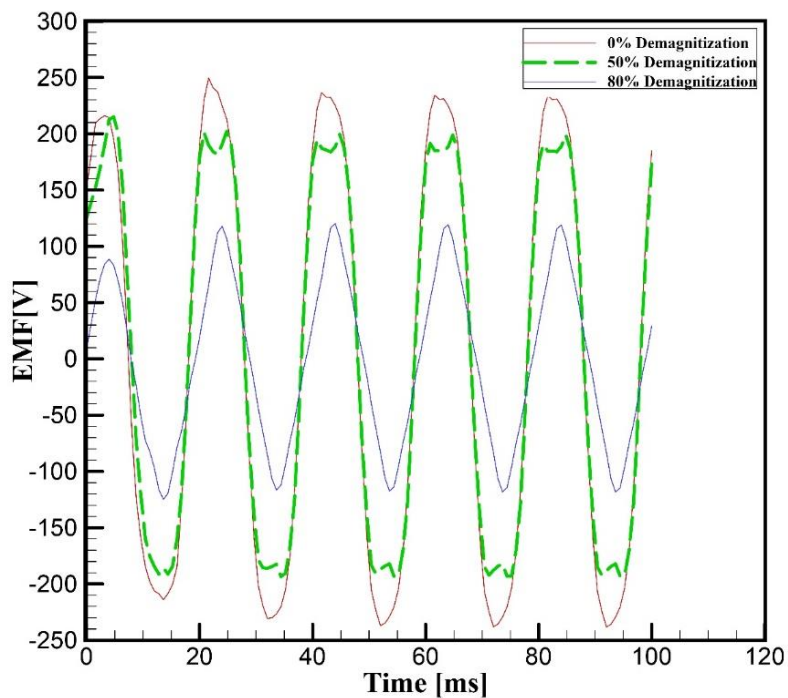


شکل ۴ چگالی شار در مغناطیس زدایی جزئی متقارن ۵۰ درصد

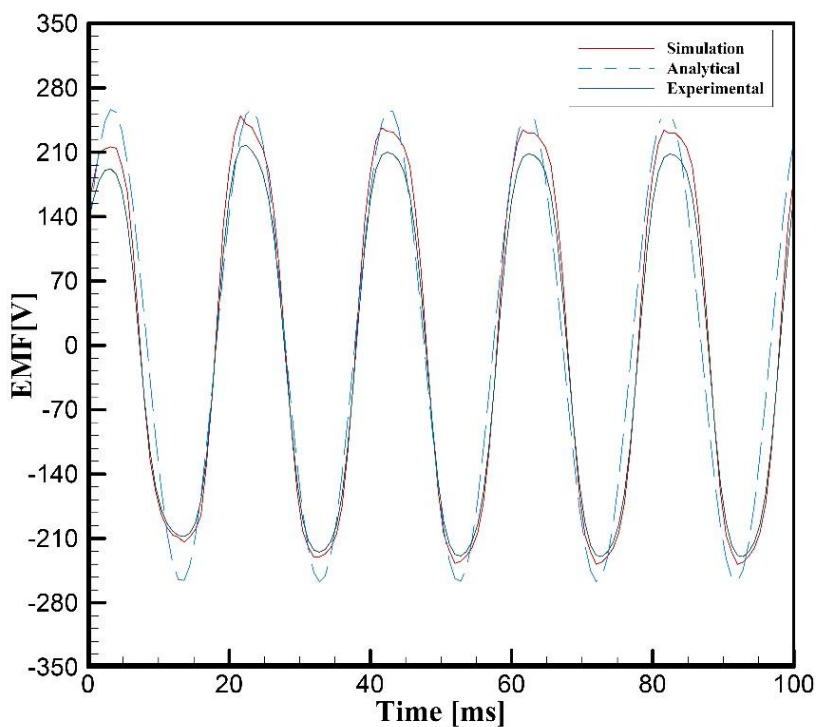
در شکل ۵ مغناطیس زدایی غیر متقارن جزئی در نظر گرفته شده است و مقدار آن ۵۰ درصد لحاظ شده و منحنی‌های چگالی شار فاصله هوایی با دو روش تحلیلی و عددی مقایسه شده است. در شکل ۶ تأثیر درصدهای گوناگون مغناطیس زدایی بر نیروی محرکه الکتریکی برگشتی در موتور مطالعه شده است. در شکل ۷ مقایسه نیروی محرکه برگشتی به روش تحلیلی و عددی در موتور سالم بررسی شده است.



شکل ۵ چگالی شار در مغناطیس زدایی غیرمتقارن ۵۰ درصد



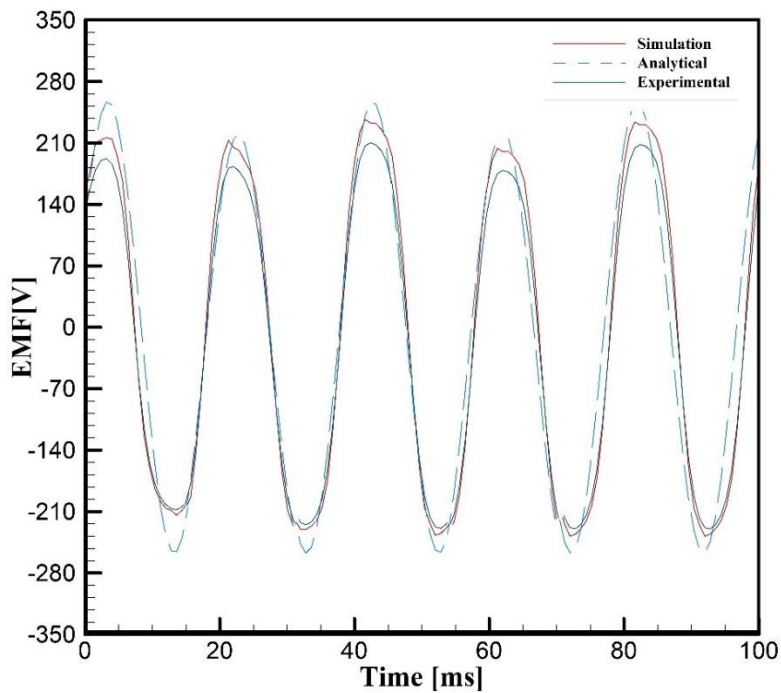
شکل ۶ تأثیر درصدهای گوناگون مغناطیس زدایی بر نیروی محرکه الکتریکی برگشتی در موتور



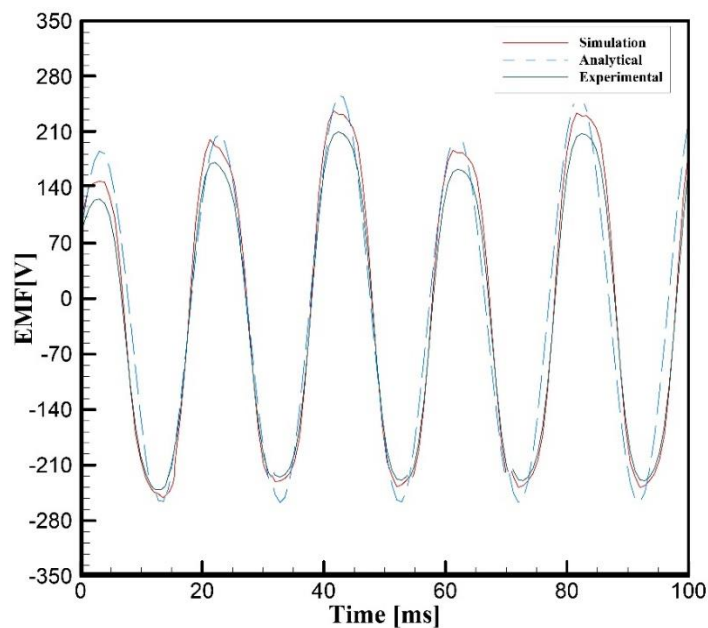
شکل ۷ مقایسه نیروی محرکه برگشتی به روش تحلیلی و عددی در موتور سالم

در شکل ۸ نیروی محرکه برگشتی موتور در حالت مغناطیس زدایی متقارن ۵۰ درصد به روش تحلیلی، عددی و تجربی مقایسه شده‌اند. در شکل ۹ نیروی محرکه برگشتی موتور در حالت مغناطیس زدایی نامتقارن ۵۰ درصد به روش تحلیلی، عددی و تجربی مقایسه شده‌اند. از مقایسه نتایج تحلیلی و عددی برای درصدهای مختلف مغناطیس زدایی می‌توان دریافت که حداکثر

اختلاف مقدار عددی و تحلیلی برای هر نمونه آزمایش حدود ۴ درصد است. لذا مدل تحلیلی پیشنهادی از دقت بالایی برخوردار است.



شکل ۸ نیروی محرکه برگشتی موتور در حالت مغناطیس زدایی متقارن ۵۰ درصد



شکل ۹ ولتاژ محرکه موتور در حالت مغناطیس زدایی نامتقارن ۵۰ درصد

در مغناطیس زدایی ۸۰ درصد، همانطور که ملاحظه می‌شود، بیشینه اختلاف روش تحلیلی و عددی حدود ۷ درصد است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد مغناطیس زدایی، چگالی شار کاهش می‌یابد. در مغناطیس زدایی متقارن، دامنه نمودار چندان دستخوش تغییر قرار ندارد. اگر مغناطیس زدایی بر اثر عوامل درونی موتور مانند جریان و غیره رخ دهد، معمولاً

مغناطیس‌زدایی به صورت کامل می‌باشد. اما در صورتی که مغناطیس‌زدایی بر اثر عوامل محیطی مثل ضربه و گرما و غیره رخ دهد، ممکن است به صورت جزئی باشد. در نمودار مغناطیس‌زدایی ۵۰ درصد، واضح است که به دلیل کاهش خاصیت مغناطیسی آهنرباها، چگالی شار کاهش یافته است. بیشترین اختلاف در نتایج نیز حدود ۶ درصد است. ملاحظه می‌شود که هر چه درصد مغناطیس‌زدایی بیشتر شود، شکل تناوب نمودار اختلاف بیشتری نسبت به حالت اصلی پیدا می‌کند. در حالت ۸۰ درصد مغناطیس‌زدایی، نمودار از حالت منحنی خارج شده و به شکل خطوط شکسته با شیب تند درآمده است. در این وضعیت علاوه بر کاهش شار و سایر مؤلفه‌های تأثیرگذار در موتور، عملکرد نرم موتور را نیز تحت تأثیر قرار داده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مغناطیس‌زدایی به‌عنوان یکی از پدیده‌های مخرب در موتورهای الکتریکی که در ساختار آن‌ها مغناطیس‌دائم وجود دارد بررسی شد. این پدیده باعث تغییر در عملکرد موتور الکتریکی می‌شود و بسیاری از مؤلفه‌های موتور را کاهش می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌ها و شبیه‌سازی نشان داد در اثر عوامل محیطی و داخلی، مغناطیس‌دائم آسیب می‌بیند و مقداری از خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد. این اتفاق منجر به تغییر در شکل موج‌ها و نمودارهای موتور الکتریکی می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در قسمت قبل و صحت‌سنجی نتایج در تحلیل مدل و معادلات حاکم بر مدل، میتوان مقادیر مغناطیس‌زدایی و تأثیر آن بر پارامترهای عملکردی موتور رو قبل از طراحی مورد بررسی قرار داد.

Authorship Contribution Statement

Dr. Ali Jabbari



Biography: Ali Jabbari was born in Shazand, Iran, in 1980. He received the B.Sc degree from the "Iran University of Science and Technology" in 2002 and his MSc and PhD degrees both in Mechanical Engineering from "Mazandran University" in 2004 and 2009, respectively, with a focus on the design and the optimization of rushless DC permanent magnet machines for direct drive applications. He is currently an Assistant Professor with the Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran. Since 2014, he has been the Head of "Gearless Wind Turbine Project" team

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Validation, Data Curation, Project administration, Supervision, Writing, Reviewing and Editing, Resources.

Mohsen Soltani



Biography: Mohsen Soltani was born in Ahvaz, Iran, in 1995. He received the B.Sc degree from the "Birjand University" in 2017 and his MSc degrees in Mechanical Engineering from "Arak University" in 2022, respectively, with a focus on the Demagnetization phenomenon in Line Start Permanent Magnet Machine (LSPMM). He presented his thesis in the field of analysis and simulation of Line Start Permanent Magnet Machine in 2022

Contribution Statement: Investigation, Visualization, Formal analysis, Validation, Original draft preparation.

۶- مراجع

- [1] McFarland JD, Jahns TM. Investigation of the rotor demagnetization characteristics of interior PM synchronous machines during fault conditions. IEEE Transactions on Industry Applications. 2013;50:2768-75.
- [2] Barcaro M, Bianchi N, Magnussen F. Faulty operations of a PM fractional-slot machine with a dual three-phase winding. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010;58:3825-32.

- [3] Morimoto S, Takeda Y, Hirasa T, Taniguchi K. Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1990;26:866-71.
- [4] Mahmouditabar F, Vahedi A. RESEARCH PAPER Irreversible Demagnetization analysis of the Line Start Permanent Magnet Motor Using Time Stepping Finite Element Method.
- [5] Tavakoli G, Jabbari A, Sheykhosslami MR. A semi-analytical, numerical and experimental study on performance characteristics of a novel hybrid-rotor CVT magnetic gearbox. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2023;237:1994-2005.
- [6] Jabbari A. The Effect of Dummy Slots on Machine Performance in Brushless Permanent Magnet Machines: An Analytical, Numerical, and Experimental Study. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*. 2022;18.
- [7] Jabbari A. Semi-Analytical Modeling of Electromagnetic Performances in Magnet Segmented Spoke-Type Permanent Magnet Machine Considering Infinite and Finite Soft-Magnetic Material Permeability. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*. 2021;17.
- [8] Jabbari A, Dubas F. The Effect of Magnet Width and Iron Core Relative Permeability on Iron Pole Radii Ratio in Spoke-Type Permanent-Magnet Machine: An Analytical, Numerical and Experimental Study. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2021;17:1802.
- [9] Jabbari A, Dubas F. An improved model for performances calculation in spoke-type permanent-magnet machines considering magnetization orientation and finite soft-magnetic material permeability. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 2020;39:1299-314.
- [10] Jabbari A, Taheri H, Ghadimi AA. An analytical, numerical and experimental study on performance characteristics in a novel Vernier permanent magnet machine. *Electrical Engineering*. 2020;102:2369-79.
- [11] Jabbari A, Dubas F. A New Subdomain Method for Performances Computation in Interior Permanent-Magnet (IPM) Machines. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*. 2020;16.
- [12] Jabbari A, Dubas F. Analytical Modelling of Magnetic Field Distribution in Spoke Type Permanent Magnet Machines. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. 2020;17:141-51.
- [13] Jabbari A. Analytical modeling of magnetic field distribution in multiphase H-type stator core permanent magnet flux switching machines. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. 2019;43:389-401.
- [14] Jabbari A. An analytical study on iron pole shape optimization in high-speed interior permanent magnet machines. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. 2020;44:169-74.
- [15] Jabbari A. An analytical expression for magnet shape optimization in surface-mounted permanent magnet machines. *Mathematical and Computational Applications*. 2018;23:57.
- [16] Jabbari A. Analytical modeling of magnetic field distribution in inner rotor brushless magnet segmented surface inset permanent magnet machines. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2018;14:259-69.
- [17] Jabbari A. Exact analytical modeling of magnetic vector potential in surface inset permanent magnet DC machines considering magnet segmentation. *Journal of Electrical Engineering*. 2018;69:39-45.
- [18] Jabbari A. 2D analytical modeling of magnetic vector potential in surface mounted and surface inset permanent magnet machines. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2017;13:362-73.