



Optimizing and manufacturing a 2500 kW electric motor of Khuzestan Steel Company using reverse engineering method

Mahmoud Yousefian ¹, Abbas Shiayan ², Alireza Rahimi ³, MirMohsen Mashhadi Zadeh ⁴

¹Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

²Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

³Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

⁴Department of Electrical Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 22.01.2025

Revised: 25.04.2025

Accepted: 30.08.2025

Keyword:

High-Voltage Electric Motor,
Reverse Engineering,
Optimization, Bearing Cooling,
Genetic Algorithm

*Corresponding Author:

Mahmoud Yousefian

Email: myousefian@tvu.ac.ir

ABSTRACT

More than 90% of industrial electric motors are three-phase induction motors. These motors have several advantages over DC and synchronous motors, including low maintenance requirements, cost-effectiveness, simple construction, mechanical robustness, and the ability to generate starting torque. Therefore, optimizing their design and manufacturing is crucial as they constitute the majority of electric loads in industry. The application of modern techniques, particularly reverse engineering, can significantly enhance the performance and lifespan of electric motors. This article investigates the optimization of the manufacturing of a three-phase induction motor for the Khuzestan Steel Company using reverse engineering, based on the knowledge and expertise of the project team. The electric motor in question is 8-pole and 2500 kW for operating at 6600 volts and 50 Hz. All stages of development, from initial specification gathering to construction and final testing, were performed using reverse engineering methods. After validating the calculations and comparing the design parameters and limitations with existing models, adjustments were made at each stage to improve insulation, dimensional tolerances, and cooling performance. To enhance the bearing cooling system, a water-circulation cooling unit was designed and integrated, allowing for adjustable temperature and flow rate. The results indicated that the newly developed motor outperforms the original sample in certain aspects, including reduced cost and operating temperature, making it a competitive alternative.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Unlike copying, in the reverse engineering method, it is necessary to have a complete understanding of the design and performance technology of the system so that if there is a need to improve the performance of the system components, the necessary measures can be taken. In this method, all parts and components of a set are carefully examined, and in addition to the dimensions and size, and material, the application and appearance of all components are examined. Understanding the cause-and-effect relationship increases the capabilities of reverse engineering and can improve the entire production process. By reviewing the available sources, it can be said that the general steps for reverse engineering a device include seven steps: taking initial specifications, complete disassembly, measuring parts and modeling, material analysis, identifying mechanisms, necessary changes and modifications, and preparing technical information for producing a new and similar product.

Methodology

When designing and manufacturing a three-phase induction electric motor, before manufacturing a real model, it is necessary to provide a suitable mathematical model for the motor and use it to calculate the electrical and mechanical parameters of the motor. Optimization algorithms are often used. In this case, all parameters will be calculated according to the design goals. For this purpose, the objective function is first determined. If the goal is to optimize production and operating costs, $f(x)$ is the cost function that must be minimized.

$$f(x) = \min (\text{Cost function}) \quad (1)$$

Figure 1 shows the steps of the genetic algorithm for optimal electric motor design.

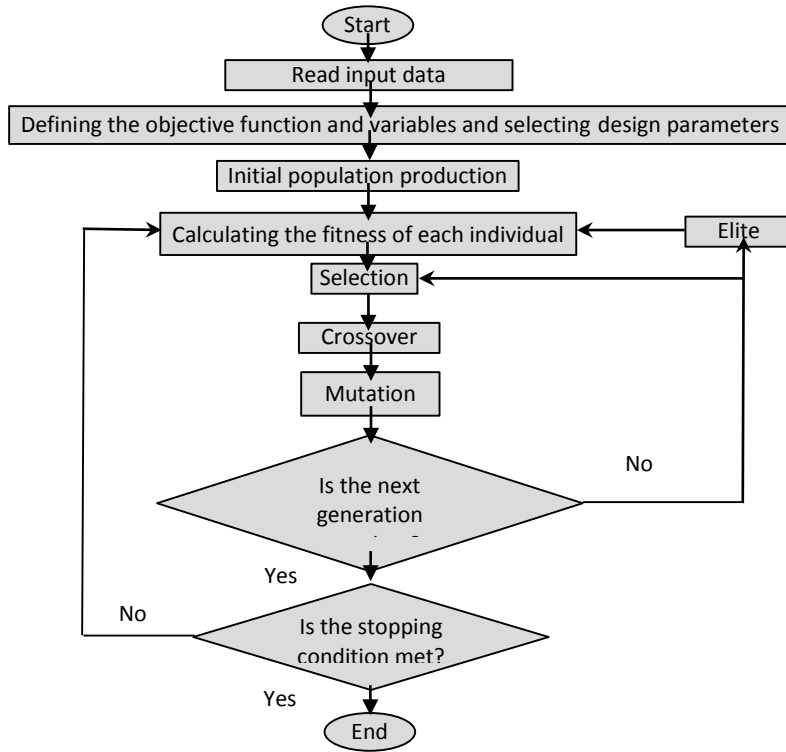


Figure 1. Process of implementing the genetic algorithm.

The main design issues are: frame design, design of the required ventilation type, design of the shaft dimensions and bearing system, design of the magnetic core, design of the winding and insulation system. Each of these issues has its own complexity. Due to magnetic saturation and non-uniformity of air gap length, the magnetic core design is the most difficult part of the design work. The operating characteristics of electric machines are highly dependent on magnetic materials. Simultaneously with the increase in flux, magnetic saturation begins, and as a result, the value of magnetic permeability decreases with increasing flux. Therefore, magnetic saturation can significantly affect the operating characteristics of the machine. Magnetic saturation takes the complex magnetic design and analysis out of the linear and easy state and turns it into a nonlinear and transformative problem. In a real design, it is necessary to consider the Carter coefficients. The Carter coefficients depend on the ratio of the slot opening to the air gap length. Due to the presence of slots, the effective length of the air gap increases according to equation (2).

$$l_{ge} = k_g \cdot l_g \quad (2)$$

After validating the design constraints and parameters, manufacturing steps have been taken for each stage. Table 1 shows the technical specifications of the requested electric motor.

Table 1. Technical specifications of the requested electric motor for reverse engineering.

parameter	value/description	parameter	value/description
Rated output	: 2500 KW	Product group	: HV IM. with SR.
Rated speed	: 744 min-1	Standard	: IEC
Power factor	: 0.80	Frequency fluctuation	: $\pm 2\%$
Rated frequency	: 50 Hz	starting current / rated current	: 1.5
Number of poles	: 8	Thermal class (stator / rotor)	: F / F
Stator/Rated voltage	: 6.6 KV	Altitude	: <1000m above sea level
Rated current	: 285 A	Moment of inertia (motor-rotor)	: 465 Kg.m2
Connection	: Y	Type of construction	: IM B3 / IM1001
Rotor/Rated voltage	: 1315 V	Degree of protection	: IP 54
Rated current	: 1155 A	Cooling method	: IC 37W
Connection	: Δ	Total weight	: 14100Kg
Voltage fluctuation	: $\pm 5\%$	Bearing design	: Sleeve bearing
Ambient temperature	: 55 oC	Direction of rotation	: CW

Results and discussion

The results of static and no-load tests show that the manufactured electromotor has similar values to the original sample and is in a better condition in a number of cases. Figure 2 shows the motor produced.



Figure 2. Electric motor produced.

The results of the full load test at constant voltage and output power for the fabricated electromotor compared to the existing sample electromotor are presented in Table 3.

Table 3. Full load test results of the fabricated electric motor compared to the available electric motor.

Current (A)	Power Factor	Speed (rpm)	Input (kW)Power	Efficiency (%)	Parameter
284.7	0.806	745	2617.5	95.5	Full load test of manufactured electric motor
285.2	0.804	744	2620.4	95.4	Full load test of available electric motor

The results in Table 4 show that the constructed electric motor is in a better condition compared to the original sample and shows a 0.1% increase in efficiency, a 0.1% decrease in power received at a constant output load, and a 0.25% increase in power factor.

Conclusion

In this paper, the optimization and construction of a three-phase induction electromotor related to Khuzestan Steel Company was investigated by the reverse engineering method. The electromotor had the following specifications: 8 poles, 2500 kW, 6600 V, and 50 Hz. Controlling the design limitations, confirming the design parameters related to the stator and rotor windings simultaneously with the reverse engineering method, and improving the bearing cooling performance are important innovations of this paper. Adding the designed water-cooled system reduced the bearing oil temperature by approximately 14%. The practical results demonstrated that the produced electric motor had better values in some parameters compared to the original model including increased insulation resistance, reduced no-load losses, improved noise and vibration, reduced total cost by 35%, and reduced operating temperature of the electric motor by approximately 4%, and is therefore competitive with the original model.



بهینه‌سازی و ساخت الکتروموتور ۲۵۰۰ کیلووات شرکت فولاد خوزستان به روش مهندسی معکوس

محمود یوسفیان^۱، عباس شیعیان^۲، علی‌رضا رحیمی^۳، میرمحسن مشهدی‌زاده^۴

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

۳- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

۴- گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

کلید واژگان:

الکتروموتور فشار قوی، مهندسی معکوس، بهینه‌سازی، کولینگ یاتاقان، الگوریتم ژنتیک

*نویسنده مسئول: محمود یوسفیان

پست الکترونیکی:

myousefian@tvu.ac.ir

بیش از ۹۰٪ موتورهای الکتریکی صنایع، انواع موتورهای سه فاز القایی می‌باشد. مزیت مهم این موتورها در مقایسه با موتورهای DC و سنکرون، عدم نیاز به تعمیر و نگهداری ویژه، ارزانی، سادگی ساختمان، استحکام مناسب، و وجود گشتاور راه‌اندازی است. لذا طراحی و ساخت بهینه آنها بعنوان پرمصرف‌ترین بار الکتریکی حائز اهمیت است. استفاده از تکنیک‌های جدید هنگام ساخت به روش مهندسی معکوس در عملکرد و طول عمر الکتروموتور بسیار سودمند است. در این مقاله بهینه‌سازی و ساخت یک الکتروموتور سه فاز القایی شرکت فولاد خوزستان به روش مهندسی معکوس با تکیه بر دانش فنی و مهارت تیم اجرایی، مورد بررسی قرار گرفته است. این الکتروموتور ۸ قطب، ۲۵۰۰ کیلووات، ۶۶۰۰ ولت و ۵۰ هرتز است. کلیه مراحل ساخت به روش مهندسی مجدد از برداشت مشخصات اولیه تا ساخت و تست‌های نهایی انجام شده است. پس از تایید محاسبات و صحت‌سنجی محدودیت‌ها و پارامترهای طراحی به کمک الگوریتم ژنتیک و مقایسه با پارامترهای نمونه موجود، اقدامات ساخت برای هر مرحله و اصلاحاتی جهت بهبود عایق‌بندی، ترانس‌ها و کولینگ انجام شده است. برای بهبود عملکرد کولینگ یاتاقان‌ها، یک سیستم خنک‌کنندگی آب‌گرد که امکان تزریق آب با دما و دبی متغیر را فراهم می‌کند طراحی و اضافه شده است. نتایج نشان می‌دهد الکتروموتور تولیدی در مقایسه با نمونه اصلی دارای مقادیر بهتری در برخی پارامترها از جمله کاهش هزینه و کاهش دما بوده و لذا قابل رقابت با آن می‌باشد.



۱- مقدمه

یکی از کاربردهای مهم روش مهندسی معکوس در صنعت، تولید یک دستگاه، قطعه یا محصول از روی نمونه مشابه است. در این روش با استفاده از عکس، فیلم یا نمونه موجود، یک دستگاه یا محصول تولید می‌شود. استفاده از نرم‌افزارهای طراحی که مدل سه بعدی قطعات را به صورت مجزا نمایش می‌دهد، روش مهندسی معکوس ماشین آلات و قطعات را سرعت زیادی بخشیده و در عین حال باعث افزایش دقت می‌شود. این نرم‌افزارها، کمک می‌کند تا قبل از شروع فرآیند ساخت، ایرادها و اشکالات احتمالی رفع گردد. برخلاف کپی‌سازی، در روش مهندسی معکوس لازم است درک کاملی از دانش و علم طراحی و تکنولوژی عملکرد سیستم داشت تا بتوان چنانچه نیاز به بهبود عملکرد اجزای سیستم بود، اقدامات مورد نیاز انجام شود. در این روش، تمام قطعات و اجزای یک مجموعه مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرند و علاوه بر ابعاد و اندازه، جنس و متریکال، کاربرد و شرایط ظاهری تمام اجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد. درک رابطه علت و معلولی، قابلیت‌های مهندسی معکوس را افزایش داده و می‌تواند کل فرآیند تولید را بهبود بخشد [۱].

با بررسی منابع موجود می‌توان گفت به‌طور کلی مراحل انجام مهندسی معکوس یک دستگاه دارای هفت مرحله شامل، برداشت مشخصات اولیه، دمونتاژ کامل، اندازه‌برداری قطعات و مدل‌سازی، آنالیز متریکال، شناسایی مکلیزم‌ها، تغییرات و اصلاحات لازم و آماده‌سازی اطلاعات فنی برای تولید محصول جدید و مشابه می‌باشد [۲-۳]. استفاده از نرم‌افزارهای طراحی سه‌بعدی، در مهندسی معکوس باعث افزایش سرعت و دقت می‌شود [۴]. نسبت میزان مصرف انرژی الکتریکی توسط موتورهای الکتریکی به کل انرژی الکتریکی تولیدی یک کشور، به سطح صنعتی بودن آن کشور و بازدهی متوسط موتورها وابسته است. برای مثال در کشورهای پیشرفته صنعتی این نسبت در محدوده ۵۰ تا ۶۰ درصد قرار دارد [۵]. برای ایران این نسبت در حدود ۳۸ درصد است [۶].

هر چقدر صنایع توسعه یابد بعلت نیاز به استفاده از موتورهای الکتریکی، نسبت میزان مصرف انرژی الکتریکی توسط این مصرف‌کننده به کل انرژی الکتریکی تولیدی، افزایش می‌یابد. موتورهای الکتریکی از مصرف‌کننده‌های مهم شاخه‌های مصرف خانگی، تجاری، و کشاورزی هم هستند، اما انواع موتورهای الکتریکی پر قدرت و فشار قوی در شاخه مصرف صنعت کاربردهای فراوانی دارند. لذا طراحی و تولید، و یا ساخت به روش مهندسی معکوس این سیستم‌ها اهمیت فراوانی دارد. فرآیند دقیق ساخت به روش مهندسی معکوس برای این سیستم‌ها در کاهش هزینه‌ها و عدم خروج ارز از کشور نقش به‌سزایی داشته و بهینه‌سازی مراحل ساخت آن منجر به افزایش بهره‌وری و عمر مفید آن می‌شود. بومی‌سازی قطعات و تجهیزات علاوه بر جلوگیری از خروج ارز، باعث خودباوری، اشتغال، انگیزه و حرکت و پویایی چرخ صنعت کشور می‌شود. هر چند روش مهندسی معکوس جهت تولید یک دستگاه در دنیا مرسوم است، اما بدلالی از جمله عدم اجرای علمی آن و یا محرمانه بودن اطلاعات آن، اغلب گزارش آنها در نشریات علمی به ندرت یافت می‌شود. ارائه گزارش علمی و مستند با اطلاعات هر چند محدود می‌تواند کمک شایانی برای سایر محققان و صنعتگران باشد.

نظر به اهمیت استفاده از موتورهای القایی به‌طور گسترده در صنایع مختلف، در [۷] به بررسی و کاهش ارتعاشات در موتورهای القایی پرداخته شده است. ارتعاشات می‌تواند عملکرد و طول عمر موتور را تحت تأثیر قرار دهد. با استفاده از روش اجزای محدود، مدل‌سازی سه‌بعدی موتور در نرم‌افزار ANSYS انجام شده، و به کمک آزمایشات تجربی، ارتعاشات موتور آنالیز شده و نقاط ضعف آن شناسایی شده است. سرعت ارتعاشات در نتایج شبیه‌سازی ۱۸/۳ و در نتایج تجربی ۱۰/۶ میلی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده که هر دو بالاتر از حد مجاز ۵ میلی‌متر بر ثانیه (مطابق استاندارد ISO 10816) می‌باشد. با اعمال تغییراتی در ساختار موتور، از جمله افزایش ضخامت پوسته موتور، سرعت ارتعاشات موتور به ۲/۹ میلی‌متر بر ثانیه در نتایج شبیه‌سازی و به ۳/۲ میلی‌متر بر ثانیه در نتایج تجربی کاهش یافته است. در این مرجع نشان داده شده که ترکیب روش‌های عددی و تجربی در تحلیل و طراحی مجدد ساختار موتور القایی جهت کاهش ارتعاشات و افزایش عمر مفید موتور می‌تواند به‌طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرد.

در [۸] بهینه‌سازی طراحی موتور القایی قفس سنجابی با هدف کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد آن انجام شده است. از الگوریتم ژنتیک برای یافتن ترکیب بهینه پارامترهای طراحی استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در کارایی موتور و کاهش مصرف انرژی شده است. مرجع [۹] به بهینه‌سازی چندهدفه عملکرد موتور BLDC با شار محوری برای خودروهای الکتریکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته است. الگوریتم ژنتیک برای بهبود همزمان راندمان و کاهش وزن موتور استفاده شده و نتایج با استفاده از تحلیل اجزای محدود تأیید شده است. نتایج نشان می‌دهد این روش می‌تواند عملکرد موتور را بدون افزایش پیچیدگی‌های ساخت یا هزینه تولید آن، بهبود بخشد. در مرجع [۱۰] طراحی یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با روتور خارجی بر اساس الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی برای یافتن پارامترهای هندسی بهینه انجام شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از روش المان محدود تأیید و نتایج نشان‌دهنده بهبود در چگالی گشتاور و راندمان موتور شده است. لذا طراحی بهینه منجر به موتوری جمع‌وجورتر و کارآمدتر شده است. در [۱۱] طراحی یک موتور القایی ۳۰ اسب بخار با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده و نتایج با موتورهای استاندارد با ویژگی‌های مشابه مقایسه شده است. در این مرجع نشان داده شده که موتور بهینه شده گشتاور راه‌اندازی بیشتری نسبت به موتورهای استاندارد با ویژگی‌های مشابه ارائه داده است. همچنین جریان راه‌اندازی در موتور بهینه‌شده کمتر است که به حفاظت بهتر سیستم قدرت کمک می‌کند. افزایش راندمان و کاهش هزینه تولید از دیگر نتایج طراحی بهینه در این مرجع می‌باشد. در مرجع [۱۲] یک موتور یونیورسال بدون داده‌های طراحی اولیه با استفاده از مهندسی معکوس مدل‌سازی شده است. داده‌های استخراج‌شده برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار ANSYS Maxwell به کار رفته و نتایج با آزمایش‌های عملی مقایسه شده است. از روش مهندسی معکوس برای استخراج داده‌های طراحی استفاده شده و داده‌ها برای مدل‌سازی موتور و عملکرد آن با استفاده از روش المان محدود تحلیل شده است. نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و توافق خوبی بین آن‌ها مشاهده شده است. این تحقیق نشان می‌دهد که حتی بدون دسترسی به داده‌های طراحی اولیه، می‌توان با استفاده از مهندسی معکوس و ابزارهای شبیه‌سازی، عملکرد موتورهای الکتریکی را به‌طور دقیق تحلیل کرد. این رویکرد برای تحلیل موتورهای قدیمی یا بدون مستندات طراحی مفید است. مرجع [۱۳] روشی برای مهندسی معکوس پارامترهای سیستم انتقال قدرت در خودروهای هیبریدی ارائه داده است. با استفاده از داده‌های سنسورها و مدل‌سازی ریاضی، پارامترهای سیستم بدون نیاز به اطلاعات طراحی اولیه تعیین شده‌اند. در این مرجع نشان داده شده که مهندسی معکوس توانسته ویژگی‌های دینامیکی سیستم انتقال قدرت شامل تعامل بین موتور احتراقی و موتور الکتریکی را با دقت بالا در تخمین پارامترها شبیه‌سازی کند. مرجع [۱۴] به بررسی فرآیند مهندسی معکوس در طراحی و بازتولید قطعات مکانیکی می‌پردازد و تکنیک‌های مختلفی را برای استخراج اطلاعات از قطعات موجود معرفی می‌کند. نشان داده شده که با کمک مهندسی معکوس می‌توان قطعات فرسوده یا منسوخ را بدون در اختیار داشتن نقشه‌های اصلی بازتولید کرد. مطالعه موردی انجام‌شده در مقاله نشان داده که این فرآیند نه تنها موجب صرفه‌جویی اقتصادی شده، بلکه کیفیت و قابلیت اطمینان محصول نهایی را نیز افزایش می‌دهد. مرجع [۱۵] به روش‌های برداشت داده‌های هندسی به کمک مهندسی معکوس از پره‌های توربین بر اساس هدف طراحی می‌پردازد و دقت و کارایی آنها را ارزیابی می‌کند. در این پژوهش، رویکردی نوین برای پردازش داده‌های اندازه‌گیری‌شده از پروفیل‌های تیغه‌های توربین ارائه شده تا شکل معتبری از آن‌ها از روش مهندسی معکوس بازسازی شود. با توجه به پیچیدگی

بالای شکل تیغه‌ها، مدل‌های اولیه‌ای که با استفاده از اسکترهای لیزری سه‌بعدی ایجاد می‌شوند، اغلب برای کاربردهای عملی مناسب نیستند. نویسندگان معتقدند تنها راه برای بازسازی دقیق شکل تیغه‌ها، در نظر گرفتن نقاط کلیدی طراحی در فرآیند مهندسی معکوس است.

در این مقاله بهینه‌سازی و ساخت یک الکتروموتور سه فاز القایی به روش مهندسی معکوس مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. الکتروموتور نمونه موجود ساخت شرکت Ldw آلمان می‌باشد. کلیه مراحل ساخت به روش مهندسی معکوس از برداشت مشخصات اولیه تا ساخت و تست‌های نهایی انجام شده است. در هر مرحله علاوه بر دقت در ساخت نمونه مشابه، صحت‌سنجی صورت گرفته و محدودیت‌ها و پارامترهای طراحی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف نهایی، تولید الکتروموتوری با مشخصات نمونه موجود و با عملکردی بهتر و بهینه‌تر از آن می‌باشد.

۲- بیان مسئله

هنگام طراحی و ساخت یک موتور الکتریکی سه فاز القایی، قبل از ساخت نمونه واقعی لازم است مدل ریاضی مناسبی برای موتور ارائه و به کمک آن پارامترهای الکتریکی و مکانیکی و ... موتور محاسبه شود. اغلب از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز استفاده می‌شود. در این صورت با توجه به اهداف طراحی، کلیه پارامترها محاسبه خواهد شد. برای این منظور ابتدا تابع هدف تعیین می‌شود. چنانچه هدف بهینه‌سازی هزینه تولید و بهره‌برداری باشد، $f(x)$ تابع هزینه بوده که باید حداقل‌سازی شود.

$$f(x) = \min (\text{Cost function}) \quad (1)$$

این تابع فقط بهینه‌سازی اقتصادی را در نظر می‌گیرد. در طراحی الکتروموتورها، تعداد متغیرهای غیرخطی موثر ماشین بسیار زیاد است. انتخاب پارامترهای طراحی باید به گونه‌ای باشد که طرح بهینه عملی و قابل اجرا باشد. اهداف طراحی می‌تواند بسیار زیاد و حتی مغایر هم بوده و دسترسی همزمان به همه آنها مقدور نیست. طراحان برای یافتن مصالحه‌ای بین تضادهای بین روش‌های عددی و الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک بهره می‌گیرند. الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های فرا ابتکاری است که به دلیل مزایای قابل توجه، در حوزه‌های مختلفی مانند بهینه‌سازی مهندسی، طراحی سازه، و مهندسی معکوس کاربرد گسترده‌ای دارد. پیاده‌سازی ساده که منجر به کاهش زمان حل می‌شود، تطبیق‌پذیری بالای الگوریتم ژنتیک در مهندسی معکوس، توانایی یافتن بهینه‌های سراسری در فضای جستجوی پیچیده، حل مسائل ناپیوسته، یا دارای قیود پیچیده، و قابلیت ترکیب با روش‌های دیگر از مزایای مهم الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد. یکی از روش‌های بهینه‌سازی که در لحاظ نمودن پارامترهای مغایر مورد استفاده قرار می‌گیرید، روش بهینه‌سازی چند هدفه مجموعه بهینه پارتو است [۱۶]. در این روش یک تابع هدف چند منظوره انتخاب می‌گردد. در بهینه‌سازی چند هدفه اهداف طراحی دو یا چند هدف از موارد زیر است:

- ۱- حداقل‌سازی تابع هزینه
- ۲- حداقل‌سازی تابع تلفات نامی (حداکثرسازی بازده نامی)
- ۳- حداقل‌سازی تابع جریان راه‌اندازی
- ۴- حداکثرسازی تابع ضریب قدرت
- ۵- حداکثرسازی گشتاور بار کامل

الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA) یکی از الگوریتم‌های شاخص و پرکاربرد در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه است [۱۷-۱۸]. این الگوریتم را می‌توان الگوی شکل‌گیری بسیاری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه هوشمند دانست [۱۹-۲۰]. جواب‌های بدست آمده از حل مسأله بهینه‌سازی، غالباً به نام جبهه پارتو شناخته می‌شوند [۲۱]. برای مثال به کمک ضرایب وزنی و استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه می‌توان مسئله بهینه‌سازی را به صورت زیر تعریف نمود [۲۲]:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(x) = \min[\omega_1 \cdot f_1(x) + \omega_2 \cdot f_2(x) + \omega_3 \cdot f_3(x)] \\ \sum_{i=1}^3 \omega_i = 1, \quad f_1(x) = C_{total}, \quad f_2(x) = \Delta P, \quad f_3(x) = ; \end{array} \right. \quad (2)$$

که در آن $f_1(x)$ تابع هزینه، $f_2(x)$ تابع تلفات و $f_3(x)$ تابع معکوس گشتاور بار کامل است. همچنین ω_1 ، ω_2 و ω_3 توابع وزنی مربوط به هر یک از توابع هزینه، تلفات و گشتاور بوده که بایستی تعریف شود. با محاسبه جبهه پارتو می‌توان طرح بهینه را انتخاب نمود. الگوریتم ژنتیک ابزار قدرتمندی مبتنی بر جستجوی تصادفی و برگرفته از تئوری تکامل است. در هر نسل از این الگوریتم، موجودات مصنوعی جدیدی از بهترین افراد نسل گذشته تولید و بعنوان معیار بهبود کیفی آنها، مقدار برازندگی جدیدی به بوته آزمایش گذاشته می‌شود. سادگی و عدم نیاز به اطلاعات قبلی، از ویژگی‌های مهم این الگوریتم است [۲۳]. طراحی بر اساس بهینه کردن تابع برازندگی انجام می‌شود. فرآیند اجرای الگوریتم ژنتیک جهت طراحی بهینه، مطابق روند ارائه شده در [۲۴] استفاده شده است. الگوریتم ابتدا جمعیت مناسبی از تمام فضای جستجو گرد هم آورده و به هر فرد جمعیت یک مقدار برازندگی اختصاص می‌دهد و با عملگرهایی مانند تکثیر، ترکیب و جهش، به تولید جمعیت جدید می‌پردازد و در نهایت به جمعیت مطلوب می‌رسد. پس از محاسبه بهترین جواب‌ها و با در نظر گرفتن تمامی قیود و محدودیت‌ها، طراحی بهینه شده و به یک طرح مناسب همگرا و الگوریتم متوقف می‌شود.

در این مقاله جهت مهندسی معکوس ساخت یک موتور الکتریکی سه فاز القایی، قبل از ساخت نمونه واقعی، با استفاده از مدل ریاضی مناسبی برای موتور و استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت تایید پارامترهای طراحی و قیود مربوط به آن استفاده شده است.

هدف اصلی و نوآوری مهم این مقاله کنترل محدودیت‌های طراحی و تایید پارامترهای طراحی مربوط به سیم‌پیچی استاتور و روتور، به کمک الگوریتم ژنتیک و همزمان با روش مهندسی معکوس جهت تولید یک الکتروموتور سه فاز القایی شرکت فولاد خوزستان با تکیه بر دانش و مهارت تیم اجرایی می‌باشد. همچنین بهبود عملکرد کولینگ یاتاقان‌ها از نوآوری‌های مهم دیگر این مقاله می‌باشد.

۲- روش تحقیق

طراح الکتروموتور با کمیت‌های مختلف الکتریکی، مغناطیسی، حرارتی و مکانیکی سروکار دارد، که روابط پیچیده‌ای با هم دارند. موضوعات اصلی طراحی عبارت است از: طراحی فریم، طراحی نوع تهویه مورد نیاز، طراحی ابعاد شافت و سیستم یاتاقان‌بندی، طراحی هسته مغناطیسی، طراحی سیم‌پیچی و سیستم عایقی. هر یک از این موضوعات پیچیدگی خاص خود را دارد. به دلیل اشباع مغناطیسی و عدم یکنواختی طول فاصله هوایی طراحی هسته مغناطیسی مشکل‌ترین قسمت کار طراحی است. مشخصه‌های کاری ماشین‌های الکتریکی شدیداً به مواد مغناطیسی وابسته است.

همزمان با افزایش شار، اشباع مغناطیسی آغاز می‌شود، در نتیجه مقدار پرمابلیته مغناطیسی، با افزایش شار، کاهش می‌یابد. مقدار گشتاور الکترومغناطیسی و ولتاژ تولیدی در ماشین‌های الکتریکی، بستگی به شارهای پیوندی سیم‌پیچ‌ها دارد، و در نیروی محرکه مغناطیسی ثابت، مقدار شار بستگی به رلوکتانس مسیر شار دارد. لذا اشباع مغناطیسی می‌تواند به طور محسوس بر مشخصه کاری ماشین تأثیرگذار باشد. اشباع مغناطیسی، طراحی و تحلیل پیچیده مغناطیسی را از حالت خطی و آسان خارج کرده و آن را به مسئله‌ای غیرخطی مبدل می‌سازد. این پیچیدگی وقتی به شدت نمایان می‌شود که فواصل هوایی بین روتور و استاتور طول غیر یکنواختی داشته باشد و اثر شیارها و مجاری تهویه نیز در نحوه توزیع شار در نظر گرفته شود. در یک طراحی واقعی لازم است ضرایب کارتر لحاظ گردد. ضرایب کارتر بستگی به نسبت بازشدگی دهانه شیار به طول فاصله هوایی دارد. بعلاوه وجود شیارها طول موثر فاصله هوایی مطابق رابطه (۳) افزایش می‌یابد [۲۵].

$$l_{ge} = k_g \cdot l_g \quad (۳)$$

که l_g ، l_{ge} و k_g به ترتیب طول، طول موثر، و ضریب انبساط طولی فاصله هوایی در اثر شیارهای روتور و استاتور می‌باشند. k_g به کمک ضرایب کارتر محاسبه می‌شود. آمپر دور فاصله هوایی با طول آن نسبت مستقیم دارد. در واقع نیروی محرکه مغناطیسی لازم برای فاصله هوایی به اندازه k_g برابر افزایش می‌یابد [۲۵]. یک طرح خوب، مقدار مناسبی برای فضای اشغالی آهن، مس، عایق و هوا در نظر می‌گیرد. قدرت ظاهری ورودی یک موتور الکتریکی مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{\text{Output in kW}}{\text{Power factor} \times \text{Efficiency}} \quad (۴)$$

که S قدرت ظاهری ورودی موتور برحسب kVA بوده و به پارامترهای ارائه شده در رابطه ۵ وابسته است.

$$S = 1.1 k_w \times \pi^2 \times \bar{B} \times ac \times D^2 \times L \times n \times 10^{-3} \quad (۵)$$

در این رابطه، k_w ضریب سیم‌پیچی، \bar{B} بارگذاری مغناطیسی ویژه برحسب تسلا، ac بارگذاری الکتریکی ویژه بر حسب آمپر دور، D قطر داخلی استاتور برحسب متر، L طول هسته برحسب متر، و n سرعت روتور برحسب دور در ثانیه است. اگرچه در روش مهندسی معکوس طراحی بهینه برای تمام بخش‌های ماشین انجام نمی‌شود، اما شناخت و درک روابط طراحی ماشین و ارتباط بین پارامترها کمک می‌کند تا بتوان نسبت به مقادیر الکتریکی، مغناطیسی، و مکانیکی ماشین و محدودیت‌ها اظهار نظر کرد. در صورت امکان می‌توان در فرآیند ساخت از تکنیک‌های مناسبی جهت عملکرد بهتر ماشین استفاده نمود. برای الکتروموتور نمونه موجود که ساخت شرکت Ldw آلمان است در هر مرحله روابط طراحی ماشین مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اینکه بسیاری از متغیرهای طراحی در الکتروموتور مورد مطالعه مفروض است، علاوه بر بررسی رفتار ماشین، از الگوریتم ژنتیک و روندهای ارائه شده در [۱۹] برای محاسبه جبهه پارتو با تغییر در تابع هدف و متغیرهای طراحی استفاده شده است. لذا پس از صحنه‌سنجی محدودیت‌ها و پارامترهای طراحی، اقدامات ساخت برای هر مرحله انجام شده است.

در این پژوهش، تابع هدف حداقل‌سازی هزینه و تلفات در نظر گرفته شده و به صورت زیر تعریف شده است:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(x) = \min[\omega_1 \cdot f_1(x) + \omega_2 \cdot f_2(x)] \\ \sum_{i=1}^2 \omega_i = 1, \quad f_1(x) = C_{total}, \quad f_2(x) = \Delta P \end{array} \right. \quad (۶)$$

ضرایب وزنی ω_1 و ω_2 به ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۴۵ انتخاب شده است. با توجه به مهندسی معکوس الکتروموتور مذکور، هزینه‌های تولید ورق هسته، شافت، پوسته و سایر هزینه‌ها بجز هزینه‌های مربوط به سیم‌بندی استاتور و روتور معلوم است. بنابراین حداقل‌سازی کل هزینه‌های سیم‌بندی استاتور و روتور هدف بهینه‌سازی است. این هزینه‌ها شامل هزینه مس استفاده شده، هزینه ساخت سیم با ابعاد مورد نیاز، هزینه آنیل کردن سیم‌ها، هزینه عایق روی سیم، هزینه کویل‌سازی، هزینه جوشکاری لیدها و سرسیم‌های خروجی و عایق کاری آن، هزینه عایق کاری اصلی کویل‌ها، هزینه عایق کاری نهایی با سیستم رزین کاری تحت خلا و فشار و هزینه‌های اضافی مانند فیبرهای کف، میانی و نوار نیمه‌هادی است. در این طراحی می‌توانیم هزینه‌های آنیل کردن، عایق کاری نهایی، جوشکاری لیدها و سرسیم‌های خروجی و عایق کاری آن، هزینه‌های کویل‌سازی و عایق کاری اصلی هر کویل و هزینه‌های اضافی را ثابت در نظر بگیریم. لذا با تقریب مناسبی می‌توان هزینه عایق روی سیم و هزینه ساخت سیم با ابعاد مورد نیاز را به مقطع سیم تخت وابسته نمود. در یک طرح مشخص هر چقدر مقطع سیم تخت کاهش یابد، آرایه سیم تغییر نموده و با تعداد هادی‌های موازی افزایش می‌یابد و سبب افزایش هزینه می‌شود. با توجه به اینکه در مهندسی معکوس الکتروموتور مذکور، پارامترهایی مانند ابعاد هسته، سرعت چرخش روتور، ولتاژ و فرکانس مشخص است، لذا تلفات هسته، تلفات مکانیکی و تلفات نامعین بار ثابت در نظر گرفته شده و فقط تلفات مسی سیم‌بندی استاتور و روتور حداقل‌سازی شده است. بنابراین توابع $f_1(x)$ و $f_2(x)$ به صورت زیر تعریف شده است:

$$f_1(x) = C_{total} = w_{cu_s}(cu_{cost} + k_{1_s} \cdot C_{1kg} + C_{const_s}) + w_{cu_r}(cu_{cost} + k_{1_r} \cdot C_{1kg} + C_{const_r}) \quad (۷)$$

$$f_2(x) = \Delta P = P_{cu_s} + P_{cu_r} \quad (۸)$$

که در آن داریم:

C_{total} : کل هزینه سیم‌بندی روتور و استاتور (\$)

w_{cu_s} : وزن مس به کار رفته در سیم‌بندی استاتور (kg)

w_{cu_r} : وزن مس به کار رفته در سیم‌بندی روتور (kg)

cu_{cost} : هزینه یک کیلوگرم مس (\$/kg)

k_{1_s} : ضریب دشواری ساخت سیم در سیم‌بندی استاتور

k_{1_r} : ضریب دشواری ساخت سیم در سیم‌بندی روتور

C_{1kg} : هزینه ساخت و نوار زنی یک کیلوگرم سیم به مقطع ۳۰ میلیمتر مربع (\$/kg)

C_{const_s} : هزینه‌های ثابت در سیم‌بندی استاتور (\$/kg)

C_{const_r} : هزینه‌های ثابت در سیم‌بندی روتور (\$/kg)

جدول ۱. محدودیت‌های طراحی

ردیف	نام پارامتر	نماد	قید نامساوی
۱	تعداد دور در هر فاز استاتور	T_{ph_s}	$40 \leq x_1 \leq 100$
۲	تعداد دور در هر فاز روتور	T_{ph_r}	$20 \leq x_2 \leq 80$

$0.4 \leq x_3 \leq 0.9$	\overline{B}_g	چگالی شار متوسط gap	۳
$1.8 \leq x_4 \leq 4.8$	Jcu_s	چگالی جریان هادی‌های استاتور	۴
$1.8 \leq x_5 \leq 4.8$	Jcu_r	چگالی جریان هادی‌های روتور	۵
$x_6 \leq 0.01$	S_{FL}	لغزش بار نامی	۶
$x_7 \leq 1.7$	B_{sy_s}	چگالی فلوی طوقه استاتور	۷
$x_8 \leq 1.7$	B_{sy_r}	چگالی فلوی طوقه رتور	۸
$x_9 \leq 1.8$	B_{st_s}	چگالی فلوی دندانه استاتور	۹
$x_{10} \leq 1.9$	B_{st_r}	چگالی فلوی دندانه روتور	۱۰
$x_{11} \leq 8.5$	I_{st}/I_n	نسبت جریان راه‌اندازی به جریان نامی	۱۱
$x_{12} \geq 2.5$	T_{max}/T_n	نسبت گشتاور ماکزیمم به گشتاور نامی	۱۲
$x_{13} \geq 0.78$	$\cos \varphi_n$	ضریب قدرت بار نامی	۱۳
$x_{14} \geq 0.93$	η_n	ضریب بهره بار نامی	۱۴

وزن مس به کار رفته در سیم‌بندی استاتور و روتور از حاصل ضرب حجم مس (m^3) در جرم حجمی مس (kg/m^3) محاسبه می‌شود که با تعداد دور و سطح مقطع هادی‌های سیم‌پیچی استاتور و روتور رابطه دارد. همچنین در محاسبه تلفات سیم‌پیچی استاتور و روتور تعداد دور و سطح مقطع هادی‌های سیم‌پیچی استاتور و روتور متغیرهای اصلی در طراحی می‌باشند. لذا در بهینه‌سازی تابع هدف، متغیرهای تاثیرگذار، سطح مقطع هادی و تعداد دور هر فاز سیم‌پیچی استاتور و روتور می‌باشد. محدودیت‌های طراحی و مقداردهی اولیه مطابق جدول ۱ می‌باشد.

در فرآیند اجرای الگوریتم ژنتیک، عملگر برش (Crossover) با احتمال ۰/۷ و عملگر جهش (Mutation) با احتمال ۰/۱ تنظیم شده است. همچنین جمعیت اولیه در مقدار ۵۰ و حداکثر نسل در مقدار ۳۰۰ تنظیم شده است. جدول ۲ مشخصات فنی الکتروموتور درخواستی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات فنی الکتروموتور درخواستی جهت مهندسی معکوس

parameter	value/description	parameter	value/description
Rated output	: 2500 KW	Product group	with SR. : HV IM.
Rated speed	: 744 min-1	Standard	: IEC
Power factor	: 0.80	Frequency fluctuation	: $\pm 2\%$
Rated frequency	: 50 Hz	starting current / rated current	: 1.5
Number of poles	: 8	Thermal class (stator / rotor)	: F / F
Stator/Rated voltage	: 6.6 KV : 285 A	Altitude	: <1000m above sea level

Rated current Connection	: Y	Moment of inertia (motor-rotor)	: 465 Kg.m ²
		Type of construction	: IM B3 / IM1001
Rotor/Rated voltage Rated current Connection	: 1315 V : 1155 A : Δ	Degree of protection	: IP 54
		Cooling method	: IC 37W
		Total weight	: 14100Kg
Voltage fluctuation	: ±5 %	Bearing design	: Sleeve bearing
Ambient temperature	: 55 oC	Direction of rotation	: CW

مراحل بهینه‌سازی و ساخت الکتروموتور درخواستی به روش مهندسی معکوس با کنترل و تایید پارامترهای طراحی به شرح ذیل انجام شده است:

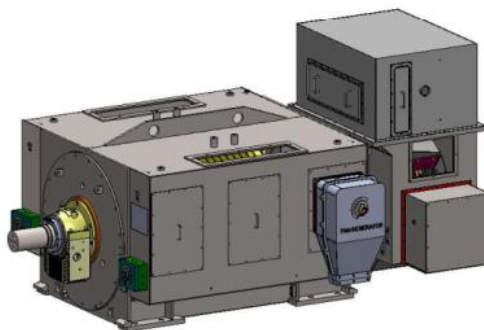
- برداشت مشخصات ابعادی بیرونی الکتروموتور و تهیه layout drawing
- برداشت مشخصات عملکردی الکتروموتور از روی پلاک مشخصات و دیتا شیت
- دمونتاژ الکتروموتور/ برداشت مشخصات ابعاد داخلی الکتروموتور
- برداشت مشخصات ابعادی هسته استاتور و روتور/ برداشت مشخصات سیم‌پیچی استاتور و روتور
- برداشت مشخصات اسلیپ رینگ، جاذغالی و ذغال‌ها
- برداشت مشخصات رادیاتورهای آب
- آنالیز جنس قطعات نظیر شفت، اسلیپ‌رینگ و متعلقات آن
- تایید پارامترهای هندسی طراحی و تهیه نقشه‌های اولیه و مدل‌سازی کامپیوتری
- بررسی تولرانس‌های ساخت قطعات
- تهیه نقشه‌های ساخت
- سفارش مواد و ساخت قطعات پوسته، هسته، شافت، درقاب‌ها، اسلیپ‌رینگ، رادیاتور و متعلقات آن
- تامین قطعات شامل یاتاقان‌ها، جاذغالی
- آنالیز جنس مواد خریداری شده و مقایسه با مواد اصلی
- تهیه WPS برای عملیات جوشکاری قطعات
- انجام تست‌های NDT روی مواد اولیه نظیر شفت
- کنترل محدودیت‌های طراحی و تایید پارامترهای طراحی مربوط به سیم‌پیچی استاتور و روتور
- سیم‌پیچی هسته استاتور و انجام عملیات رزین کاری تحت خلا و فشار
- کیورینگ سیم‌پیچی استاتور
- مونتاژ هسته سیم‌پیچی شده داخل پوسته
- کنترل همراستایی و ماشین کاری پوسته

^۱Welding Procedure Specification

^۲Non Destructive Testing

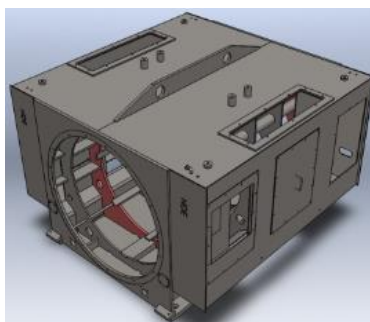
- سیم‌پیچی هسته روتور و انجام عملیات رزین کاری
- کیورینگ سیم‌پیچی روتور
- بالانس روتور
- مونتاژ الکتروموتور
- انجام تست‌های کارخانه‌ای در حضور نمایندگان کارفرما
- رنگ‌آمیزی، قفل روتور و آماده‌سازی جهت ارسال
- تهیه final book

مدل‌سازی سه بعدی الکتروموتور مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مدل‌سازی سه بعدی الکتروموتور مورد مطالعه

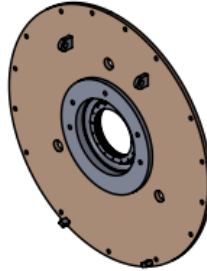
پوسته الکتروموتور نمونه از نوع Welded steel است. شکل ۲ تصویر مدل‌سازی سه بعدی پوسته الکتروموتور مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای ساخت پوسته از ورق‌های فولادی با ضخامت مشابه به روش پلازما ابتدا برش کاری و سپس جوش کاری شده است. جوشکاری‌ها مطابق استاندارد و تحت نظارت شخص ثالث ذیصلاح و دارای گرید انجام شده است. پس از آن پوسته برای عملیات تنش‌زدایی در کوره قرار گرفته و سپس پوسته با استفاده از دستگاه کاروسل ماشین‌کاری شده و با استفاده از دستگاه بورینگ کف‌تراشی شده است. قابل ذکر است پس از مونتاژ هسته سیم‌پیچی شده استاتور داخل پوسته، برای کنترل همراستایی و اصلاحات مورد نیاز، پوسته مجدداً توسط دستگاه کاروسل اصلاح شده است.



شکل ۲. تصویر مدل‌سازی سه بعدی پوسته الکتروموتور

مورد مطالعه

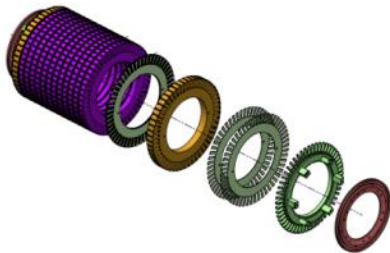
درقاب‌ها از ورق فولادی به روش پلاسما برش کاری و پس از جوشکاری قطعات و تنش‌زدایی، ماشین‌کاری شده است. شکل ۳ تصویر مدل‌سازی سه بعدی درقاب‌های الکتروموتور مورد مطالعه را نشان می‌دهد. درقاب‌ها مطابق با نمونه اصلی و با هدف سهولت در امر دمونتاز و عملیات تعمیرات آتی، درقاب سمت NDE بصورت دوتکه ساخته شده است.



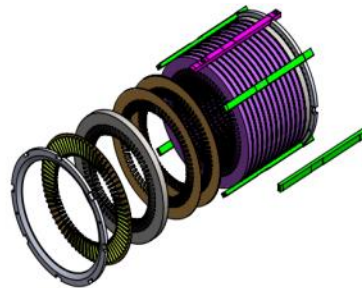
شکل ۳. تصویر مدل‌سازی سه بعدی درقاب الکتروموتور مورد

مطالعه

ورق‌های هسته با استفاده از فولاد الکتریکی با گرید M400-50A محصول شرکت POSCO کره جنوبی و به روش روش پانچ و ناچ ساخت شده است (شکل ۴).



ب- هسته روتور



الف- هسته استاتور

شکل ۴. مدل‌سازی سه بعدی ورق‌های هسته استاتور و روتور الکتروموتور مورد مطالعه

مشخصات فنی فولاد الکتریکی مورد استفاده در جدول ۳ داده شده است. به کمک روابط طراحی، چگالی شار در بخش‌های مختلف هسته مورد بررسی قرار گرفت که در محدوده‌های مجاز می‌باشد.

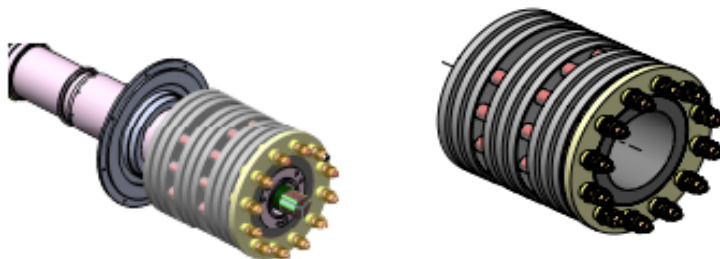
جدول ۳. مشخصات فنی فولاد الکتریکی استفاده شده

Magnetic Properties			
Grade	Thi ckness	Guarantee	Typical

PO SCO	JIS	mm	Core Loss W15/50	Flux Density (B50)	Core Loss W15/50	Flux Density (B50)
50P N400	50 A400	0.5	4.00	1.63	2.95	1.69
Mechanical Properties						
Grade		Thickness	Tensile Strength	Yield Point	Elongation	Hardness
PO SCO	JIS	mm	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	Hv1
50P N400	50 A400	0.5	475	345	28	170

پس از مونتاژ ورق‌ها، هسته با دو روش Ring flux test و ELCID تست شد. در روش اول با ایجاد فلوی نامی در هسته و با روش ترموویژن و عکس برداری حرارتی دمای قسمت‌های مختلف هسته کنترل شده که در همه قسمت‌ها دما در محدوده مجاز می‌باشد. در روش دوم با ایجاد فلویی در حدود ۰.۴٪ مقدار نامی، هسته اسکن و هیچ‌گونه جریان خطای غیر مجازی مشاهده نشد.

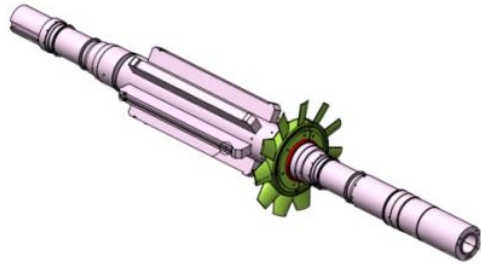
ساخت اسلیپ رینگ‌ها بر اساس آنالیز جنس رینگ‌های اصلی که استیل X10Cr13 می‌باشد انجام شد. عایق کاری کلیه قطعات با استفاده از مواد عایقی قابل ماشین کاری انجام شده است. اسلیپ رینگ‌ها بصورت مجزا مونتاژ و در نهایت روی شافت نصب و عملیات نهایی کنترل لنگی و ماشین کاری مورد نیاز انجام شده است. در شکل ۵ مدل سه بعدی اسلیپ رینگ‌های الکتروموتور مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۵. مدل سه بعدی اسلیپ رینگ‌های الکتروموتور مورد مطالعه

برای ساخت شافت ابتدا آنالیز جنس شافت الکتروموتور مورد مطالعه بررسی و نسبت به خرید فولاد مناسب و مشابه اقدام شد. سپس روتراشی اولیه شافت و تست UT توسط شخص ثالث ذیصلاح و دارای گرید انجام شد. شافت روتور از نوع اسپایدری است. پس از ماشین کاری اولیه، ریب‌ها روی شافت و بر اساس WPS تهیه شده و با روش جوش زیر پودری یا Co2 جوش کاری شد. پس از آن شافت تحت عملیات تنش‌زدایی حرارتی قرار گرفته و ادامه عملیات

ماشین کاری انجام شد. فن های محوری نیز نصب گردید. در شکل ۶ مدل سه بعدی شافت الکتروموتور مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۶. مدل سازی سه بعدی شافت الکتروموتور مورد مطالعه

مبدل حرارتی یا سیستم خنک کننده الکتروموتور درخواستی از نوع IC 37W و از نوع تبادل هوا به آب است. در این سیستم هوای گرم داخل موتور از طریق دو عدد فن قرار گرفته روی شفت سیرکوله می شود. دمای هوا با رادیاتورهای آبی تبادل می گردد. دو عدد رادیاتور روی پوسته الکتروموتور و یک عدد رادیاتور کوچک در محفظه اسلیپ رینگ ساخته و نصب شد. مس مورد استفاده برای ساخت سیم تخت عایقی از نوع مس 99.9% CU-ETP و از محصولات شرکت صنایع ملی مس ایران استفاده شده است.

به کمک روابط طراحی ماشین محاسبات سیم پیچی روتور و استاتور مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. چگالی جریان ها در محدوده مجاز بوده و حجم مناسبی برای عایق شیار وجود دارد. نقشه سیم پیچی روتور و استاتور محاسبه و ترسیم شد. سیستم عایقی مورد استفاده برای عایق کاری، مبتنی بر MICABOND شرکت ABB بوده و بر اساس رزین کاری تحت خلا و فشار (VPI) می باشد.

خصوصیات این سیستم عایقی به شرح ذیل است:

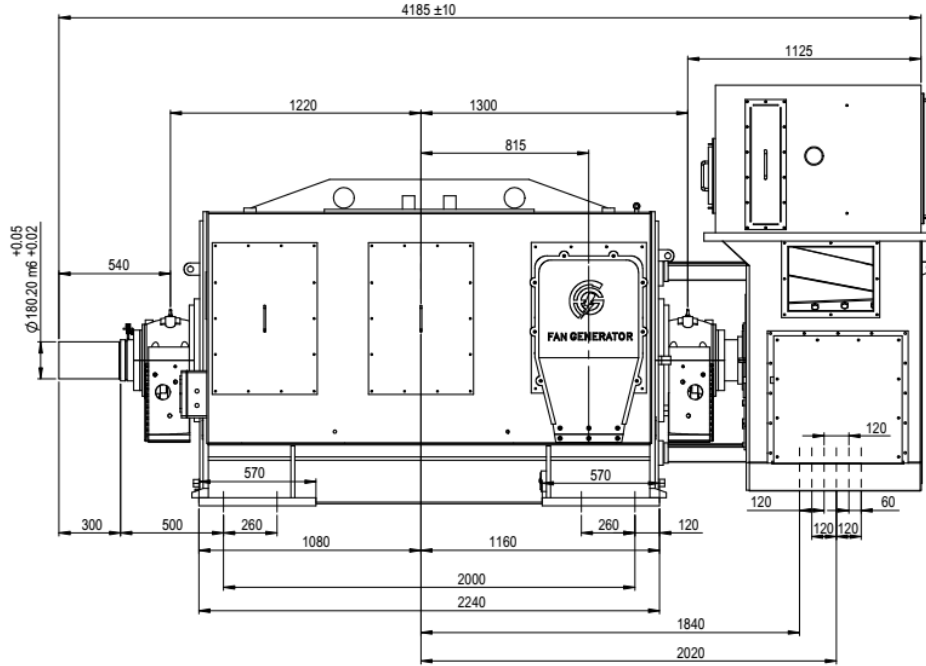
- کلاس عایقی بالا F(155C)
- استقامت الکتریکی بالاتر از محدوده مورد نظر استاندارد
- استقامت مکانیکی بسیار بالا در قسمت اورهنگها
- استقامت در برابر تشعشعات
- مقاوم در برابر رطوبت و مناسب برای کار در مناطق با آب و هوای شرجی
- دارای لایه های آنتی کرونا OCP/ECP

مواد عایقی شامل عایق روی سیم، عایق اصلی، لایه های OCP و ECP، لایه های سیلینگ، گوه های روی شیار، فیبرهای کف و میانی و نیز رزین های مورد استفاده محصول شرکت معتبر ایزوولتای اتریش و ایزولای سوئیس می باشد. سیم پیچی روتور با استفاده از تسمه های مسی با خلوص بالای مس مشابه استاتور انجام شده است. مواد مورد استفاده برای کلیه لاینرها، سپریتورها، نوار بانداژ، و کلاهکها محصول شرکت ایزوولتای اتریش است. یاتاقان های مورد استفاده از نوع یاتاقان های لغزشی (Sleeve bearing) است. با هدف جلوگیری از عبور جریان مزاحم شافت، بیرینگ سمت NDE از نوع عایق شده استفاده شده است. برای بهبود عملکرد کولینگ در محفظه روغن یاتاقان ها یک سیستم خنک کنندگی آب گرد (کولر روغن) که امکان تزریق آب با دما و دبی متغیر جهت کاهش دمای روغن را فراهم می کند طراحی و اضافه شده است.

^۱Vacuum Pressure Impregnation

۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث

الکتروموتور ساخته شده از نظر ابعادی کاملاً مشابه با نمونه اصلی بوده و جهت نصب آن نیاز به هیچ گونه تغییراتی در فونداسیون یا استفاده از آداپتور نمی‌باشد. (شکل ۷)



شکل ۷. نقشه ابعادی الکتروموتور مورد مطالعه

علاوه بر تست‌های حین فرآیند، تست‌های نهایی کارخانه‌ای به شرح ذیل انجام شد:

- بازرسی چشمی
- اندازه‌گیری ابعادی
- اندازه‌گیری مقاومت اهمی سیم‌پیچی استاتور و روتور
- اندازه‌گیری اندوکتانس سیم‌پیچی استاتور و روتور
- تست سرچ (اتصال حلقه) سیم‌پیچی استاتور و روتور
- تست مقاومت عایقی و تعیین شاخص پلاریزاسیون سیم‌پیچی استاتور و روتور
- اندازه‌گیری ظرفیت خازنی، تلفات عایقی ($\tan \delta$) و تخلیه جزئی (PD) سیم‌پیچی استاتور
- تست فشار قوی سیم‌پیچی استاتور و روتور
- کنترل ملحقات (سنسورهای حرارتی و گرم‌کن)
- تست مدار باز (روتور در حالت سکون)
- تست روتور قفل شده
- تست بی‌باری و تعیین مشخصه بی‌باری

• اندازه‌گیری ارتعاشات

• کنترل وضعیت دمای کارکردی بیرینگ‌ها

نتایج کلیه تست‌های مذکور موفقیت‌آمیز بوده و به تایید کارفرما رسیده است. در تست‌های استاتیکی و دینامیکی نهایی کارخانه‌ای از دستگاه LCR متر (LCR Meter Tinsley) جهت سنجش مقاومت و اندوکتانس سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور استفاده شده است. همچنین برای بررسی وضعیت عایق‌بندی و اتصال حلقه سیم‌پیچ‌ها از دستگاه سرچ تستر (Baker Instruments Motor Surge Testers - 15 kV) با توانایی اعمال پالس‌های موجک تا ولتاژ ۱۵ کیلوولت استفاده شده است.

تست مقاومت عایقی با استفاده از میگر (KYORITSU KEW 3125A- 5kV) انجام شده و جهت تست تلفات عایقی ($\tan\delta$) و تخلیه جزئی (PD) سیم‌پیچ‌ها از دستگاه اندازه‌گیری تلفات عایقی - تانژانت دلتا (TCM-400) استفاده شده است. از آنالایزر (ADASH VA5 PRO A4500 Vibration Analysis) جهت اندازه‌گیری و آنالیز ارتعاشات، و برای کنترل وضعیت دمای کارکردی بیرینگ‌ها از دوربین حرارتی (ترموپژن) استفاده شده است. الکتروموتور تولید شده به روش مهندسی معکوس، مربوط به کارخانه گندله‌سازی شرکت فولاد خوزستان بوده و جهت تامین، انتقال و گردش هوای کوره به سطح گندله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. انجام تست بارگذاری در محل شرکت فولاد خوزستان انجام شده است. بارگذاری به صورت مرحله به مرحله صورت پذیرفته تا در نهایت الکتروموتور زیر بار کامل قرار گرفته و نتایج تست بار کامل، اندازه‌گیری و ثبت شده است.

بررسی و مقایسه نتایج تست‌های استاتیکی و بی‌باری نشان می‌دهد الکتروموتور تولیدی دارای مقادیر مشابه با نمونه اصلی بوده و در تعدادی از موارد در وضعیت بهتری قرار دارد.

در جدول ۴ نتایج اندازه‌گیری مقاومت و اندوکتانس استاتور در دمای 20 °C داده شده است.

جدول ۴. نتایج اندازه‌گیری مقاومت و اندوکتانس استاتور در دمای 20 °C

اندوکتانس (mH)			مقاومت (mΩ)			
U-W	V-W	U-V	U-W	V-W	U-V	
۳۲/۶۷	۳۳/۴۹	۳۳/۶۰	۱۵۰/۸۱	۱۵۰/۹۳	۱۵۰/۸۱	الکتروموتور تولیدی
۳۲/۵۲	۳۳/۲۱	۳۳/۲۷	۱۵۱/۰۸	۱۵۱/۴۰	۱۵۱/۲۲	الکتروموتور موجود

نتایج اندازه‌گیری مقاومت و اندوکتانس استاتور در شرایط مشابه نشان می‌دهد الکتروموتور تولیدی دارای مقادیر مشابه و قابل قبولی می‌باشد. اختلاف مقادیر مقاومت و اندوکتانس استاتور دو موتور نسبت به هم در همه موارد کمتر ۱٪ است.

نتایج تست بار کامل در ولتاژ و توان ثابت خروجی برای الکتروموتور ساخته شده در مقایسه با الکتروموتور نمونه موجود در جدول ۵ داده شده است.

جدول ۵. نتایج تست بار کامل الکتروموتور ساخته شده در مقایسه با الکتروموتور نمونه

موجود

پارامتر	بازده (%)	توان دریافتی (kW)	سرعت (rpm)	ضریب قدرت	جریان (A)

۲۸۴/۷	۰/۸۰۶	۷۴۵	۲۶۱۷/۵	۹۵/۵	تست بار کامل الکتروموتور تولیدی
۲۸۵/۲	۰/۸۰۴	۷۴۴	۲۶۲۰/۴	۹۵/۴	تست بار کامل الکتروموتور موجود

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد الکتروموتور ساخته شده در مقایسه با نمونه اصلی از وضعیت بهتری برخوردار بوده و ۰/۱٪ افزایش بازده، ۰/۱٪ کاهش توان دریافتی در بار ثابت خروجی، و ۰/۲۵٪ افزایش ضریب توان را نشان می‌دهد. تصاویری از الکتروموتور تولید شده حین فرآیند ساخت، در شکل ۸ نشان داده شده است.



ب- روتور



الف- استاتور



د- مجموعه کامل موتور تولید شده



ج- پوسته

شکل ۸. الکتروموتور تولیدی حین فرآیند ساخت

از آنجاییکه اطلاعات کافی از هزینه‌های مواد اولیه و هزینه‌های فرآیند تولید الکتروموتور اصلی موجود نیست، امکان مقایسه ریز این هزینه‌ها با الکتروموتور تولیدی وجود ندارد. اما پس از تحلیل اقتصادی و محاسبه کل هزینه‌های تمام شده الکتروموتور تولیدی، هزینه تمام شده به میزان ۳۵٪ کاهش نشان می‌دهد. همچنین در صورت تولید انبوه، هزینه تمام شده در مقایسه با قیمت خرید الکتروموتور اصلی، کاهش بیشتری خواهد داشت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهینه‌سازی و ساخت یک الکتروموتور سه فاز القایی مربوط به شرکت فولاد خوزستان به روش مهندسی معکوس مورد بررسی قرار گرفت. الکتروموتور ۸ قطب، ۲۵۰۰ کیلووات، ۶۶۰۰ ولت، و ۵۰ هرتز است. صحنه‌سنجی مراحل ساخت انجام و محدودیت‌ها و پارامترهای طراحی مورد بررسی قرار گرفت. پس از تایید، اقدامات ساخت انجام و اصلاحاتی جهت بهبود سیستم‌عایقی، تیرانس‌های ساخت و بهبود سیستم کولینگ یاتاقان‌ها انجام شد. کنترل محدودیت‌های طراحی، و تایید پارامترهای طراحی مربوط به سیم‌پیچی استاتور و روتور به کمک الگوریتم ژنتیک، و همزمان با روش

مهندسی معکوس، و بهبود عملکرد کولینگ یاتاقان‌ها از نوآوری‌های مهم این مقاله می‌باشد. افزودن سیستم خنک‌کنندگی آب‌گرد طراحی شده، باعث کاهش دمای روغن یاتاقان‌ها در حدود ۱۴٪ گردید. نتایج عملی نشان می‌دهد الکتروموتور تولیدی در مقایسه با نمونه اصلی دارای مقادیر بهتری در برخی پارامترها از جمله افزایش مقاومت عایقی، کاهش تلفات بی‌باری، بهبود وضعیت نويز و لرزش، کاهش هزینه تمام شده به میزان ۳۵٪ و کاهش دمای کارکردی الکتروموتور در حدود ۴٪ بوده و لذا قابل رقابت با نمونه اصلی می‌باشد.

References

- [1] Abella, R. J., Daschbach, J. M., & McNichols, R. J. (1994). Reverse engineering industrial applications. *Computers & Industrial Engineering*, 26(2), 381–385. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/036083529490071X>
- [2] Eilam, E. (2005). *Reversing: Secrets of reverse engineering*. Wiley Publishing. https://en.wikipedia.org/wiki/Reversing:_Secrets_of_Reverse_Engineering
- [3] Raja, V., & Fernandes, K. J. (2008). *Reverse engineering: An industrial perspective*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2>
- [4] Pidaparti, R. M. (2023). *Design Engineering Journey*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25969-2_4
- [5] Fei, R., Fuchs, E. F., & Huang, H. (1989). Comparison of two optimization techniques as applied to three-phase induction motor design. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 4(4), 651–660. <https://doi.org/10.1109/TIA.1989.41724>
- [6] Oreyee, H. (2015). *The first report: Statistical analysis of the amount of energy consumed by electric motors in relation to the total energy consumption of Iran and its separation in terms of type and output power* [Report, Energy consumption optimization research project in electric motors, Ministry of Energy, Energy Deputy, Energy Efficiency Organization]. (in Persian). <https://civilica.com/doc/20412/>
- [7] Prasad, K., Rao, K. D., & Alsaif, F. (2024). Induction motor structure design to reduce vibrations with numerical (FEA) and experimental (VA) techniques. *IEEE Access*, 12, 40894–40904. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.10463039>
- [8] Suresh, S., Patel, M., & Patel, J. (2023). Design optimization of electric motor (induction motor) using genetic algorithm. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 11(8), 553–559. <https://ijritcc.org/index.php/ijritcc/article/view/9989/7645>
- [9] Patel, N., & Suthar, N. (2024). Performance optimization of axial flux permanent magnet brushless DC motor for electric vehicle application with the genetic algorithm (GA) approach. *International Journal of Ambient Energy*, 42(1). <https://doi.org/10.1080/01430750.2024.2370850>
- [10] Mutluer, M. (2017). Design of external rotor permanent magnet synchronous motor based on genetic algorithm and differential evolution algorithm. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 5(4), 242–246. <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/645>
- [11] Aziz, H., Ali, J., & Shanshal, K. (2023). Optimization of induction motor rotor bar geometry based on genetic algorithm. In *Proceedings of the International Conference on Engineering, Science and Advanced Technology (ICESAT)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICESAT58213.2023.10347297>

- [12] Nassrullah, N., & Ali, M. (2024). Finite element analysis of universal motor based on reverse engineering. *Journal for Scientific Engineering Research*, 3(2), 65–76. <https://doi.org/10.58564/IJSER.3.2.2024.180>
- [13] DiPierro, G., Galvagno, E., Mari, G., et al. (2021). A reverse-engineering method for powertrain parameters characterization applied to a P2 plug-in hybrid electric vehicle with automatic transmission. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 3(1), 715–730. <https://doi.org/10.4271/2020-37-0021>
- [14] Dhapakumar, R., & Ganesh, R. (2019). Reverse engineering in mechanical component. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 7(11). <https://www.ijert.org/reverse-engineering-in-mechanical-component>
- [15] Mohaghegh, K., Sadeghi, M. H., & Abdullah, A. (2006). Reverse engineering of turbine blades based on design intent. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(1), 1009–1020. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-006-0406-9>
- [16] Idir, K., Chang, L., & Dai, H. (1995). *Induction motor design using neural network*. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. <https://ieeexplore.ieee.org/document/528128>
- [17] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. <https://ieeexplore.ieee.org/document/996017>
- [18] Chaabani, A., Karaja, M., & Said, L. B. (2023). *An efficient non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization*. In Proceedings of the International Conference on Control, Rome, Italy. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10284357>
- [19] Tomoiagă, M., Chindriș, A., Sumper, A., Sudria-Andreu, A., & Villafafila-Robles, R. (2013). Pareto optimal reconfiguration of power distribution systems using a genetic algorithm based on NSGA-II. *Energies*, 6(3), 1439–1455. <https://www.mdpi.com/1996-1073/6/3/1439>
- [20] Alsofyani, I. M., Idris, N. R. N., Jannati, M., Anbaran, S. A., & Alamri, Y. A. (2014). *Using NSGA II multiobjective genetic algorithm for EKF-based estimation of speed and electrical torque in AC induction machines*. IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014). <https://ieeexplore.ieee.org/document/6814461>
- [21] Abdollahi, S. A., Ahrari, M., & Ahsaee, M. G. (2024). Modeling and optimization of hybrid energy systems using techno-economic and environmental characteristics [in Persian]. *Karafan Quarterly Research Journal*, 21(1), 203–235. https://karafan.nus.ac.ir/article_190993_7a888094f7eb31468f949bb87a4d76ca.pdf
- [22] Yousefian, M., Mashhadi, H. R., & Zarchi, H. A. (2013). Optimal design in the stator rewinding of high voltage three-phase induction motor to reach the new permissible voltage using genetic algorithm [in Persian]. *Karafan Quarterly Research Journal*, 11(35), 46–53. (in Persian)
- [23] Jiang, X., Wang, Y., & Dong, J. (2023). Speed regulation method using genetic algorithm for dual three-phase permanent magnet synchronous motors. *Transactions on Electrical Machines and Systems*, 7(2), 171–178. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10032058>
- [24] Haupt, L. R., & Haupt, S. E. (2004). *Practical genetic algorithms*. New Jersey: John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/0471671746.fmatter>
- [25] Deshpande, M. V. (2010). *Design and testing of electrical machines*. New Delhi: PHI Learning. <https://www.phindia.com/Books/BookDetail/9788120336452/design-and-testing-of-electrical-machines-deshpande>