



افزایش راندمان موتورهای القایی سه فاز جهت صرفه جویی انرژی در صنعت سیمان

مهدی رضائی‌نخعی¹، رضا روشن‌فکر^{2*}

- 1- دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
- 2- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

خلاصه

موتورهای القایی سه فاز قفس سنجابی کاربرد فراوانی در صنعت و به طور خاص در صنعت سیمان دارد. در این مقاله رویکردهای متفاوتی با هدف افزایش راندمان بر روی موتور القایی قفس سنجابی سه فاز 30 کیلووات واقعی بررسی شد. این رویکردها شامل تغییر قطر خارجی استاتور و تغییر حجم موتور با در نظر گرفتن تغییر همزمان قطر خارجی استاتور و روتور هستند که در هر کدام از این روش‌ها، تغییرات راندمان موتور، مورد بررسی قرار گرفت. با رویکرد تغییر قطر خارجی استاتور، راندمان موتور مورد مطالعه در شرایط بهینه طراحی تا 76/0 درصد و در رویکرد دوم یعنی تغییر حجم روتور راندمان موتور بهینه 26/0 درصد، افزایش یافت. موتور مورد مطالعه با اطلاعات واقعی در نرم افزار ماکسول و در محیط Rmxprt شبیه سازی و مشخصات عملکردی موتور استخراج شده است.

کلمات کلیدی: موتورهای القایی سه فاز، افزایش راندمان، صرفه جویی انرژی، صنعت سیمان، نرم افزار ماکسول

1. مقدمه

اگرچه ممکن است چنین به نظر برسد که موتورهای الکتریکی کم اهمیت ترین عنصر پیچیده در مشخصه‌های تجهیزات فرآیند آسیاب سیمان محسوب میشود، لیکن در کاربردهای کنونی کارخانجات سیمان، موتورهای الکتریکی یک عنصر بسیار حیاتی هستند که انتخاب نادرست آنها میتواند منجر به فلج شدن فرآیند تولید گردد [1]. در ایران حدود 9% انرژی الکتریکی در کارخانجات سیمان مصرف میشود. برآوردها نشان میدهد که در کارخانجات منتخب سالانه بالغ بر 138 میلیون کیلووات ساعت امکان صرفه جویی انرژی وجود دارد. اگر راندمان موتور الکتریکی القایی در اروپا تنها به میزان 1% افزایش یابد، هزینه مصرف انرژی الکتریکی به میزان 6/1 میلیارد دلار در سال کاهش خواهد یافت و همچنین در ایران نیز چنین صرفه جویی بزرگی محتمل است. اگر چه قیمت موتورهای با راندمان بالا بیشتر از موتورهای استاندارد است، ولی در اغلب کاربردها استفاده از آنها کاملاً اقتصادی است، خصوصاً در کاربردهایی که مدت زمان روشن بودن موتور بیش از خاموش بودن آن است و همچنین در کاربردهایی که مدت زمان روشن بودن موتور بیش از 2000 ساعت در سال باشد و نیز برای کاربردهایی که گشتاور بار نسبتاً ثابت بوده و موتور بدرستی به بار تطبیق شده است. بارهایی چون میکسرها، نقاله‌ها و

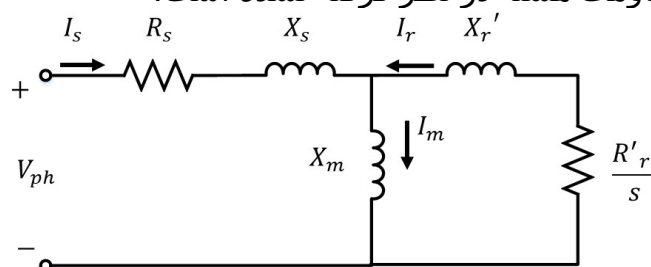
*Email: r.roshanfekr@hsu.ac.ir

فیدرها از این نوع هستند. اهمیت موضوع وقتی مشخص میشود که هزینه انرژی مصرفی یک الکتروموتور در طول مفید آن 10 تا 20 برابر قیمت موتور است [2].

در طی سال های اخیر، تحقیقات مختلفی در زمینه طراحی موتورهای القایی سه فاز انجام گرفته که هر کدام از آنها با توجه به هدف مشخصی، روش ها و متغیرهای مختلفی را برای طراحی بهینه موتور به کار گرفتهاند. این پژوهشها با هدف بهبود راندمان، مشخصات راه-اندازی، ضریب توان و کاهش هزینه انجام شده است. برای رسیدن به این هدف، روشهای متفاوتی شامل تغییر و یا طراحی شکل شیپار رتور [3] و [4]، تغییر جنس مواد به کار رفته در موتور [5]، تغییر حجم موتور [6] و [7]، تغییر و یا انحراف میله رتور [8] و بالابردن کیفیت ریختهگری میلههای رتور [9] در نظر گرفته شده است. در این مقاله اثر تغییر حجم موتور به منظور بهبود راندمان در نظر گرفته شده است. این رویکرد شامل دو بخش تغییر قطر خارجی استاتور و تغییر همزمان قطر داخلی و خارجی استاتور و رتور است.

2. روابط تحلیلی حاکم بر راندمان موتورهای القایی سه فاز

مدار معادل مغناطیسی هر فاز موتور، شامل مقاومت ها و راکتانس های استاتور و رتور و راکتانس مناطیسی شوندگی است. شکل (1)، مدار معادل مغناطیسی موتور القایی را نشان می دهد. با داشتن پارامترهای شکل (1)، جریان هر فاز استاتور و به عبارتی مشخصات عملکردی موتور قابل تعیین است. در این مدار معادل، رتور به سمت استاتور ارجاع داده شده و مقاومت هسته در نظر گرفته نشده است.



شکل 1: مدار معادل مغناطیسی موتور القایی قفس سنجایی

2-1 مقاومت استاتور

استاتور موتورهای القایی، سیم پیچی شده است و بنابراین تعداد دورها و مسیرهای موازی در مقدار مقاومت استاتور تاثیر می گذارند. مقاومت استاتور می تواند به صورت زیر محاسبه شود [10]:

$$R_s = \rho \times \frac{l_s \times W}{A \times a} \quad (1)$$

که در رابطه (1)، ρ مقاومت ویژه سیم، l_s طول کلاف، W تعداد دورها در هر فاز، a تعداد مسیرهای موازی و A سطح مقطع موثر سیم است.

2-2 مقاومت رتور

به منظور محاسبه مقاومت هر فاز رتور، ابتدا باید مقاومت معادل میله و حلقه های انتهایی دو طرف آن تعیین شود. در موتورهای القایی پدیده ای به نام اثر پوستی وجود دارد که در لحظه راه اندازی موتور، جریان را در قسمت بالایی شیپار رتور متمرکز می کند و پس از گذر از راه اندازی و رسیدن به حالت کارکرد نامی موتور که در حدود 0.1 ثانیه طول می کشد، جریان از تمامی شیپار رتور عبور می کند. بنابراین مقاومت رتور در راه اندازی و حالت نامی با یکدیگر متفاوت است.

مقاومت معادل میله و حلقه های انتهایی رتور به صورت زیر تعیین می شود:



$$R_{be} = \rho_{Al} \left[\left(\frac{L}{A_b} \times K_R \right) + \left(\frac{l_{er}}{2A_{er} \times \sin^2 \left(\frac{\pi p_1}{N_r} \right)} \right) \right] \quad (2)$$

که در آن، ρ_{Al} مقاومت ویژه آلومینیوم، L طول استک (پشته)، A_b مساحت شیار، K_R ضریب اثر پوستی برای مقاومت رتور، l_{er} طول حلقه انتهایی، A_{er} مساحت حلقه انتهایی، p_1 تعداد جفت قطب و N_r تعداد شیار رتور است.

مقاومت رتور قفسی ارجاع داده شده به سمت استاتور در راه اندازی با توجه به مقاومت معادل میله و حلقه انتهایی رتور در راه اندازی قابل محاسبه است:

$$(R_r')_{s=1} = \frac{4m_1}{N_r} (W_1 \times k_{w1})^2 \times R_{be} \quad (3)$$

به منظور محاسبه ضریب اثر پوستی برای مقاومت معادل میله و حلقه انتهایی K_R ، رابطه تقریبی زیر استفاده می شود:

$$K_R \approx \beta_s \times h \times \sqrt{S} \quad (4)$$

جایی که

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega_1 \times \mu_0}{2\rho_{Al}}} \quad (5)$$

و S لغزش، h عمق موثر شیار رتور است.

برای به دست آوردن مقاومت هر فاز رتور در لغزش نامی، ابتدا مقاومت معادل میله و حلقه انتهایی در لغزش نامی محاسبه می شود و سپس از طریق معادله پیشنهادی زیر مقاومت مورد نظر در لحظه نامی تعیین می شود:

$$(R_r')_{s_n} = (R_r')_{s=1} \times \frac{R_{s_n}^{be}}{R_{s=1}^{be}} \quad (6)$$

2-3 راندمان

راندمان یا بهره در یک سیستم، نسبت توان خروجی به توان ورودی است. هیچ سیستم ایده آلی در واقعیت وجود ندارد. لذا مقداری از توان ورودی به صورت تلفات در سیستم مورد نظر از بین می رود و باقیمانده آن به خروجی تحویل داده می شود. بنابراین می توان راندمان را برای سیستمی مانند موتور القایی به صورت زیر بیان کرد:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{loss}} \quad (7)$$

که در آن P_{out} توان خروجی، P_{in} توان ورودی و $\sum P_{loss}$ مجموع تلفات موتور است. این مجموع تلفات شامل تلفات مسی استاتور P_{co} ، تلفات مسی رتور P_{Al} ، تلفات آهنی P_{iron} ، تلفات مکانیکی P_{mv} و تلفات سرگردان P_{stray} است. پس:

$$\sum P_{loss} = P_{co} + P_{Al} + P_{iron} + P_{mv} + P_{stray} \quad (8)$$

که در آن

$$P_{co} = 3R_s \times I_s^2 \quad (9)$$

و

$$P_{mv} = 0.012P_n \quad (10)$$



9

$$P_{stray} = 0.01P_n \quad (11)$$

9

$$P_{iron} = P_{iron}^1 + P_{iron}^s \quad (12)$$

که در آن P_{iron}^1 تلفات آهنی مولفه اصلی و P_{iron}^s تلفات آهنی هارمونیک است. به دلیل اینکه در لحظه نامی، لغزش یا فرکانس رتور خیلی کم است، تلفات اصلی فقط در استاتور ایجاد می شود اما تلفات هارمونیک هم ناشی از استاتور و هم ناشی از رتور است.

تلفات مولفه اصلی P_{iron}^1 ، شامل تلفات دندانه استاتور P_{t1} و تلفات یوغ استاتور P_{y1} است. تلفات اصلی دندانه استاتور با رابطه زیر تعیین می شود:

$$P_{t1} = K_t \times P_{10} \times \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1.3} \times B_{ts} \times G_{t1} \quad (13)$$

که در آن، K_t رشد افزایش تلفات آهنی به علت ماشین کاری مکانیکی را نشان می دهد و عددی بین 1.6 تا 1.8 است. P_{10} تلفات ویژه بر حسب وات بر کیلوگرم در 1 T و 50 Hz، f_1 فرکانس اصلی، B_{ts} چگالی شار دندانه استاتور بر حسب تسلا (T) و G_{y1} وزن یوغ استاتور است که به چگالی جرمی ورقه، تعداد شیارها، عرض دندانه، طول هسته، ضریب انباشتگی هسته و ابعاد شیار استاتور بستگی دارد.

تلفات اصلی یوغ استاتور، مشابه رابطه (13)، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_{y1} = K_y \times P_{10} \times \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1.3} \times B_{cs} \times G_{y1} \quad (14)$$

که در آن، K_y رشد افزایش تلفات آهنی به علت ماشین کاری مکانیکی را نشان می دهد و عددی بین 1.6 تا 1.9 است. B_{cs} چگالی شار یوغ استاتور بر حسب تسلا (T) و G_{t1} وزن دندانه استاتور است که به قطر خارجی و داخلی استاتور، طول هسته، ضریب انباشتگی هسته و ارتفاع یوغ استاتور بستگی دارد.

تلفات آهنی هارمونیک P_{iron}^s شامل تلفات هارمونیک هسته استاتور P_s^s و تلفات هارمونیک هسته رتور P_r^s است. تلفات هسته استاتور و رتور به ترتیب با رابطه های تقریبی (15) و (16) تعیین می شود:

$$P_s^s \approx 0.5 \times 10^{-4} \left(N_s \times \frac{f_1}{p_1} \times K_{ps} \times B_{ps}\right)^2 \times G_{ts} \quad (15)$$

$$P_r^s \approx 0.5 \times 10^{-4} \left(N_r \times \frac{f_1}{p_1} \times K_{pr} \times B_{pr}\right)^2 \times G_{tr} \quad (16)$$

که در این دو رابطه

$$K_{ps} \approx \frac{1}{2.2 - B_{ts}} \quad (17)$$

$$K_{pr} \approx \frac{1}{2.2 - B_{tr}} \quad (18)$$

9

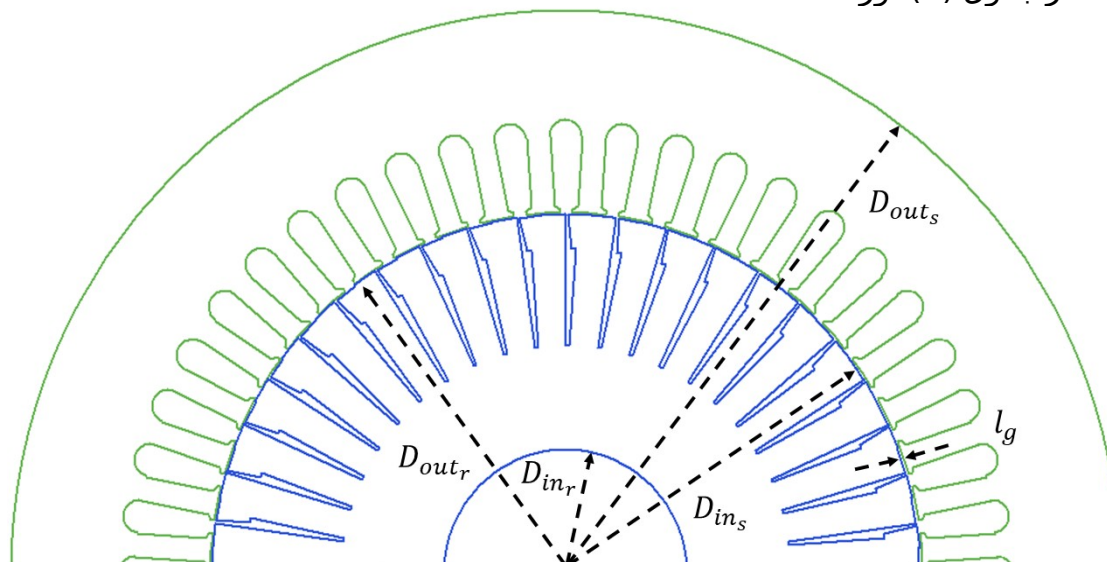
$$B_{ps} \approx (K_{c2} - 1) \times B_g \quad (19)$$

$$B_{pr} \approx (K_{c1} - 1) \times B_g \quad (20)$$

و N_s تعداد شیارهای استاتور، N_r تعداد شیارهای رتور، G_{ts} وزن دندانه استاتور، G_{tr} وزن دندانه رتور، B_g چگالی شار فاصله هوایی و K_c ضریب کارتر است.

3. مشخصات موتور مورد مطالعه

موتور مورد مطالعه، یک موتور القایی قفس سنجابی سه فاز 4، 30 kW قطبی و 50 هرتزی است که میتواند در صنایع سیمان مورد استفاده قرار گیرد. شکل (2)، ساختار استاتور و رتور این موتور را نشان می‌دهد. موتور نشان داده شده در شکل (2)، یک موتور راندمان بالا است که در استاندارد IEC در گروه موتورهای IE3 قرار می‌گیرد. هر گونه تغییر در ساختار موتور که منجر به بهبود راندمان شود، ممکن است موتور مورد نظر را در گروه موتورهای IE2 که از نظر راندمانی بالاتر هستند قرار دهد. مشخصات فنی موتور مورد مطالعه در جدول (1) آورده شده است.



شکل 2: ساختار استاتور و رتور موتور مورد مطالعه

جدول 1: مشخصات فنی و نامی موتور 30 kw مورد مطالعه

توان نامی (kW)	ولتاژ نامی (V)	جریان نامی (A)	سرعت نامی (rpm)	ضریب توان	راندمان (%)	تعداد قطب‌ها	کلاس عایق
30	380	2/57	1474	87/0	5/91	4	F

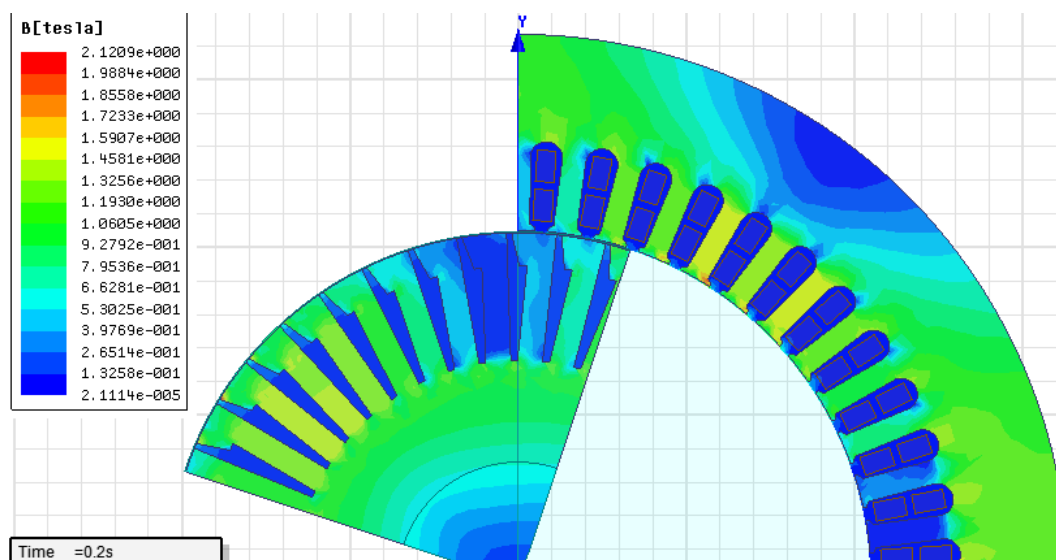
روش المان محدود، یک روش حل تقریبی است که معادلات پیچیده ریاضی را به سادگی حل می‌کند. به طور کلی این روش زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که حل معادلات ریاضی از راه معمولی بسیار سخت باشد. مهندسان معمولاً از این روش به دلیل اینکه برای کاربردهای آزمایشگاهی و تجربی محصولات را طراحی می‌کنند و نیاز به یک راه حل با دقت بالا ندارند، استفاده می‌کنند. تعدادی نرم افزار مختلف در زمینه طراحی سازه‌های

سبزواری

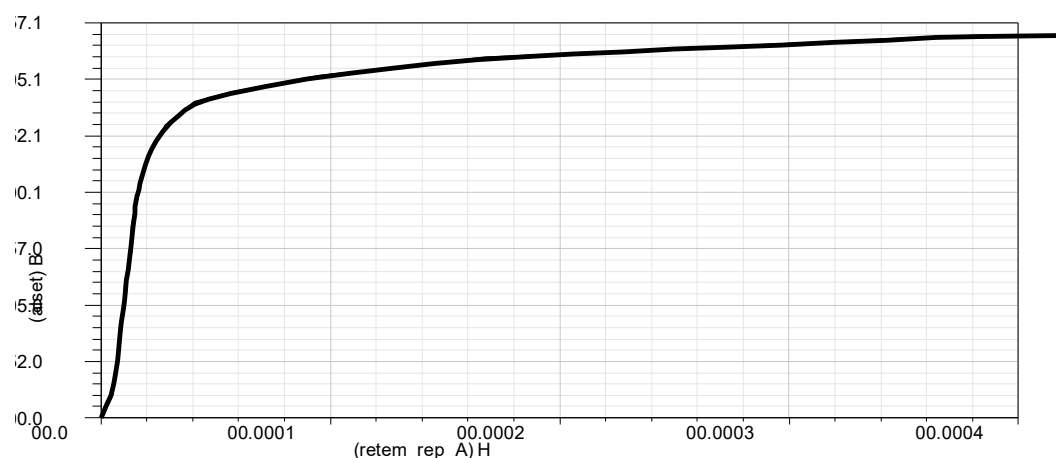
مغناطیسی وجود دارد که از روش المان محدود برای حل معادلات غیرخطی و رسیدن به پاسخ معادلات بهره گرفته اند. این نرم افزارها شامل، آباکوس، ماکسول، فلاکس، جی مگ هستند. در این مقاله، نرم افزار ماکسول برای حل معادلات غیرخطی حاکم بر موتور به کار گرفته شده است تا مشخصه های عملکردی موتور اعم از راندمان، گشتاور، ضریب توان مورد بررسی قرار گیرد.

شکل (3)، که توزیع چگالی شار موتور را در لغزش نامی به تصویر می کشد، نشان می دهد که موتور مورد نظر به اشباع نرفته است و چگالی شار فاصله هوایی با توجه به منحنی B_H هسته (شکل 4)، در ناحیه زانو قرار گرفته است. همچنین چگالی شار دندان ها نسبت به دیگر نقاط موتور بیشتر است ولی چگالی شار در دندان ها تا $T 1.4$ مورد قبول است و با این قید، موتور همچنان در ناحیه خطی منحنی B_H قرار دارد.

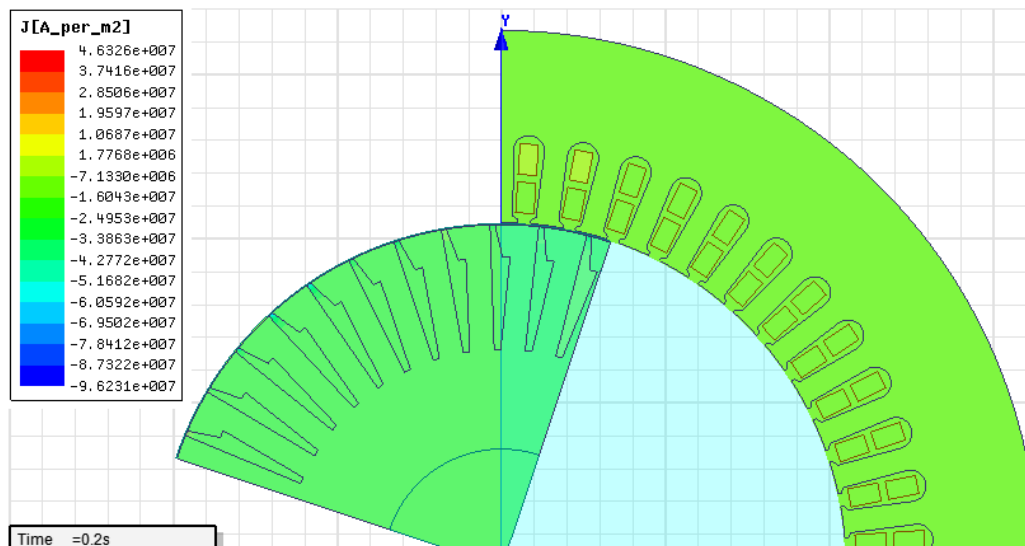
در راه اندازی موتور تمامی جریان در قسمت بالایی شیار رتور متمرکز می شود و پس از رسیدن موتور به شرایط پایدار و یا لغزش نامی، جریان از تمامی شیار عبور می کند. این پدیده در شکل (5) و شکل (6) که به ترتیب توزیع چگالی جریان در راه اندازی و لغزش نامی را نشان می دهد، به وضوح قابل مشاهده است.



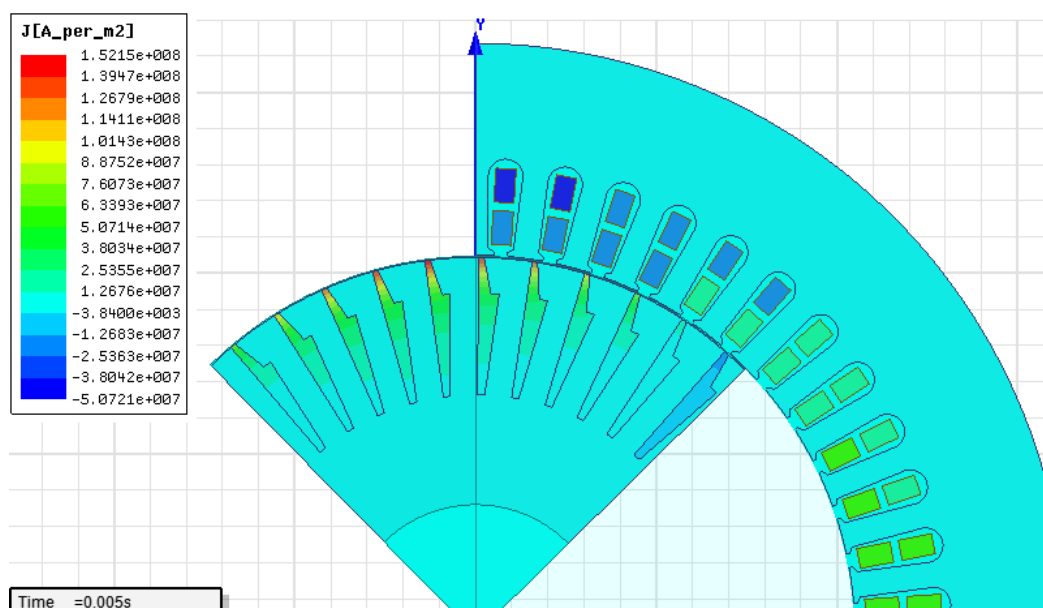
شکل 3: توزیع چگالی شار مغناطیسی در موتور 30 kw و در لغزش نامی



شکل 4: منحنی B-H هسته موتور مورد مطالعه



شکل 5: توزیع چگالی جریان موتور در لغزش نامی



شکل 6: توزیع چگالی جریان در لحظه ی راه اندازی و اثبات اثر پوستی

4. رویکردهای اعمال شده جهت افزایش راندمان موتور

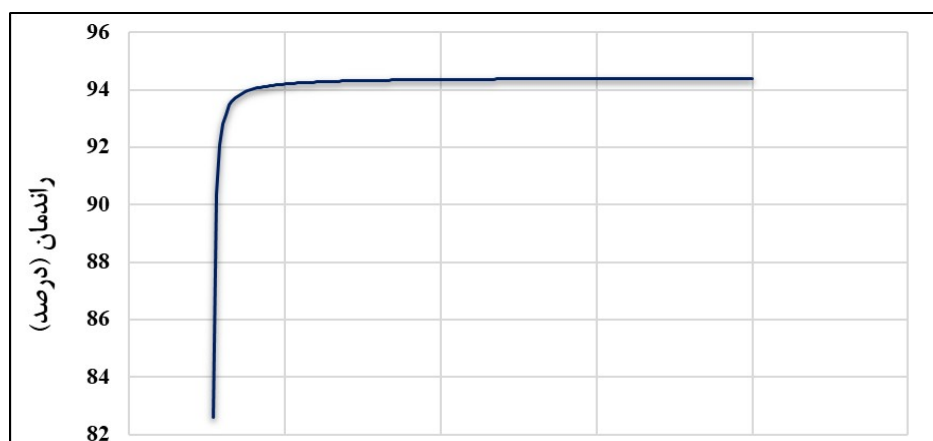
یکی از راههای افزایش راندمان در موتور، افزایش حجم آن است. حتی در طراحی اولیه یک موتور القایی وقتی که راندمان به دست آمده کمتر از راندمان مورد انتظار باشد، برای

سبزوار

افزایش راندمان، قطر استاتور باید بزرگتر از مقدار اولیه در نظر گرفته شود تا راندمان خواسته شده از طراحی حاصل گردد. هدف این مقاله بهبود راندمان موتور القایی سه فاز 30 kW است که این هدف از طریق اعمال رویکرد تغییر حجم موتور و به عبارتی تغییر قطر استاتور به سرانجام رسیده است. این رویکرد به دو بخش مجزا تقسیم شده است. ابتدا فقط قطر خارجی استاتور شروع به تغییر می‌کند و سپس به طور همزمان هم قطر خارجی و هم قطر داخلی استاتور و رتور شروع به تغییر می‌کند.

4-1 تغییر قطر خارجی استاتور

قطر خارجی استاتور در مدل اصلی برابر 327 mm است. در این حالت راندمان موتور 93.588 درصد است. در این رویکرد، قطر خارجی از 0.27 m تا 2 m با پله های 0.01 تغییر کرده است و در هر پله از تغییرات راندمان موتور محاسبه شده است و منحنی راندمان بر حسب قطر خارجی استاتور به متر، در شکل (7) نشان داده شده است. با توجه به منحنی، تغییر قطر خارجی از 1 m تا 2 m، تغییرات زیادی در راندمان ایجاد نمی‌کند. بیشترین تغییرات در راندمان از 0.27 m تا 0.7 m رخ می‌دهد به طوری که وقتی قطر خارجی استاتور 650 mm است، راندمان 94.3 درصد است که 0.76 درصد نسبت به راندمان اولیه افزایش داشته است.



شکل 7: منحنی تغییرات راندمان موتور 30 kw به ازای تغییر قطر خارجی

افزایش قطر خارجی استاتور به مقدار 650 mm، باعث کاهش جریان راه اندازی به 207.78 آمپر شده است که این کاهش 11.3 درصد نسبت به مقدار اولیه است. به دنبال کاهش جریان راه اندازی، گشتاور راه اندازی 19.1 درصد نسبت به گشتاور راه اندازی مدل اصلی کاهش یافته است. گشتاور راه اندازی در مدل اولیه 274.98 N.m است. پس می‌توان گفت که افزایش قطر خارجی استاتور، راندمان و ضریب توان را بهبود می‌دهد ولی باعث کاهش گشتاور راه اندازی و گشتاور ماکزیمم می‌شود.

2-4 تغییر همزمان قطر استاتور و رتور

از نظر سازندگان و طراحان موتور القایی، در هنگام طراحی اولیه موتور، قطر داخلی و خارجی استاتور باید در یک مقدار معینی باشد. نسبت قطر خارجی به قطر داخلی برابر ضریبی است که به تعداد قطب های موتور بستگی دارد. در موتور مورد مطالعه، تعداد قطب ها برابر 4 است. لذا این ضریب عددی بین 0.61 تا 0.63 است. پس وقتی قطر خارجی تغییر کند طبیعی است که بر اساس این ضریب، قطر داخلی استاتور هم تغییر کند. از طرفی، اگر فاصله هوایی بین استاتور و رتور وجود نداشته باشد، قطر داخلی استاتور با قطر خارجی رتور یکسان است ولی در واقعیت، به دلیل چرخش رتور و کاهش اصطکاک بین رتور و استاتور، فاصله هوایی بین این دو وجود دارد که برای هر موتور مقدار مشخص و ثابتی

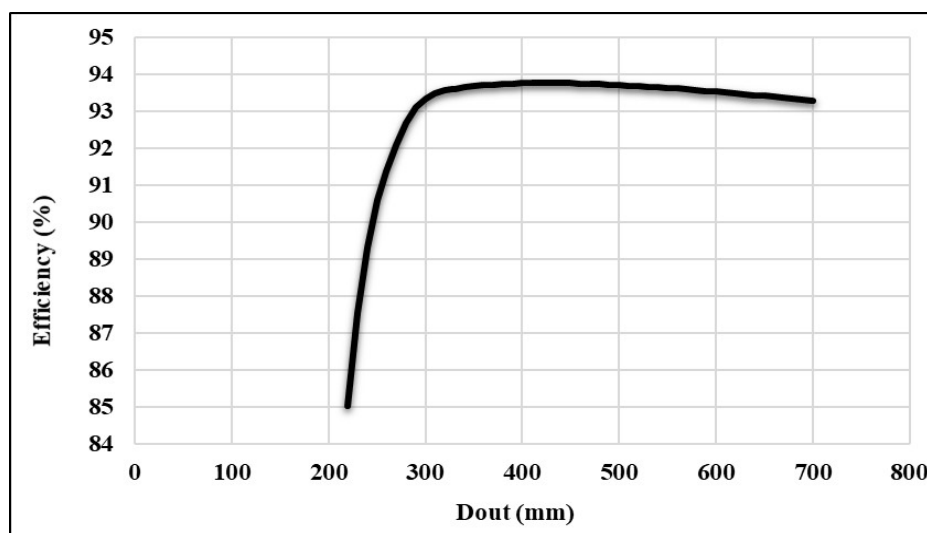
سبزوار

است. پس وقتی قطر داخلی استاتور تغییر کند، با ثابت بودن فاصله هوایی، قطر خارجی رتور دست خوش تغییرات می‌شود.

قطر شفت موتور، بر اساس رابطه (21) به قطر خارجی رتور و عمق شیار رتور وابسته است [10]. به عبارتی وقتی قطر خارجی رتور تغییر کند، شفت موتور، تغییرات قطر خارجی رتور را خواهد کرد.

$$D_{in_r} = D_{shaft} < 0.62D_{out_g} - 2g - 2l_{slot} \quad (21)$$

در این رویکرد، قطر خارجی رتور از mm 220 تا mm 700 تغییر کرده است همزمان با تغییر قطر داخلی استاتور، قطر خارجی رتور و قطر داخلی رتور هم تغییر می‌کند. منحنی تغییرات راندمان در اثر اعمال رویکرد مورد نظر در شکل (8) نشان داده شده است. در این منحنی راندمان در بهترین حالت به 93.86 درصد ارتقا پیدا می‌کند که 0.27 درصد نسبت به مقدار اولیه یعنی 93.588 درصد، افزایش یافته است. در این حالت قطر خارجی استاتور برابر با mm 420 است. جدول (2)، مشخصات هندسی مدل اولیه و مدل بهینه شده در این رویکرد آورده شده است.



شکل 8: منحنی تغییرات راندمان موتور 30 kW به ازای تغییر قطر همزمان قطر خارجی استاتور و رتور

تغییر طول هسته به عنوان یکی از مشخصات هندسی موتور نه به عنوان یک رویکرد جداگانه، بلکه به عنوان یک نتیجه بیان داشت که طول بهینه از نظر راندمان، همان طول اولیه هسته (طول استک) موتور است. در واقع افزایش و یا کاهش طول هسته، باعث بهبود راندمان موتور مورد مطالعه نشد. جدول (3) نتایج حاصل از اعمال رویکردهای بیان شده را مقایسه می‌کند.

جدول 2: مشخصات هندسی مدل اولیه و مدل بهینه شده در رویکرد تغییر قطر استاتور و رتور به طور همزمان

اندازه (mm)	ابعاد	مشخصات هندسی مدل اولیه
327	قطر خارجی استاتور	
210	قطر داخلی استاتور	
208.7	قطر خارجی رتور	
72	قطر داخلی رتور (قطر)	

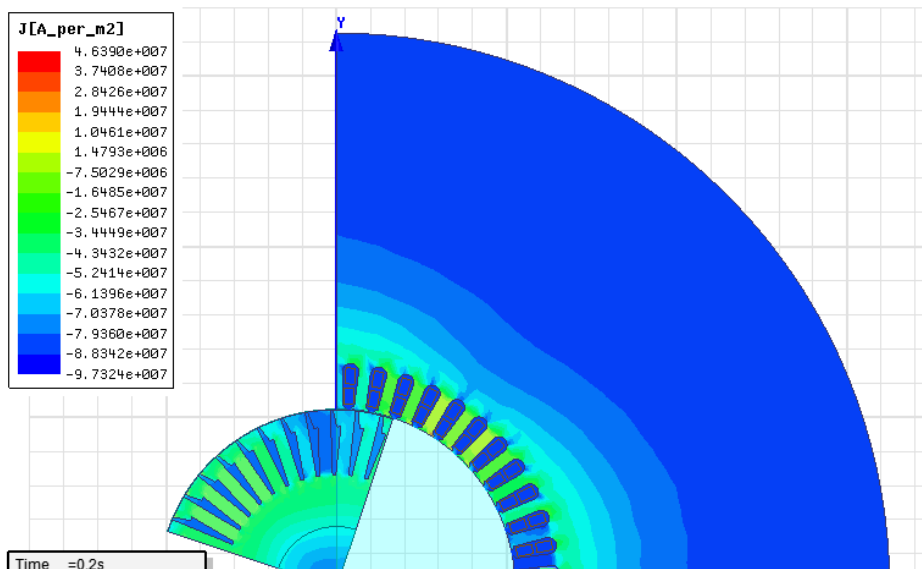


	(شفت)	
420	قطر خارجی استاتور	مشخصات هندسی مدل بهینه شده
260.4	قطر داخلی استاتور	
259.1	قطر خارجی رتور	
122.4	قطر داخلی رتور (قطر شفت)	

جدول 3: نتایج شبیه سازی حاصل از اعمال رویکردها بر روی موتور 30 kW

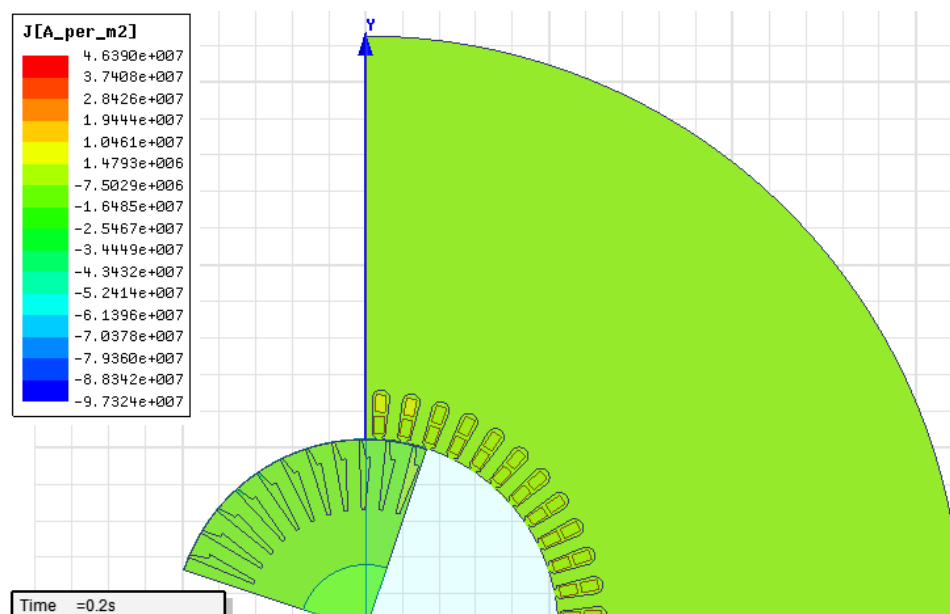
رویکردها		مدل اولیه	پارامترها و مشخصات عملکردی
(2): تغییر همزمان قطر استاتور و رتور	(1): تغییر قطر خارجی استاتور		
93.86	94.3	93.58 8	راندمان (%)
0.926	0.905	0.904	ضریب توان
274.98	336.59	339.82	گشتاور راه اندازی (N.m)
549.21	619.19	193.03	گشتاور ماکزیمم (N.m)
193.13	192.9	622.34	گشتاور نامی (N.m)
207.78	232.99	234.2 2	جریان راه اندازی (A)

با مقایسه داده‌های جدول (3) در تغییر قطر خارجی استاتور، راندمان 0.76 درصد افزایش یافته است این در حالی است که در تغییر همزمان قطر استاتور و رتور، تنها 0.27 درصد راندمان افزایش یافته است ولی ضریب توان در رویکرد (2) نسبت به (1) افزایش قابل توجه ای داشته است. گشتاور راه اندازی در مدل اصلی 339.82 N.m است که در رویکرد (1)، گشتاور راه اندازی 336.59 N.m است که کاهش زیادی پیدا نکرده است ولی در رویکرد (2) گشتاور راه اندازی برابر 274.89 N.m است که به میزان قابل توجهی نسبت به مدل اولیه کاهش یافته است. با توجه به مقایسه رویکردها با مدل اصلی، رویکرد (1) یعنی تغییر قطر خارجی استاتور نسبت به رویکرد (2) مناسب تر است. از همین رو، توزیع چگالی شار و توزیع چگالی جریان در در مدل بهینه شده یعنی رویکرد (2)، انجام شده است و به ترتیب در شکل (9)، (10) و (11) نشان داده شده است. شکل (9)، توزیع چگالی شار در مدل بهینه شده را نشان می دهد. بر اساس منحنی B-H هسته (شکل 4)، موتور به اشباع نرفته است و در نقطه زانو این منحنی قرار دارد.



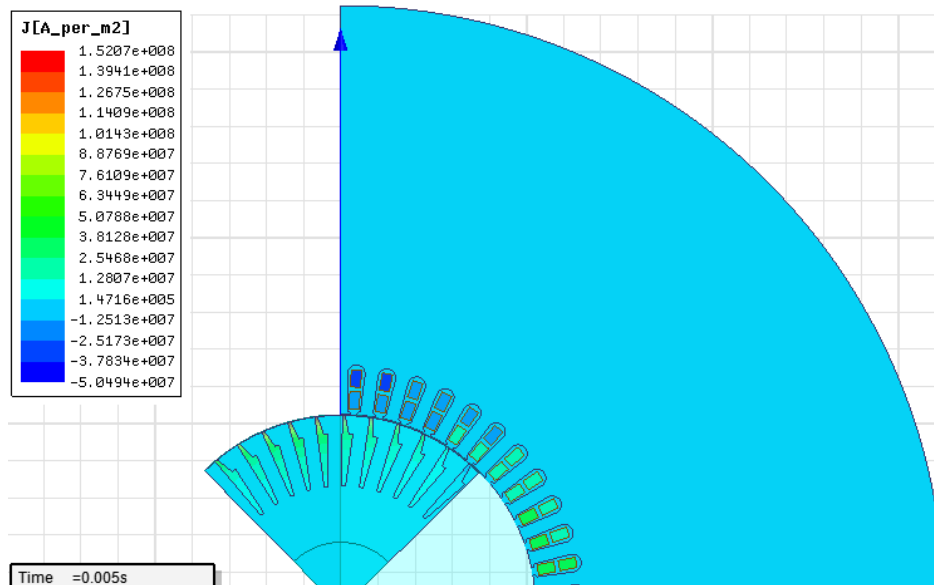
شکل 9: توزیع چگالی شار در هسته مدل بهینه شده در لغزش نامی

چگالی جریان در مدل بهینه شده در شکل (10) نشان داده شده است. همان طور که قبلا بیان شد، جریان در لغزش نامی از تمام شیار رتور عبور می کند که در این شکل به سادگی این مسئله نشان داده شده است.



شکل 10: توزیع چگالی جریان در مدل بهینه شده در لغزش نامی

توزیع چگالی جریان در راه اندازی موتور در مدل بهینه شده نشان داده شده است. همانطور که قبلا ذکر شد، موتورهای القایی در راه اندازی تحت تاثیر اثر پوستی قرار می گیرند و باعث می شود جریان در قسمت بالایی شیار متمرکز شود. این اتفاق در شکل (11) نشان داده شده است.



شکل 11: توزیع چگالی جریان در مدل بهینه شده در راه اندازی و اثبات اثر پوستی

5. نتیجه گیری

هدف این مقاله، بهبود راندمان موتور القایی قفس سنجابی سه فاز است که به عنوان نمونه موتور القایی 30 کیلووات واقعی مورد بررسی قرار گرفت. رویکرد تغییر قطر خارجی استاتور و رویکرد تغییر همزمان قطر استاتور و رتور در نظر گرفته شد تا راندمان موتور القایی بهبود پیدا کند.

در رویکرد تغییر همزمان قطر استاتور و رتور، راندمان 0.27 درصد افزایش پیدا کرد و ضریب توان از 0.904 به 0.923 تغییر پیدا کرد. در رویکرد دوم تنها قطر خارجی استاتور تغییر کرد و در اثر این تغییرات راندمان به 0.76 درصد نسبت به مقدار اولیه بهبود پیدا کرد. این رویکرد راندمان را به خوبی افزایش داد ولی قطر خارجی استاتور از 327 mm به 650 mm زیادتر شد که باعث افزایش زیادی در قسمت آهنی استاتور شد. این افزایش قسمت آهنی ممکن است هزینه تمام شده موتور را افزایش دهد ولی با افزایش راندمان به مقدار 0.76 درصد، باعث صرفه جویی در مصرف برق میشود. همچنین طول هسته (طول استک) موتور هم تغییر کرد ولی نقطه بهینه بهتری نسبت به مدل اصلی پیدا نشد و کاهش یا افزایش طول استک، راندمان موتور راه نسبت به مقدار اولیه یعنی 93.588 درصد کاهش میدهد.

6. مراجع

[1] B. J. Sauer, "Selection of AC Induction Motors for Cement Plant Applications", IEEE Cement Industry Technical Conference Record, 2008.

[2] امیرنظام آذرشب، "کاربرد کنترل کننده های دور موتور در صرفه جویی انرژی در صنایع"، سومین همایش تخصصی گروه صنعتی سیمان تهران- نقش برق و کنترل در ایجاد ارزش پایدار، 1396



- [3] H. J. Lee, S. H. Im, D. Y. Um, and G. S. Park, "A Design of Rotor Bar for Improving Starting Torque by Analyzing Rotor Resistance and Reactance in Squirrel Cage Induction Motor," IEEE Trans. Magn., vol. 54, no. 3, March. 2018.
- [4] H. M. Kim, K. W. Lee, D. G. Kim, J. H. Park, and G. S. Park, "Design of Cryogenic Induction Motor Submerged in Liquefied Natural Gas", IEEE Trans. Mag., Vol. 54, No. 3, Mar. 2018.
- [5] S. Mallik, K. Mallik, A. Barman, D. Maiti, S. K. Biswas, N. K. Deb, and S. Basu, "Efficiency and Cost Optimized Design of an Induction Motor using Genetic Algorithm ", IEEE Trans. Indus. Elect. , vol. 50, no. 2, Feb. 2014.
- [6] D. Zhang , C. S. Park , and C. S. Koh, "A Novel Method for Multi-objective Design and Optimization of Three Phase Induction Machines", IEEE Trans. Mag., Vol. 48, No. 2, Feb. 2012.
- [7] E. B. Agamloh, A. Boglietti and A. Cavagnino, "The Incremental Design Efficiency Improvement of Commercially Manufactured Induction Motors", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 49, No. 6, Nov./Dec. 2013.
- [8] C. G. Heo, H. M. Kim and G. S. Park, "A Design of Rotor Bar Inclination in Squirrel Cage Induction Machines", IEEE Trans. Mag., Vol. 51, No. 11, Nov. 2017.
- [9] J. Yun, and S. B. Lee, "Influence of Aluminum Die-Cast Rotor Porosity on the Efficiency of Induction Machines ", IEEE Trans. Mag., Vol. 54, No. 11, Nov. 2018.
- [10] I. Boldea and S. A. Nasar, "The Induction Machines Design Handbook ", 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Dec 2010.