

طراحی بهینه موتور القائی سه فاز قفس سنجابی برای خودروی برقی

محمد باقر بناء شریفیان و جواد فیض

| | |
|----------------------|--|
| v_a | سرعت خطی (محیطی) روتور بر حسب متر بر ثانیه |
| P_p | تلفات ناشی از فلوی ناشی دندانها بر حسب وات |
| P_K | تلفات ناشی از فلوی ناشی مورب بودن شیارها بر حسب وات |
| P_Z | تلفات ناشی از فلوی ناشی زیگزاگ بر حسب وات |
| P_{b11} | تلفات ناشی از فلوی ناشی میله‌های روتور بر حسب وات |
| T_{pb}, T_{pm} | گشتاور اسمی، گشتاورهای شکست در سرعت‌های حداکثر و اسمی |
| T_n | |
| Q, P | تعداد قطب، قدرت ظاهری بر حسب کیلوولت‌آمپر |
| E_{sl} | $V_{s1}-V_{s1}Z_{s1}/Z_{t1}$ |
| Z_{s1}, Z_{t1} | امپدانس کل و امپدانس استاتور متناظر با هارمونیک اول بر حسب اهم |
| f_{max}, f_b | فرکانسهای اسمی و حداکثر |
| ω_r, ω_s | سرعت‌های سنکرون و مکانیکی در فرکانس اسمی |
| pf, η | بازده و ضریب قدرت |
| C_r, V, W | وزن، حجم و قیمت هسته و سیم‌پیچی‌ها |
| H, J, T | افزایش درجه حرارت، ممان اینرسی و ثابت اینرسی موتور |

۱- مقدمه

تردد خودروها عامل اصلی آلودگیهای تنفسی و صوتی در شهرهای بزرگ است. استفاده از خودروهای برقی می‌تواند حلال این دو مشکل باشد. از جمله مزایای خودروهای برقی امکان دسترسی به انرژی الکتریکی از طریق سیستم توزیع انرژی الکتریکی است. عیب بزرگ این خودروها چگالی کم انرژی الکتریکی و زمان طولانی شارژ باتری‌هاست. بنابراین علاوه بر کنترل مناسب خودرو و مدیریت مناسب انرژی، طراحی بهینه قسمتهای مختلف آن از جمله موتور محرکه نیز ضروری است.

موضوع خودروهای برقی به شروع قرن بیستم (حدود سال ۱۹۱۶) برمی‌گردد. اما بخاطر وفور انرژی فسیلی، عدم احساس مشکل آلودگی هوا و محدودیت منابع انرژی الکتریکی برای مدت زیادی به فراموشی سپرده شد. در حدود سال ۱۹۸۰ بحران انرژیهای فسیلی به دلیل کاهش آنها و افزایش شدید قیمت سوخت، و آلودگیهای صوتی و تنفسی هوا توجه دوباره به خودروهای برقی را موجب شد [۱]. بدین ترتیب خودروهای برقی متفاوتی با موتورهای محرک مختلف طراحی و ساخته شد. از بین موتورهای الکتریکی، موتورهای DC بخاطر سیستم کنترل ساده و موتورهای SR بخاطر ساخت و مونتاژ ساده و کنترل آسان مورد توجه قرار گرفتند. مشکلات ناشی از سیستم کموتاتور و جاروبک موتورهای DC و نیز سر و صدای زیاد موتورهای SR باعث توجه بیشتر به موتورهای AC شد. در سالهای اخیر موتورهای القائی بخاطر ساختمان و مونتاژ ساده، قیمت نازل و چگالی انرژی زیاد مورد علاقه است.

ملزومات اصلی موتورهای EV عبارتند از [۲]: نسبت گشتاور به اینرسی و نسبت قدرت به وزن زیاد، گشتاور شکست زیاد (تا ۴۰۰ درصد)، سرعت زیاد، میزان نویز (سر و صدای) کم، عدم احتیاج به نگهداری، اندازه کوچک و وزن کم، کنترل ساده، قیمت مناسب، بازده زیاد بازای سرعت‌های

چکیده: در این مقاله یک موتور القائی سه فاز قفس سنجابی بعنوان موتور محرک خودروی برقی (EV) به کمک روش بهینه‌سازی هوک-جیوز (HJ) طراحی بهینه می‌شود. طراحی‌های بهینه با تعداد قطبهای مختلف، سرعت‌های اسمی و حداکثر متفاوت، و تعداد شیارهای مختلف با هم مورد مقایسه قرار گرفته و بهترین آنها انتخاب می‌شوند. روش بهینه‌سازی مورد استفاده دارای مزایایی از جمله برنامه‌نویسی ساده، عدم نیاز به گرادیان، زمان همگرایی کوتاه بوده و امکان تغییر تک تک پارامترها را دارد. تغییرات پارامترهای طراحی طرحهای بهینه با سرعت اسمی برای موتورهای ۲ و ۴ قطب نمایش داده شده و مورد بحث قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهند که موتور ۲ قطب با شیارهای استاتور و روتور مستطیلی، و سرعت اسمی ۱۸۰۰ rpm بهترین کارایی را دارد.

کلید واژه: خودروی برقی، موتور القائی، طراحی بهینه.

فهرست علائم

| | |
|---------------------------------------|---|
| P_c, P_{cm} | تلفات فوکو، هیستریزس و هسته متناظر با هارمونیک m ، و |
| P_{hm}, P_{em} | تلفات هسته کل |
| P_{hmi}, P_{mi} | تلفات فوکو و هیستریزس کل و واحد وزن قسمت m ام و هارمونیک m ام |
| P_{emi}, P_{emi} | ثابت تلفات فوکو و هیستریزس |
| K_h, K_e | برای ورق‌های آلیاژ فولاد به ضخامت ۰/۳۵ mm برابر ۳ است |
| σ_h | فرکانس و لغزش متناسب با هارمونیک m ام |
| s_m, f_m | حداکثر چگالی فلوی مغناطیسی متناسب با هارمونیک m ام در قسمت m ام بر حسب تسلا |
| B_{mmi} | برای مواد مغناطیسی امروزی حدود ۲ است |
| k | مقاومت مخصوص بر حسب اهم بر سانتیمتر و ضخامت ورق‌های فولادی بر حسب میلی‌متر |
| t, ρ_t | وزن قسمت m ام هسته بر حسب کیلوگرم |
| G_i | ضریب نفوذپذیری هسته برای هارمونیک m ام |
| K_{Em} | تلفات اهمی و تلفات مکانیکی بر حسب وات |
| P_{fw}, P_{Ω} | مقاومت‌های اهمی روتور و استاتور متناظر با هارمونیک m ام و راکتانس ناشی روتور متناظر با هارمونیک اول |
| X_r, R_{sm}, R_{rm} | جریان‌های روتور، استاتور، ولتاژ و ضریب قدرت ورودی موتور متناظر با هارمونیک m ام بر حسب آمپر و ولت |
| $\cos \phi_m, V_{sm}, I_{sm}, I_{rm}$ | قطر و طول هسته روتور، قطرهای خارجی و داخلی استاتور |
| D, D_o, L, D_r | عرض و عمق شیارهای روتور و استاتور |
| d_s, d_r, W_s, W_r | |

این مقاله در تاریخ ۲۴ آذر ماه ۱۳۸۱ دریافت و در تاریخ ۴ اسفند ۱۳۸۲ بازنگری شد.

محمد باقر بناء شریفیان، دانشکده مهندسی برق دانشگاه تبریز،
(email: sharifian@tabrizu.ac.ir)

جواد فیض، گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشکده فنی دانشگاه تهران،
(email: jawad_faiz@yahoo.com)

جدول ۱: مقایسه نتایج طراحی بهینه پنج روش مختلف.

| مقادیر | قید | اولیه | روش SD | روش DFP | روش P | روش HJ | روش RS |
|------------------------|-------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| گشتاور شکست (pu) | ۲/۲ | ۳/۵۹ | ۳/۰۱ | ۲/۷ | ۳/۰۵ | ۳/۱۲ | ۳/۳۲ |
| گشتاور راه‌اندازی (pu) | ۱/۵ | ۲/۳۸ | ۱/۸۵ | ۱/۵۱ | ۱/۹۱ | ۱/۹۵ | ۲/۲۳ |
| جریان راه‌اندازی (A) | ۶۴ | ۵۶/۷ | ۵۱/۷ | ۴۸/۵ | ۵۰/۹ | ۵۲ | ۵۳/۲ |
| ضریب قدرت | ۰/۸۴۵ | ۰/۸۵۱ | ۰/۸۵ | ۰/۸۸ | ۰/۸۵ | ۰/۸۵ | ۰/۸۵۵ |
| لغزش (%) | ۴ | ۳/۵۲ | ۳/۴۵ | ۳/۲۲ | ۳/۶۱ | ۳/۵ | ۳/۸۳ |
| افزایش درجه حرارت (°C) | ۷۵ | ۵۷/۲۵ | ۶۴/۳ | ۷۲/۵ | ۷۴/۹۶ | ۷۴/۰۵ | ۶۳/۳ |
| قیمت | - | ۳۶۲/۱۹ | ۳۳۱/۰۵ | ۲۹۲/۵۳ | ۲۶۵/۵۸ | ۲۶۳/۸ | ۳۲۵/۹۷ |
| زمان همگرایی (%) | - | - | ۱۰۰ | ۵۰ | ۵۰ | ۱۵ | ۳۵ |
| تعداد تکرار | - | - | ۱۱ | ۳۰ | ۴ | ۳ | ۹ |

بهینه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در بخش پنجم یک موتور نمونه ۱۵ hp طراحی شده و تأثیر پارامترهای فوق‌الذکر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. بالاخره در بخش آخر نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

۲- تأثیر تعداد قطب، نوع شیبار و سرعت اسمی بر روی کارایی موتور

موتور القائی EV باید در محدوده وسیعی از سرعت (صفر تا چندین هزار دور در دقیقه) کار کند. ضمناً سایر ملزومات EV مثل گشتاور کافی در حالت شتاب‌گیری یا کار با سرعت ثابت، ثابت زمانی مکانیکی کوچک (دینامیک سریع)، سر و صدای کم و غیره را باید برآورد. با توجه به محدودیت انرژی باتری باید از انرژی موجود بهترین استفاده بعمل آید، لذا باید بازده زیاد داشته و طرح آن به گونه‌ای باشد که نوسان گشتاور (ناشی از هارمونیک‌های اعمالی از منبع تغذیه اینورتری) حداقل شده و در نهایت سر و صدای کمی داشته باشد. جهت داشتن دینامیک سریع، سیستم باید تا حد امکان کم وزن باشد. البته می‌توان هدف حجم بهینه را برای اشغال کمترین فضا در نظر گرفت. لذا طرح آن متفاوت با طرح موتورهای القائی استاندارد صنعتی است. برای محدود کردن هارمونیک‌های جریان در تغذیه با VSI باید آندوکنتانس نشسته زیاد باشد، اما نه تا آن حد که در سرعت‌های مختلف موتور به ناحیه کار ناپایدار وارد شود. برای کاهش فرکانس کلیدزنی و سرانجام صرف هزینه کم برای آن، و کاهش تلفات کلیدزنی، باید تعداد قطبها کم انتخاب شود. برای کاهش اثر پوستی و تلفات مربوطه نباید از شیبارهای عمیق استفاده کرد، چرا که اصولاً موتور با تغذیه اینورتری مسئله گشتاور راه‌اندازی نخواهد داشت، پس لزومی به استفاده از شیبارهای عمیق روتور نیست [۱۳]، [۱۷] تا [۲۰]. به منظور افزایش شتاب در سرعت‌گیری و همچنین شتاب منفی در حالت ترمزگیری و نیز کاهش مقادیر اسمی عناصر مبدل قدرت (اینورتر)، شعاع روتور تا حد امکان باید کوچک بوده و در عوض طول آن بزرگ انتخاب شود. چون دامنه ولتاژ تغذیه به علت استفاده از باتری محدود است، لذا برای قدرت مشخصی جریان زیاد و هادیها قطور بوده و فضای شیاری بزرگی لازم است. با توجه به سرعت زیاد موتور باید قطر روتور کوچک باشد، لذا تعداد شیبار بر قطب بر فاز کوچک است. بدین ترتیب تعداد قطبهای موتور بین ۲ و ۴ انتخاب می‌شود [۱۳] و [۲۰].

با توجه به فرکانس زیاد در موتور می‌توان با انتخاب مناسب شکل شیبار روتور اثر پوستی و تلفات ناشی از آن را کاهش داد. به این جهت معمولاً در موتورهای القائی سرعت زیاد (مثل EV) شکل شیبار روتور مستطیلی است که طول و عرض آن خیلی به هم نزدیک هستند. ضمناً جهت توزیع بهتر فلو در قسمتهای مختلف شیبار و کاهش تلفات هارمونیک، می‌توان به

مختلف (کم و زیاد) و قابلیت برگشت انرژی در مواقع ترمز و یا حرکت در سرازیری. لازم به ذکر است که موتور القائی قفس سنجایی بیشتر این ملزومات را داراست.

روشهای بهینه‌سازی مختلفی برای طراحی بهینه موتورهای القایی بکار رفته‌اند [۳] تا [۱۶]. این روشها عبارتند از: جستجوی بی‌قاعده (RS)، جستجوی مستقیم (DS) یا هوک-جیوز (HJ)، ساده (S)، پاول (P)، روش دیویدن-فلیچر-پاول (DFP)، روش تندترین شیب فروشو (SD)، جستجوی مستقیم براساس محور چرخان-روزنبرگ (Rosenbrock)، گرادیان مرتبه اول (FOG)، مونیکا (M)، حداقل‌سازی غیرمقیه ترتیبی (SUMT)، برنامه‌ریزی درجه دوم ترتیبی (SQP)، برنامه‌ریزی غیرخطی (NP)، استراتژی تکامل (ES)، الگوریتم ژنتیک (NG) و (NNB). بهینه‌سازی براساس شبکه عصبی (NNB).

جدول ۱ نتایج حاصل از پنج روش بهینه‌سازی مختلف با تابع هدف قیمت مواد مصرفی، در مورد یک موتور القائی ۷/۵ کیلوواتی و چهار قطب را مقایسه می‌کند [۶] و [۷].

مقایسه نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که روش جستجوی مستقیم (HJ) عملکرد بهتری را دارد. بر این اساس و نیز توصیه‌های مؤلفان مختلف [۳] تا [۵]، و [۱۰] روش HJ جهت طراحی بهینه موتور القائی خودروی برقی انتخاب شده است.

علاوه بر پارامترهای ابعادی، کارایی EV وابسته به مقادیر اسمی و پارامترهای ثابت آن نیز می‌باشد. این موارد شامل توان، ولتاژ، سرعت و گشتاور اسمی، حداکثر سرعت و گشتاور، تعداد قطبها و شکل و تعداد شیبارهاست. توان اسمی، حداکثر سرعت، گشتاورهای اسمی و حداکثر براساس کارایی مورد نظر از EV تعیین می‌شوند. ولتاژ سیستم براساس امکانات موجود انتخاب می‌شود. انتخاب ولتاژ زیادتر امکان کارایی بهتر را فراهم می‌سازد، با این وجود بعضی از مشکلات مثل محدودیت ولتاژ باتریها این امکان را محدود می‌کنند. تعداد شیبارها براساس استانداردهای طراحی قابل محاسبه است. سرعت اسمی، تعداد قطبها و شکل شیبارها باید دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرند. بر این اساس بهترین طرح قابل حصول است.

در این مقاله تأثیر تعداد قطب، سرعت اسمی و شکل شیبارها بر روی کارایی موتور القائی سه فاز EV مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. موتور القائی سه فاز ۱۵ hp برای EV با مقادیر مختلفی از این پارامترها بصورت بهینه طراحی شده و سرانجام طرح بهینه نهایی معرفی می‌شود. مقاله شامل شش بخش است. در بخش دوم تأثیر تعداد قطب، سرعت اسمی و شکل شیبارها بر روی کارایی موتور مطالعه می‌شود. در بخش سوم طریقه محاسبه کارایی موتور ارائه می‌گردد. در بخش چهارم طراحی

$$P_{in} = \sum_m \Re V_{sm} I_{sm} \cos \phi_m \quad (7)$$

$$\eta = (P_{in} - P_{loss}) / P_{in} \quad (8)$$

۳-۴ گشتاور اسمی و گشتاورهای شکست در سرعتهای

اسمی و حداکثر:

روابط زیر مقادیر این گشتاورها را بدست می‌دهند:

$$T_n = \sum_m \Re \{ \Delta P R_{rm} I_{rm}^2 / (m f_m s_m) \} \quad (9)$$

$$T_{pb} = \Re \{ \Delta E_{s1} / (X_{r1} \omega_s) \} = T_n R_{r1} / X_{r1} \quad (10)$$

$$T_{pm} = (f_b / f_{max})^2 T_{pb} \quad (11)$$

۳-۵ ثابت اینرسی:

این ثابت که تعیین‌کننده شتابهای مثبت و منفی موتور است، بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$H = \Re \{ \Delta J \omega_r^2 / Q \} \quad (12)$$

۴- طراحی بهینه موتور

روشهای متعددی جهت طراحی بهینه موتورهای القائی ارائه شده‌اند [۳] تا [۱۶] که کمابیش در مورد طراحی بهینه موتورهای القائی EV نیز بکار می‌روند. در مقاله حاضر روش MHJ جهت این کار استفاده شده است [۳] تا [۵] و [۱۰] تا [۱۲]. در این قسمت فقط به ذکر توابع هدف، قیود و متغیرهای بهینه‌سازی موتور القائی EV پرداخته می‌شود. دیدگاه‌های متفاوتی در طراحی بهینه موتور وجود دارند، که عبارتند از: حداقل هزینه، حداکثر بازده، حداقل حجم یا وزن، کارایی خوب (مثل لغزش کم، ضریب قدرت زیاد و ...) و دیدگاه چند وجهی (ترکیب دیدگاه‌های مختلف). در خودروی برقی با توجه به محدودیت انرژی و توان باتری باید حداکثر استفاده از آن صورت گیرد، لذا دیدگاه بازده حتماً مد نظر قرار دارد. ضمناً جهت کاهش وزن کل خودرو و به عبارتی کاهش مصرف انرژی باید موتور کم‌وزن باشد، لذا به نظر میرسد که در مورد طراحی بهینه خودروی برقی دیدگاه چندوجهی با ترکیب بازده و وزن باید بعنوان تابع هدف برگزیده شود. البته می‌توان طراحی را با ترکیبهای مختلفی از این دیدگاهها انجام داده و بهترین آنها را که منتهی به مناسبترین نتیجه مورد انتظار می‌شود بعنوان طرح بهینه برگزید. در مقاله حاضر با توجه به اینکه هدف بیشتر مقایسه تأثیر انتخاب تعداد قطب، نوع شیار و سرعت اسمی در عملکرد پایدار و گذرای موتور است، فقط به تابع بازده بسنده شده است.

در بهینه‌سازی طراحی هدفهای دیگری نیز دنبال می‌شوند که آن بهتر کردن یا حداقل حفظ کارایی مطلوب برای موتور است، که بعنوان اهداف ثانویه می‌توان از آنها نام برد. از آنجا که بزرگ کردن تابع هدف (تابع چندوجهی با اجزاء متنوع و زیاد) باعث کندی عمل بهینه‌سازی و محدودیت گستره جستجوی نرم‌افزار بهینه‌ساز شده و احتمالاً نتایج چندان مطلوبی حاصل نمی‌شود، لذا این اهداف ثانویه مستقیماً در تابع هدف گنجانده نشده، بلکه بصورت قیودی به فرآیند بهینه‌سازی اعمال می‌شوند. مهمترین این قیود که در مقاله حاضر مدنظر قرار گرفته: حداقل ضریب قدرت (۰/۸۵)، حداکثر افزایش درجه حرارت (۷۵ °C)، حداقل گشتاور

طراحی دقیقتر شکل شیار پرداخت [۱۸].

حداکثر سرعت موتور وابسته به سیستم انتقال قدرت انتخابی و حداکثر سرعت خودرو است، ولی سرعت اسمی و مینا (سرعت مینا با سرعت اسمی مساوی انتخاب می‌شود) قطب، نوع شیار، تلفات و سایر شرایط کارایی موتور و نیز عملکرد موتور در حالات گذرا انتخاب می‌شود. انتخاب سرعت اسمی با توجه به فرکانس کار ماشین در این سرعت مستقیماً بر تلفات کلیدزنی و هارمونیکها تأثیر دارد. از طرفی بر روی ممان اینرسی موتور نیز مؤثر خواهد بود، لذا انتخاب بهینه سرعت اسمی می‌تواند شرایط کار بهینه هم در حالت دائم و هم در حالات گذرا را برای موتور و در نهایت برای EV فراهم آورد.

۳- محاسبه مشخصات کارایی

در تغذیه اینورتری موتور القائی علاوه بر هارمونیک اول (اصلی) هارمونیک‌های فرد نیز ظاهر می‌شوند و از این رو مشخصات کارایی این موتور با موتورهای با تغذیه سینوسی متفاوت است. از جمله مشخصات کارایی بازده موتور است. مهمترین تلفات در موتور القائی با تغذیه اینورتری را می‌توان به شکل زیر طبقه‌بندی و محاسبه نمود (البته تلفات دیگری نیز هست که در نرم‌افزار طراحی مدنظر قرار گرفته‌اند ولی در اینجا جهت سادگی از ذکر آنها خودداری می‌شود) [۱۷]، [۱۹] و [۲۱]:

۳-۱ تلفات هسته:

کل تلفات هسته در یک موتور القائی اینورتری را می‌توان به کمک رابطه ۱ محاسبه کرد:

$$P_c = \sum_m P_{cm} = \sum_m (P_{hm} + P_{em}) \quad (1)$$

هر کدام از تلفات فوکو و هیستریزس هارمونیکها ابتدا در واحد وزن قسمتهای مختلف مدار مغناطیسی موتور (هسته) مطابق روابط زیر محاسبه شده و سپس با ضرب در وزن قسمت مربوطه تلفات هارمونیکی هر کدام از این قسمتها به تفکیک برای هر کدام از هارمونیکها محاسبه می‌شود:

$$P_{hm} = \sum_i P_{hmi} = \sum_i G_i P_{hmi} = \sum_i G_i K_h \sigma_h f_m B_{mmi}^k \quad (2)$$

$$P_{em} = \sum_i P_{emi} = \sum_i G_i P_{emi} = \sum_i G_i K_e t^2 f_m^2 B_{mmi}^2 K_{EM} / \rho_i \quad (3)$$

۳-۲ تلفات اهمی استاتور و روتور:

کل تلفات اهمی استاتور و روتور، از مجموع تلفات اهمی مربوط به هارمونیک‌های مختلف جریان بصورت رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_{\Omega} = \sum_m \Re \{ (R_{sm} I_{sm}^2 + R_{rm} I_{rm}^2) \} \quad (4)$$

۳-۳ تلفات مکانیکی (اصطکاک، تهویه و مقاومت هوا):

به کمک رابطه زیر می‌توان این تلفات را در سرعتهای مختلف محاسبه کرد:

$$P_{fw} = \lambda D_r (L + 0/15) v_a^2 \quad (5)$$

سرانجام کل تلفات و بازده عبارتند از:

$$P_{loss} = P_{\Omega} + P_c + P_{fw} + (P_p + P_k + P_z + P_{blt}) \quad (6)$$

جدول ۲: نتایج طراحی بهینه برای شیارهای استاتور و روتور مستطیلی.

| P | ۲ | | | ۴ | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | ۱۶۰۰ | ۱۸۰۰ | ۲۰۰۰ | ۱۶۰۰ | ۱۸۰۰ | ۲۰۰۰ |
| سرعت اسمی (rpm) | | | | | | |
| L (m) | ۰/۰۸۴۹ | ۰/۰۸۵۴ | ۰/۰۷۸۱ | ۰/۱۳۹۸ | ۰/۱۳۲۶ | ۰/۱۳۰۱ |
| D _o (m) | ۰/۲۲۳۴ | ۰/۲۲۰۳ | ۰/۲۲۴۱ | ۰/۲۱۵۹ | ۰/۲۰۷۶ | ۰/۲۰۵۰ |
| D (m) | ۰/۱۲۸۸ | ۰/۱۲۶۴ | ۰/۱۲۹۳ | ۰/۱۳۹۸ | ۰/۱۳۲۶ | ۰/۱۳۰۳ |
| W (kg) | ۴۰/۶۸ | ۳۹/۶۹ | ۳۸/۶۷ | ۳۷/۷۸ | ۳۳/۷۵ | ۳۲/۴۵ |
| V (m ³) | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۰۰۵۱ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۰۰۴۳ |
| C _t (\$) | ۱۲۵/۰ | ۱۲۲/۲ | ۱۱۹/۳ | ۱۱۲/۹ | ۱۰۲/۳ | ۹۸/۷ |
| J (kgm ²) | ۰/۰۲۸۷ | ۰/۰۲۶۵ | ۰/۰۲۷۲ | ۰/۰۴۷۷ | ۰/۰۳۶۹ | ۰/۰۳۳۸ |
| η (%) | ۸۶/۰۰ | ۸۵/۸۵ | ۸۵/۵۰ | ۸۵/۴۷ | ۸۴/۹۹ | ۸۴/۴۳ |
| pf | ۰/۸۶۵ | ۰/۸۶۰ | ۰/۸۵۷ | ۰/۷۴۱ | ۰/۷۳۵ | ۰/۷۲۹ |
| T (°C) | ۷۳/۹۷ | ۷۱/۸۳ | ۶۷/۲۲ | ۷۱/۸۳ | ۷۷/۰۸ | ۷۷/۸۶ |
| T _{pm} (Nm) | ۲/۴۹۵ | ۲/۷۵۹ | ۴/۰۴۲ | ۳/۳۳۵ | ۲/۶۷۷ | ۲/۹۶۲ |
| T _{pb} (Nm) | ۱۱۰/۵۷ | ۹۳/۹۷ | ۸۱/۸۵ | ۱۰۵/۵۲ | ۹۱/۹۳ | ۸۰/۲۴ |
| W _s (m) | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۰۱۱۱ |
| d _s (m) | ۰/۰۲۶۷ | ۰/۰۲۶۷ | ۰/۰۲۶۷ | ۰/۰۲۶۱ | ۰/۰۲۶۱ | ۰/۰۲۶۱ |
| W _r (m) | ۰/۰۱۴۹ | ۰/۰۱۴۶ | ۰/۰۱۴۴ | ۰/۰۱۲۷ | ۰/۰۱۲۴ | ۰/۰۱۲۲ |
| d _r (m) | ۰/۰۲۳۸ | ۰/۰۲۳۴ | ۰/۰۲۴۶ | ۰/۰۱۸۱ | ۰/۰۱۵۳ | ۰/۰۱۴۹ |

جدول ۳: نتایج طراحی بهینه برای شیارهای استاتور مستطیلی و روتور گرد و با سرعت اسمی ۱۸۰۰ rpm.

| P | ۲ | ۴ | P | ۲ | ۴ | P | ۲ | ۴ |
|-----------------------|--------|--------|----------------------|--------|--------|-------------------------------------|--------|--------|
| L (m) | ۰/۱۰۰۰ | ۰/۰۸۴۴ | D _o (m) | ۰/۳۶۲۱ | ۰/۲۲۸۳ | D (m) | ۰/۱۲۶۴ | ۰/۱۳۹۸ |
| W (kg) | ۴۳/۰۶ | ۲۹/۴۹ | V (m ³) | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۰۰۳۵ | C _t (\$) | ۱۳۱/۵ | ۸۹/۲ |
| J (kgm ²) | ۰/۰۲۹۴ | ۰/۰۳۰۸ | η (%) | ۸۵/۰۷ | ۸۵/۲۴ | pf | ۰/۸۵۳ | ۰/۷۴۱ |
| T (°C) | ۷۳/۸۱ | ۷۹/۵۳ | T _{pm} (Nm) | ۴/۱۴۹ | ۳/۶۱۲ | T _{pb} (Nm) | ۱۰۳/۷۲ | ۹۰/۳۰ |
| W _s (m) | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۰۰۹۰ | d _s (m) | ۰/۰۲۶۷ | ۰/۰۳۳۱ | W _r = d _r (m) | ۰/۰۱۷۵ | ۰/۰۱۴۹ |

تغییر و تکرار بهینه‌سازی بترتیب ۱۸ و ۱۳ برای موتور ۲ قطب، و ۲۴ و ۱۸ برای موتور ۴ قطب انتخاب شده‌اند. سرعت اسمی، نوع شیارها و تعداد قطب‌ها از جمله مواردی است که در مقاله بیشتر به اثر آنها پرداخته می‌شود و طرحهای مختلف بهینه با مقادیر مختلف سرعت اسمی، نوع شیار و تعداد قطب مورد بررسی قرار گرفته و کارایی آنها مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار می‌گیرد و در نهایت براساس مقایسه‌های بعمل آمده بهترین طرح ارائه می‌شود.

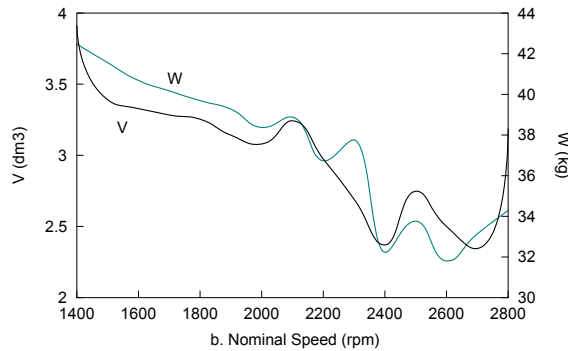
۵- طراحی بهینه موتور نمونه

در این قسمت یک موتور القائی قفس سنجایی نمونه جهت خودروی برقی طراحی و تأثیر انتخاب تعداد قطب، نوع شیارهای استاتور و روتور و سرعت اسمی بر روی مشخصات کارایی موتور مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در طراحی پنج هارمونیک اول ولتاژ تغذیه (هارمونیک‌های ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۷) به ترتیب با مقادیر ۰/۹۷۲، ۰/۰۸۸، ۰/۰۱۹، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۵۰ [۲۲] در نظر گرفته شده‌اند. قدرت اسمی موتور ۱۵ hp و حداکثر سرعت موتور برابر ۹۰۰۰ rpm انتخاب می‌شوند. با توجه به مقایسه‌های بخش ۲ انتخاب تعداد قطب عملاً روی ۲ و ۴ محدود خواهد شد. برای مقایسه اثر شیارها، در حالت حدی دو نوع شیار مستطیلی و گرد مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه افزایش سرعت اسمی کاهش بازده سیستم را به همراه دارد، محدوده سرعت اسمی ۱۶۰۰ rpm تا ۲۰۰۰ rpm انتخاب می‌شود. تعداد شیارهای استاتور و روتور در مورد

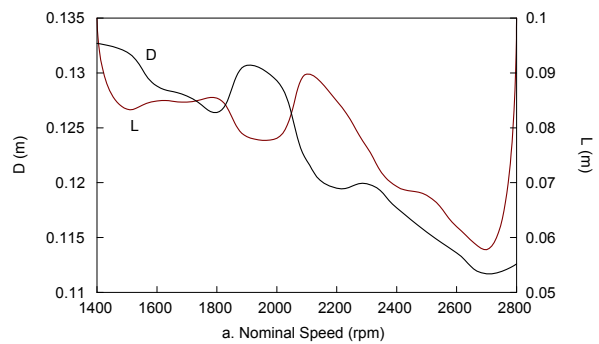
تولیدی، حداقل نسبت گشتاور شکست به اسمی در سرعت اسمی (۱/۵)، حداقل گشتاور شکست در حداکثر سرعت (۳/۵ Nm)، حداکثر سرعت محیطی روتور (۱۲۰ m/s)، حداکثر ثابت زمانی روتور (۴ s)، حداکثر چگالی فلوی دندانه استاتور (۱/۲ T)، حداکثر قیمت تمام شده (در صورت لزوم) و حداکثر وزن یا حجم (در صورتی که جزء تابع هدف نباشد).

تعداد متغیرهای طراحی موتور القائی زیادند. غالباً هر چه تعداد متغیرهای بهینه‌سازی بیشتر باشد نتیجه بهینه‌سازی بهتر است، ولی در عوض سرعت همگرایی بسیار کم شده و نیز کنترل عمل بهینه‌سازی مشکل خواهد بود. لذا سعی می‌شود تا حد امکان از افزایش بیش از حد تعداد متغیرها جلوگیری شده و ضمناً متغیرهایی بعنوان متغیرهای اصلی بهینه‌سازی استفاده شوند که تأثیر بیشتری بر روی طرح بهینه دارند. بر این اساس در مقاله حاضر این متغیرها عبارتند از: قطر داخلی استاتور، طول هسته، پهنا و عمق شیار استاتور، پهنا و عمق شیار روتور، عمق طوقه‌های استاتور و روتور، طول فاصله هوایی، سطح مقطع حلقه‌های انتهایی روتور و متوسط چگالی فلوی فاصله هوایی.

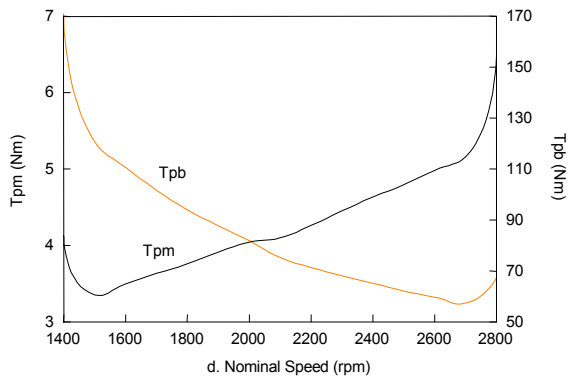
علاوه بر این متغیرها، متغیرهای دیگری از جمله ولتاژ کار، سرعت‌های اسمی و حداکثر، تعداد شیارهای استاتور و روتور، نوع شیارهای استاتور و روتور، و تعداد قطبها را نیز می‌توان ملحوظ کرد. در مقاله حاضر ولتاژ کار موتور با توجه به محدودیت ولتاژ باتریها و سایر قیود برابر ۹۶ V انتخاب شده است. حداکثر سرعت موتور با توجه به حداکثر سرعت درخواستی خودرو ۹۰۰۰ rpm اختیار شده است. تعداد شیارهای استاتور و روتور با



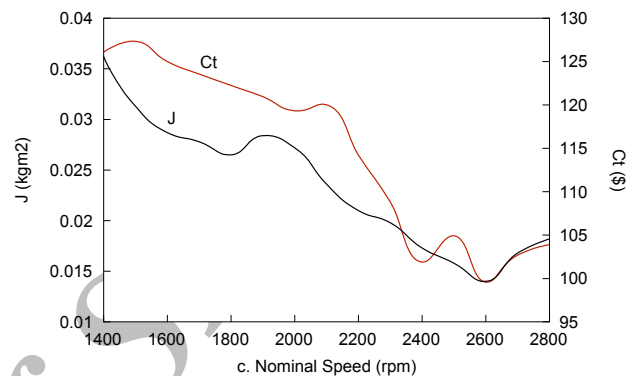
(ب)



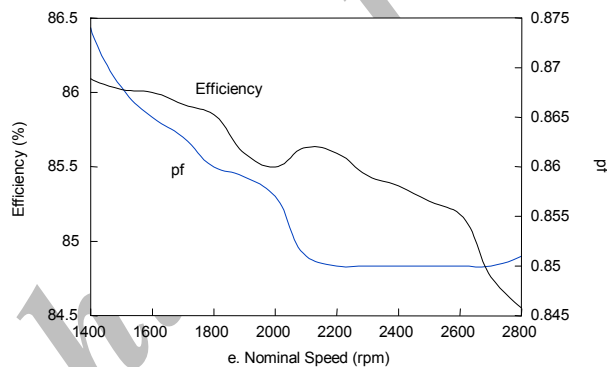
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۱: تغییرات مشخصات و پارامترهای اصلی موتور برای طرح‌های ۲ قطب با افزایش سرعت اسمی.

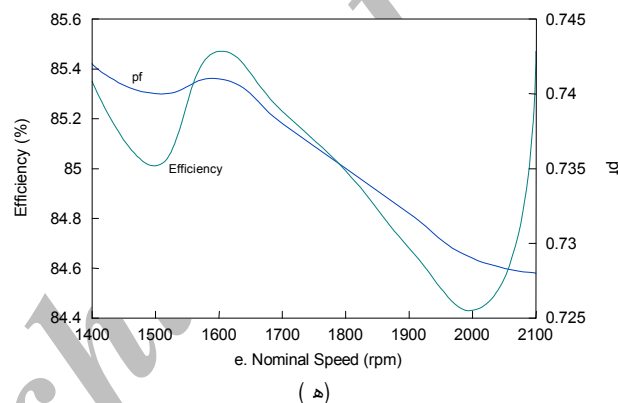
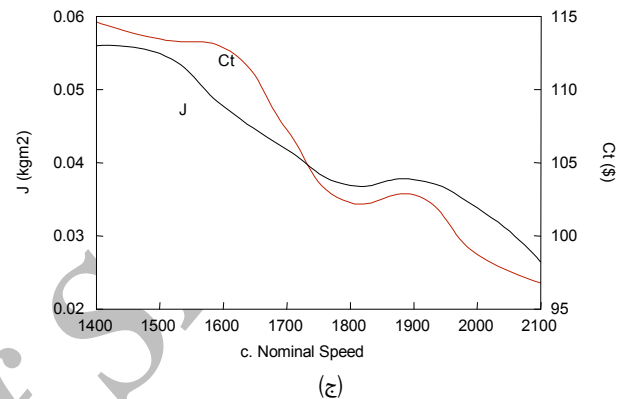
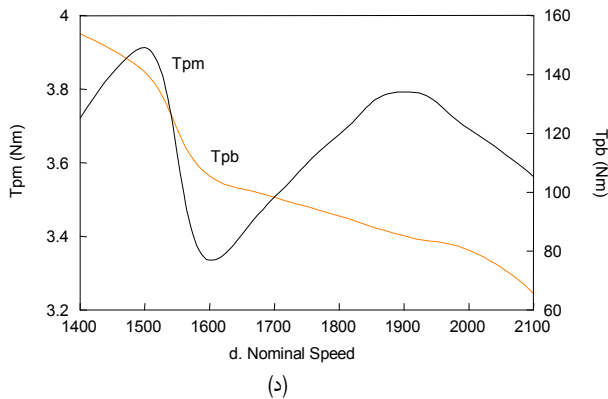
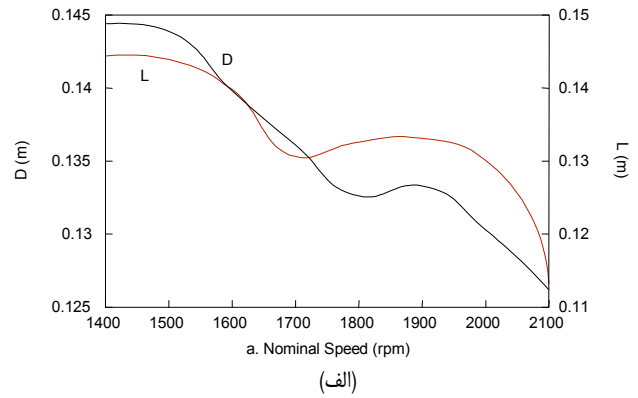
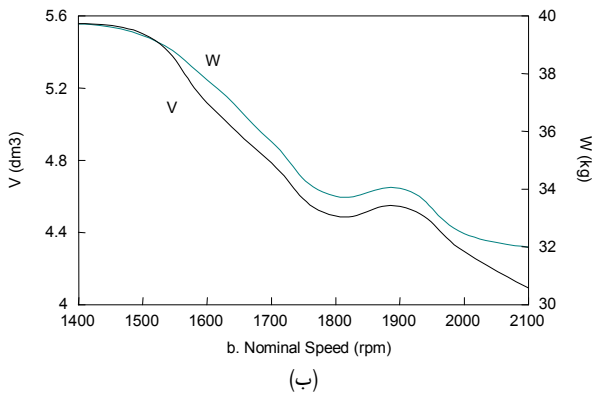
نشده ولی در موتور ۲ قطب برآورده شده است. گشتاور شکست در حداکثر سرعت موتور ۲ قطب بیشتر است (بطور متوسط ۲/۸۵ درصد)، پس موتور ۲ قطب می‌تواند اضافه بار بیشتری در حداکثر سرعت داشته باشد. گشتاور شکست در سرعت اسمی موتور ۲ قطب بطور متوسط ۳/۰۴ درصد بیشتر است، پس موتور ۲ قطب می‌تواند اضافه بار بیشتری در سرعت اسمی و نیز شتاب دینامیک بیشتری داشته باشد. قید افزایش درجه حرارت در تمامی طرح‌های ۲ قطب برآورده شده، اما در مورد طرح‌های ۴ قطب فقط برای سرعت اسمی ۱۶۰۰ rpm برآورده شده است.

قیمت طرح‌های ۲ قطب بیشتر است (بطور متوسط ۱۴/۳۵ درصد). تقریباً نتایج مشابهی در مورد طرح‌های با شیارهای مستطیلی برای استاتور و گرد برای روتور (جدول ۳) قابل حصول است. در کل می‌توان نتیجه گرفت که طرح‌های با شیارهای استاتور و روتور مستطیلی از شرایط کارایی بهتری نسبت به طرح‌های با شیار استاتور مستطیلی و شیار روتور گرد برخوردارند.

طرح ۲ قطب بترتیب ۱۸ و ۱۳، و در مورد طرح ۴ قطب بترتیب ۲۴ و ۱۸ انتخاب شده‌اند. در جداول ۲ و ۳ نتایج طراحی‌های بهینه مختلف بترتیب برای شیارهای استاتور و روتور مستطیلی، شیارهای استاتور مستطیلی و روتور گرد آورده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که برای شیارهای استاتور و روتور مستطیلی:

حجم موتور ۲ قطب برای سه سرعت اسمی بصورت قابل ملاحظه‌ای کمتر از آن برای موتور ۴ قطب است (بطور متوسط ۴۳٪). قطر داخلی استاتور موتور ۲ قطب کوچکتر و بر عکس قطر خارجی استاتور آن بزرگتر از موتور ۴ قطب است. بر خلاف حجم بزرگتر موتور چهار قطب، وزن آن کمتر است (بطور متوسط ۱۴ درصد).

ممان اینرسی روتور موتور ۲ قطب بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از آن در مورد موتور ۴ قطب است (بطور متوسط ۴۹٪). بازده موتور دو قطب بطور متوسط ۰/۹۶ درصد بیشتر از موتور ۴ قطب است. ضریب قدرت موتور ۲ قطب بطور متوسط ۱۷ درصد بیشتر از آن در موتور ۴ قطب است، همچنین قید ضریب قدرت در موتور ۴ قطب برآورده



شکل ۲: تغییرات مشخصات و پارامترهای اصلی موتور برای طرحهای ۴ قطب با افزایش سرعت اسمی.

سرعت اسمی از دید حجم، وزن، ممان اینرسی و قیمت مطلوبست، خود این موارد در انتخاب موتورهای محرکه خودروهای برقی شایان اهمیت هستند. پس باید یک گزینه با توجه به مطالب فوق و اولویت بندی مورد نظر در مورد موتور محرکه انتخاب شود، به گونه ای که تا حد امکان تمامی اهداف اصلی و اهداف ثانویه در حد مطلوب و مورد نظر برآورده شوند.

در طراحی بهینه موتور فقط تلفات خود موتور در نظر گرفته شده و تلفات کلیدزنی در نظر گرفته نشده اند. هرگاه تلفات کلیدزنی نیز در نظر گرفته شود با توجه به آنکه افزایش سرعت اسمی باعث افزایش تلفات کلیدزنی و افزایش حجم و مقادیر اسمی عناصر قدرتی مبدل خواهد شد، لذا افزایش سرعت اسمی از این لحاظ نیز مردود است.

۶- نتیجه گیری

بررسی و تحلیل طرحهای مختلف با ترکیبهای متفاوت نتایجی به شرح زیر بدست می دهد:

- با وجود انتخاب ولتاژ تغذیه کم (به جهت محدودیت ولتاژ باتریها) و

جهت مقایسه بیشتر و بهتر تأثیر سرعت اسمی بر روی عملکرد موتورها، تعدادی از پارامترهای جدول ۲ بصورت منحنی برحسب سرعت اسمی رسم شده اند. شکل های ۱-الف تا ۱-هـ به ترتیب منحنی تغییرات قطر داخلی استاتور، طول هسته، حجم هسته، وزن هسته و سیم پیچی ها، ممان اینرسی، قیمت، گشتاور شکست در سرعت های حداکثر و اسمی، بازده و ضریب قدرت را با تغییر سرعت اسمی از ۱۴۰۰ rpm تا ۲۸۰۰ rpm برای طرح های ۲ قطب، نشان می دهند. شکل های ۲-الف تا ۲-هـ همین منحنی ها را برای طرح های ۴ قطب در محدوده سرعت اسمی ۱۴۰۰ rpm تا ۲۱۰۰ rpm نشان می دهند.

در مورد هر دو طرح ۲ و ۴ قطب افزایش سرعت اسمی بطور متوسط باعث کاهش طول هسته، قطر داخلی استاتور، حجم و وزن، ممان اینرسی، قیمت، گشتاور شکست در سرعت اسمی، بازده و ضریب قدرت شده و برعکس گشتاور شکست در سرعت حداکثر تقریباً افزایش می یابد. با توجه به اینکه تابع هدف بهینه سازی بازده است، لذا می توان گفت که افزایش سرعت اسمی باعث کاهش کیفیت طرح شده و یا به عبارتی کاهش سرعت اسمی باعث بهینه تر شدن طرح می شود. از طرفی افزایش

- [13] Z. Zhang, F. Profumo, and A. Tenchoni, "Improved design for electric vehicle induction motor using an optimization procedure," *IEE in Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 143, no. 6, pp. 410-416, Nov. 1996.
- [14] K. N. Pavithran, R. Parimelagan, G. Sridhara Rao, and J. Holtz, "Optimum design of an induction motor for operation with current source inverters," *IEE in Proc. Part B*, vol. 134, no. 1, pp. 1-8, Jan. 1987.
- [15] M. K. Kim, C. G. Lee, and H.K. Jung, "Multiobjective Optimal design of three-phase induction motor using improved evolution strategy," *IEEE Trans. On Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 2980-2983, Sep. 1998.
- [16] D. H. Cho and H. K. Jung, "Induction motor design for electric vehicle using a niching genetic algorithm," in *Proc. Int. Conf. IEMD '99, Electric Machines and Drives*, pp. 290-292, May 1999.
- [17] S. C. Park, "A Study of system losses in a transistorized inverter-induction motor drive system," *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 21, no. 1, pp. 248-258, Jan./Feb. 1985.
- [18] H. P. Nee, "Rotor slot design of inverter-fed induction motors," *Electrical Machines and Drives Conf. Publication*, no. 412, pp. 52-56, Sep. 1995.
- [19] M. Rammemoorthy, *Computer-Aided Design of Electrical Equipment*, John Wiley & Sons, 1988.
- [20] A. Harson, P. H. Mellor, and D. Howe, "Design considerations for induction machines for electric vehicle drives," *Electrical Machines and Drives Conf. Publication*, no. 412, pp. 16-20, Sep. 1995.
- [21] A. K. Sawhney, *A Course in Electric Machine Design*, Dhanpat Rai & Sons, 1991.
- [22] K. Thorborg, *Power Electronics*, Prentice Hall, 1988.

محمدباقر بناء شریفیان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق-قدرت در تخصص ماشینهای الکتریکی-موتورهای القایی و خودروهای برقی، بترتیب در سالهای ۱۳۶۸، ۱۳۷۰ و ۱۳۷۹ در دانشگاه تبریز به پایان رسانیده و هم اکنون عضو هیات علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه تبریز می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان طراحی، کنترل، مدلسازی و شبیه سازی موتورهای القایی صنعتی و کاربرد خودروی برقی، شبیه سازی ترانسفورمرها، شبیه سازی و مدلسازی موتورهای رلاکتانسی و کنترل توان راکتیو در سیستمهای قدرت می باشد.

جواد فیضی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت به ترتیب در سالهای ۱۳۵۳ و ۱۳۵۴ در دانشگاه تبریز و مقطع دکتری مهندسی برق در تخصص ماشینهای الکتریکی را در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه نیوکاسل انگلستان به پایان رسانید. ایشان تا سال ۱۳۷۸ عضو هیات علمی دانشگاه تبریز بوده و هم اکنون عضو هیات علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان طراحی موتورهای سوئیچ رلکتانس و رلکتانس متغیر، طراحی و مدلسازی ماشینهای الکتریکی و درایوها می باشد.

ملحوظ کردن پنج هارمونیک در شکل موج ولتاژ، نتایج طراحی بهینه مطلوب است.

- مزایای موتور ۲ قطب در مقایسه با موتور ۴ قطب عبارتند از: حجم و ممان اینرسی کم، بازده زیاد، ضریب قدرت بهتر، گشتاور شکست زیاد در سرعتهای حداکثر و اسمی

- معایب موتور ۲ قطب در مقایسه با موتور ۴ قطب عبارتند از: وزن و قیمت زیاد

- شیارهای مستطیلی برای استاتور و روتور در طرح های ۲ قطب منجر به کارایی بهتر موتور در مقایسه با شیارهای مستطیلی برای استاتور و شیارهای گرد برای روتور می شود. برای طرح های ۴ قطب تقریباً عکس موارد فوق صادق است.

- برای طرح های ۲ و ۴ قطب، افزایش سرعت اسمی در مرحله طراحی منتهی به حجم، وزن، ممان اینرسی، قیمت، گشتاور شکست در سرعت اسمی، بازده و ضریب قدرت کم شده و برعکس گشتاور شکست در حداکثر سرعت افزایش می یابد. با در نظر گرفتن تابع هدف (بازده) این نتایج نشان می دهند که افزایش سرعت اسمی به طرح نامطلوب منتهی می شود. در حالی که اهداف ثانویه (حجم، وزن و ممان اینرسی) لازم می دارند که سرعت اسمی زیاد شود. قابل توجه آنکه تلفات کلیدزنی نیز عاملی دیگر برای محدود شدن سرعت اسمی است.

- جمع بندی نتایج بررسی حالت کار دائم، موتور ۲ قطب با سرعت اسمی ۱۸۰۰ دور بر در دقیقه را مناسبترین طرح برای خودروی برقی نشان می دهد.

مراجع

- [1] K. RaJashekar, "History of electric vehicles in general motors," *IEEE Trans. on Ind. App.* vol. 30, no. 4, pp. 897-904, Jul./Aug. 1994.
- [2] H. Shimizu, J. Harada, C. Bland, K. Kawakami, and L. Can, "Advanced concepts in electric vehicle design," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 14-18, Feb. 1997.
- [3] O. W. Andersen, "Optimum design of electrical machines," *IEEE Trans. on Power and Syst.*, no. 6, pp. 707-711, Jun. 1967.
- [4] C. Singh and D. Sarkar, "Practical considerations in the optimization of induction motor design," *IEE in Proc. Part B*, vol. 139, no. 4, pp. 365-373, Jul. 1992.
- [5] R. W. Menzies and G. W. Neal, "Optimization program for large induction motor design," *IEE in Proc.*, vol. 122, no. 6, pp. 643-646, Jun. 1975.
- [6] R. Ramarathnam and B. G. Desai, "Optimization of poly-phase induction motor design: a nonlinear programming approach," *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, vol. 90, no. 2, pp. 570-578, Mar./Apr. 1971.
- [7] R. J. Ringlee and B. F. Wollenberg, "Overview of optimization methods," *IEEE Tutorial Course: Application of Optimization Methods in Power Systems*, pp. 5-188, 1976.
- [8] K. Idir, C. Liuchen, and H. Dai, "A neural network-based optimization approach for induction motor design," in *Proc. Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, pp. 951-954, CCECE'96, May 1996.
- [9] X. Lliu and G.R. Slemon, "An improved method of optimization for electrical machines," *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 6, no. 3, pp. 492-495, Sep. 1991.
- [10] J. Faiz and M. B. B. Sharifian, "Comparison of two optimization techniques for the design of a three-phase induction motor using three different objective functions," *European Transactions on Electrical Power Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 199-205, May/June. 1995.
- [11] J. Faiz and M. B. B. Sharifian, "Trend of optimization in optimum design of a three phase squirrel-cage induction motor using three different objective functions," *IE(I) Journal*, vol. 77, pp. 194-201, India, Feb. 1997.
- [12] J. Faiz and M. B. B. Sharifian, "Optimum design of a three phase squirrel-cage induction motor based on efficiency maximization," *International Journal of Computers and Electrical Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 367-373, Sep. 1995.