

## طراحی و تجزیه تحلیل اثر فاصله هوایی موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم (pmdc) جهت افزایش راندمان

زهرا حیدران داروقه امنیه<sup>۱\*</sup>، محمد رضایی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دولت آباد، گروه برق، اصفهان، ایران z.heidaran@iauda.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دولت آباد، گروه برق، اصفهان، ایران m.rezaie405@gmail.com

چکیده - یکی از مسائل مطرح شده در طراحی موتورهای الکتریکی، راندمان موتور می‌باشد. راندمان موتورهای الکتریکی یک مبحث استراتژیک و حایز اهمیت در کارایی و ارتباط مستقیم با مأموریت های از پیش تعریف شده دارد. استفاده از موتورهای با راندمان و قابلیت اطمینان بالا همچون موتورهای جریان مغناطیس دائم (PMDC<sup>1</sup>)، چشم انداز روشنی در قابلیت برد و کارایی تجهیزات صنعتی دارد. در این مقاله بوسیله تعیین بهینه مقدار اندازه فاصله هوایی موتور PMDC، طراحی نوین و عملیاتی جهت ساخت ارائه می‌شود. در مرحله اول موتور الکتریکی بوسیله تحلیل عددی طراحی و بهینه‌سازی از لحاظ ابعاد هندسی شده است. در مرحله دوم، موتور در فضاهای دو بعدی و سه بعدی نرم افزار Maxwell بصورت جامع طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مجدد شده است. در مرحله سوم به تحلیل حالت‌های الکترومغناطیسی، گذرا موتور مذکور و افزایش راندمان بالا پرداخته شده است و نتایج بدست آمده مورد بحث قرار گرفته شده است. واژگان کلیدی: موتور PMDC - ایده‌های نو - راندمان - نقطه اشباع

### ۱- مقدمه

است [۴]. از جمله کاربردهای مهم این موتورها در شناورهای زیرسطحی، قایق‌های شناور نظامی و دفاعی، تانک‌های نظامی و سایر کاربردهایی که نیازمند کنترل دقیق گشتاور و یا سرعت می‌باشد ولی در عوض از راندمان پایینی برخوردار هستند و این به این لحاظ می‌باشد که استاتور و روتور سیم‌پیچی شده‌ایی دارند. لذا در این مقاله برای بهبود راندمان و کارایی به طراحی و بهینه‌سازی موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم پرداخته شده است (PMDC).

موتور (PMDC) موتوری است که استاتور آن از مواد مغناطیس دائم ساخته شده و روتور آن کاملاً شبیه به موتور جریان مستقیم معمولی می‌باشد. از مزایای آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- به علت عدم نیاز به مدار میدان خارجی، هیچ گونه تلفات مسی در میدان مغناطیسی وجود ندارد.

موتورهای جریان مستقیم، موتورهای گردانی هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌نمایند. در این موتورها انرژی الکتریکی تحت فرم ولتاژ و جریان مستقیم ظاهر می‌گردد [۱] الی [۳]. موتورهای جریان مستقیم از دو قسمت اصلی زیر تشکیل شده‌اند. الف) قسمت ساکن به نام القاء کننده یا اندوکتور (استاتور) که فوران مغناطیسی را ایجاد می‌نماید که بر این قسمت ساکن قطب‌های اصلی و قطب‌های کمکی قرار می‌گیرند. ب) قسمت گردان بنام آرمیچر یا القاء شونده (اندوئی) که عمل تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی در موتورها را انجام می‌دهد. بین قسمت ساکن و گردان فاصله هوایی وجود دارد. از جمله مزیت‌های این موتورها: برتری گشتاور الکترومغناطیسی موتورهای جریان مستقیم در رقابت با موتورهای جریان متناوب با فرکانس متغییر، کنترل سرعت متغییر و دقیق همچنین بهره‌مندی از منبع تغذیه‌ی غیر ساکن مثل باتری اعتبار و محبوبیت موتورهای جریان مستقیم را در بسیاری از کاربردهای نظامی و صنعتی تحت تاثیر قرار داده

<sup>1</sup> Permanent magnet direct current

ناگهانی) به نقطه اشباع مغناطیسی می‌رسند که این موضوع از عمر موتور کاسته می‌شود و پیامدهای منفی همچون: تداخل میدانی، تشدید پدیده عکس-العمل عرضی آرمیچر و افزایش دمای موتور را دارد.

✓ دسترسی به راندمان بالایی همچون ۸۵٪، با عملکرد مناسب برای انجام ماموریت‌های خاص میسر نبوده است.

لذا برای رفع این مشکلات در موتور (PMDC)، در این مقاله پس از بررسی و مطالعه کلی در مورد موتورهای الکتریکی، ابتدا طرح را به روش تحلیل عددی و با استفاده از منابع علمی موجود طراحی و بهینه‌سازی شده است. در مرحله بعد پارامترهای استخراجی بهینه شده در یکی از تخصصی‌ترین نرم‌افزارهای طراحی موتور روز دنیا قرار گرفته شده و طرح در فضای دینامیکی برای دسترسی به راندمان و کارایی بالا و به روش اجزاء محدود، طراحی و مجدداً بهینه‌سازی شده است. سپس طرح در فضای دو بعدی و سه بعدی طراحی گرفته شده است. در مرحله بعدی طرح بهینه شده در حالت‌های گذرا و در حالت بی‌باری و بارهای ناگهانی (افزایش سرعت ناگهانی) مورد آزمایش قرار گرفته شده است. سپس پارامترهای بهینه شده حاصل از چند مرحله شبیه‌سازی استخراج و با مدل‌های مشابه خارجی که در دنیا طراحی و ساخته شده، مقایسه شده است. طرح ارائه شده اکثر نقص‌های موجود در موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم دنیا را رفع نموده و به تمامی آنها برتری داشت [۶] الی [۸].

#### ۴- محاسبه طرح به روش تحلیل عددی

برخی معادلات اصلی برای طراحی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک با روابط (۱) الی (۱۰) آورده شده است [۹] الی [۱۲].

$$T_e = K \times \phi \times In \quad (1)$$

$$0.5 \leq \frac{D}{P.L} \leq 0.7 \quad (2)$$

۲- به علت عدم نیاز به سیم پیچ میدان، این موتور می‌تواند به میزان قابل توجهی کوچکتر باشد [۵].

در این مقاله یک موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم با رویکرد به ایده‌های نو در مهندسی برق در شرایط گوناگون به روش تحلیل عددی طراحی و سپس با استفاده از نرم‌افزار ماکسول مورد تحلیل الکترومغناطیسی و بهینه‌سازی قرار گرفته شده است.

هدف اصلی این مقاله طراحی و بهینه‌سازی یک موتور (PMDC) با بیشترین راندمان و گشتاور می‌باشد که قابلیت‌های آن از هر جهت با تکنولوژی روز دنیا رقابت کند. از آنجائیکه گزارشات انجام شده در این مقاله یک کار بین رشته‌ای می‌باشد. لذا یک تیم دو نفره متشکل از مهندسين برق الکترونیک و قدرت تشکیل شد و با تلاش‌های زیاد منابع موجود از مقالات مختلف IEEE, ... جمع‌آوری گردید. مباحثی که در زیر می‌آید نتیجه حدود هشت ماه کار گروهی برای انجام گزارشات و نتایج حاصل در این مقاله می‌باشد. با توجه به عملیاتی بودن طرح، این امکان بسیار آسان است که بتوان این طرح را به مرحله ساخت و بهره‌برداری رساند.

#### ۲- تعیین نیازمندی‌ها

موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم مورد استفاده در صنعت بطور معمول باید نیازمندی‌های زیر را برآورد سازند: فاقد نقاط اشباع مغناطیسی، راندمان بالا، گشتاور بالا، انجام ماموریت‌های طولانی، قابلیت اطمینان بالا، ریپل گشتاور کم، و شتاب‌گیری سریع. موتورهای الکتریکی جریان مستقیم مغناطیس دائم، بدلیل داشتن بسیاری از ویژگی‌های فوق، می‌توانند پیشرفت و جایگاه خوبی در صنعت داشته باشند.

#### ۳- گلوگاه‌های طرح

✓ طراحی و بهینه‌سازی جامعی از یک موتور الکتریکی (PMDC) در حالت عددی، دینامیکی و گذرا با راندمان بالا بسیار پیچیده می‌باشد.

✓ موتورهای الکتریکی (PMDC) فعلی مورد استفاده در دنیا، عموماً تحت سرعت‌های ناگهانی (بارهای

ارتفاع شیار روتور	$h$
طول یک حلقه سیم‌پیچی آرمیچر	$Lsp$
تعداد حلقه سری در یک راه جریان	$Ns$
تعداد کل هادی‌های آرمیچر	$Nc$
تعداد هادی‌های واقع در یک شیار	$nq$
تعداد شیار	$Ne$
مقاومت سیم‌پیچ‌های روتور	$Ra$
سطح مقطع هادی‌های آرمیچر	$Scu$
تعداد راه‌های جریان	$2a=2$
راندمان	$\eta$
توان نامی	$PN$
قطر کلکتور	$Dc$

$$Lsp = 2(L + Lt) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} Lg &= (3 - 10)Cm \\ Ld &= (1 - 4)Cm \\ xt &= 45^\circ \end{aligned} \right\} Lt = 2Ld + \frac{\pi(D - h)}{2p \cdot \cos xt} + Lg \quad (4)$$

$$Ns = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{2In} \quad (5)$$

#### ۵- شبیه‌سازی و بهینه‌سازی طرح

نرم‌افزار MAXWELL توانایی حل معادلات الکترومغناطیسی و معادلات دینامیکی، مکانیکی را دارد. از این نرم‌افزار برای طراحی و تحلیل مدل مورد نظر استفاده شده است. در موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم (PMDC) بدلیل فقدان سیم‌بندی استاتور، راکتانس مغناطیس‌کنندگی وجود ندارد. لذا موتورهای (PMDC) نسبت به موتورهای جریان متناوب دارای شکاف فاصله هوایی بزرگ‌تری هستند. از این حیث اندازه فاصله هوایی بر عملکرد موتورهای (PMDC)، در سه حالت مورد بررسی قرار گرفته شده است.

$$(6)$$

$$Nc = 2 \times 2 \times Ns$$

$$(7)$$

$$nq = \frac{Nc}{Ne}$$

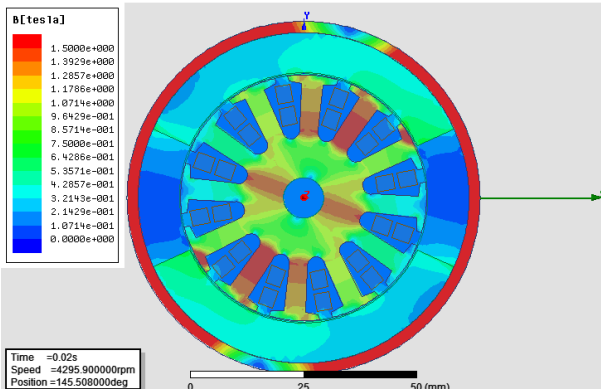
$$Ra = \frac{P\theta \cdot No \cdot Lsp}{2 \cdot Scu \cdot (2a)^2}, p\theta = 0.022 \Omega - mm^2 / m \quad (8)$$

#### ۵-۱- حالت اول: فاصله هوایی ۰,۳ میلیمتر

در این حالت اندازه فاصله هوایی کاهش یافته و به ۰,۳ میلیمتر رسیده است. تاثیر تغییرات در شکل‌های (۱) الی (۲) قابل مشاهده است.

$$if : \eta = 89\% \Rightarrow Pin = \frac{100 + \eta}{2\eta} PN \quad (9)$$

$$Dc \leq D - 2h \cong 0.7D \quad (10)$$

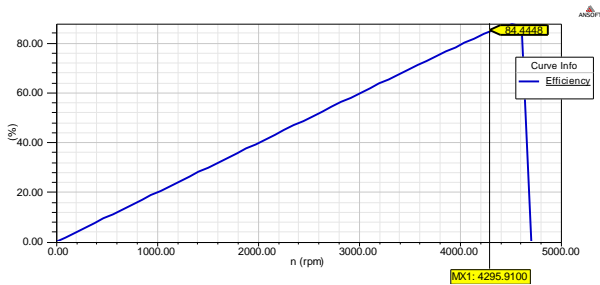


جدول (۱): فهرست نمادها و علائم اختصاری

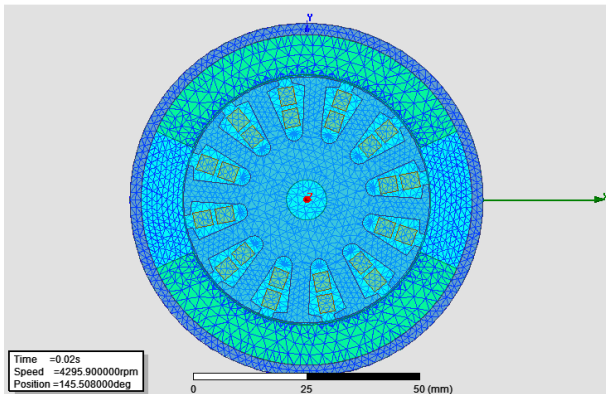
نماد	توضیحات
$Te$	گشتاور الکترومغناطیسی
$K$	عدد ثابت ساختمانی موتور
$D$	قطر روتور
$L$	طول روتور
$Lt$	طول کلاد در قسمت خمش

شکل (۳): نمای توزیع چگالی شار موتور PMDC در حالت بهینه

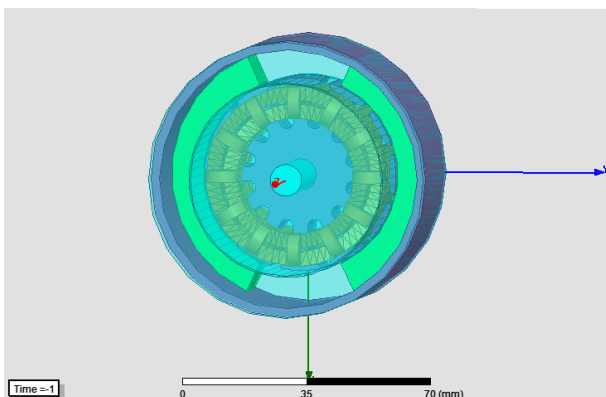
شکل (۳) نمای توزیع چگالی شار موتور را نمایش می‌دهد که هیچ کجا از این شکل از ۱,۵ تسلا تجاوز نکرده و به نقطه اشباع نرسیده است. شکل (۴) نمودار راندمان موتور را با مقدار تقریبی ۰,۸۵٪، شکل (۵) نمایی از تحلیل مش گذاری شده، شکل (۶) نمای سه بعدی طرح و شکل (۷) نمودار توان نامی موتور را در حالت نامی نمایش می‌دهد.



شکل (۴): نمودار راندمان بر حسب سرعت موتور PMDC در حالت بهینه

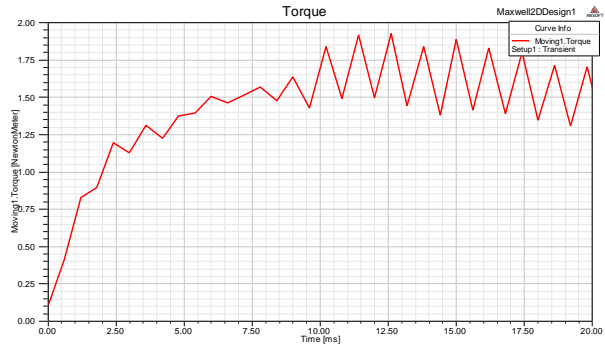


شکل (۵): مدل مش گذاری شده موتور PMDC در حالت بهینه



شکل (۶): نمای سه بعدی موتور PMDC در حالت بهینه

شکل (۱): نمای توزیع چگالی شار موتور PMDC در حالت اول



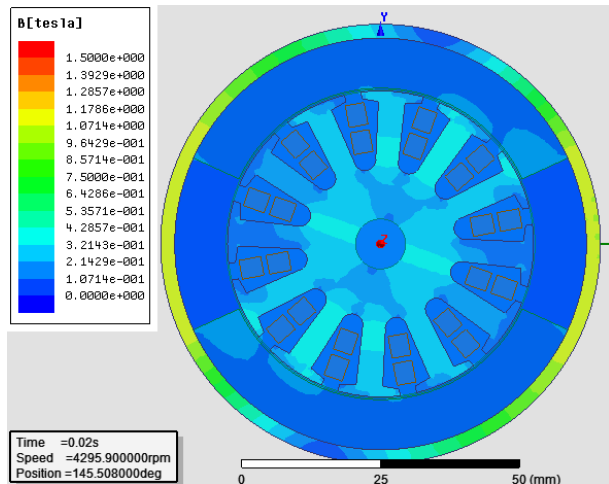
شکل (۲): نمودار ریپل گشتاور بر حسب سرعت موتور PMDC

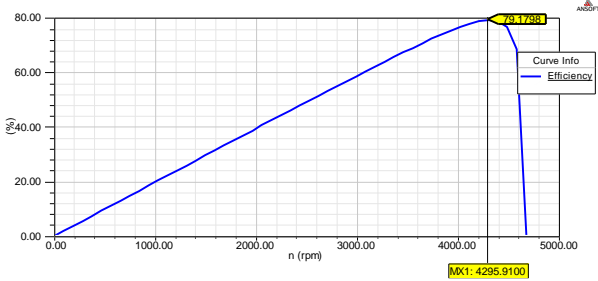
شکل (۱) نمایی از توزیع چگالی شار موتور را در حالت بی-باری نمایش می‌دهد. در این شکل موتور با سرعت نامی خود (۴۲۹۶ دور بر دقیقه) در حال دوران بوده است. با توجه به جدول رنگی کنار شکل (۱) مشخص است که موتور الکتریکی دچار پدیده اشباع مغناطیسی شده است. رنگ قرمز نشان دهنده ۱,۵ تسلا است.

شکل (۲) نمودار ریپل گشتاور را در حالت گذرا نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با کاهش اندازه فاصله هوایی ریپل گشتاور شدیدی در موتور ایجاد شده است. بنابراین این حالت مناسب نمی‌باشد.

### ۵-۲- حالت دوم: فاصله هوایی ۰,۵ میلی‌متر

در این حالت اندازه فاصله هوایی به ۰,۵ میلی‌متر رسیده است. تاثیر تغییرات در شکل‌های (۳) الی (۹) قابل مشاهده است.





شکل (۱۰): نمودار راندمان بر حسب سرعت موتور PMDC در حالت سوم

شکل (۱۰) نمودار راندمان بر حسب سرعت موتور PMDC را اندازه فاصله هوایی ۰,۷ میلی‌متر نمایش می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۱۰) مشخص است، راندمان بطور قابل توجهی کاهش یافته و به ۰,۷۹٪ رسیده است که این یک محدودیت در طراحی ماشین‌های الکتریکی بشمار می‌رود.

#### ۶- نتیجه‌گیری

کاهش اندازه فاصله هوایی باعث افزایش راندمان و همچنین فوران می‌گردد ولی باعث کاهش قدرت موتور و همچنین کاهش گشتاور و افزایش ریپل گشتاور و پدیدار شدن نقاط اشباع می‌شود. افزایش فاصله هوایی هم مزایا و معایبی دارد. با افزایش فاصله هوایی راندمان کاهش ولی قدرت، گشتاور می‌یابد. فاصله هوایی بزرگتر دارای مزایایی همچون:

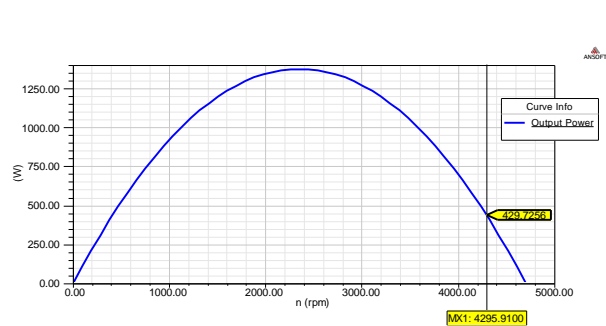
بهبود فرم فوران، کاهش سر و صدا و عملکرد نرم‌تر، سهولت در انجام مکانیکی، افزایش پایداری و کاهش حاصله از ضربه‌ها، هابی که شیارهای آرمیچر تولید می‌کنند، را در قطعات قطبی کاهش می‌دهد ولی در عوض همان‌طور که بیان شد، راندمان را کاهش می‌دهد و باعث افزایش آمپر دورهای سیم‌بندی آرمیچر می‌شود.

#### ۷- مراجع

[1] Z. Jian, W. Xuhui, Z. Lili, "Optimal system efficiency operation of dual PMSM motor drive for fuel cell vehicles propulsion", IEE/PEMC, pp.1889-1892, May 2009.

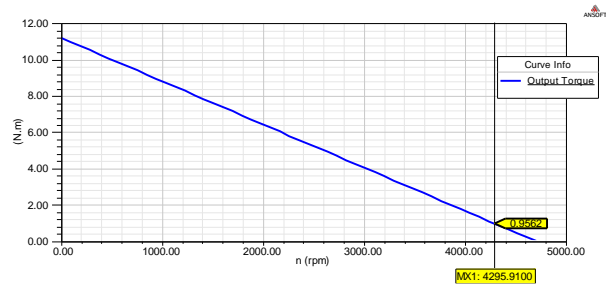
[2] L. Pivano, T.A. Johansen, "A four-quadrant thrust estimation scheme for marine propellers: Theory and experiments", IEEE Trans. on Con. Sys. Tech., Vol.17, pp.215-226, Jan. 2009.

[3] J. Srisertpol, C. Khajorntraidet, "Estimation of DC motor variable torque using adaptive compensation", IEEE/CDC, pp.712-717, June 2009.

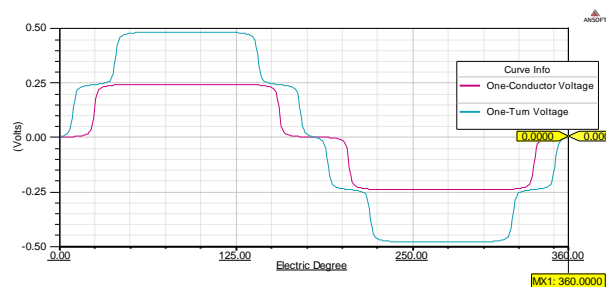


شکل (۷): نمودار توان خروجی بر حسب سرعت موتور PMDC

شکل (۸) نمودار گشتاور و شکل (۹) نمودار Back Electromotive Force موتور PMDC را نمایش می‌دهد. در تمامی شکل‌های (۳) الی (۹) که حاصل تست موتور با فاصله هوایی ۰,۵ است، رفتار موتور الکتریکی PMDC بصورت کاملاً نرمال می‌باشد.



شکل (۸): نمودار گشتاور بر حسب سرعت موتور PMDC



شکل (۹): نمودار Back Electromotive Force موتور PMDC

#### ۵-۳- حالت سوم: فاصله هوایی ۰,۷ میلی‌متر

در این حالت اندازه فاصله هوایی افزایش یافته و به ۰,۷ میلی‌متر رسیده است. تاثیر تغییرات در شکل (۱۰) قابل مشاهده است.

Number of Rotor Slots:	12
Outer Diameter of Rotor (mm):	55
Inner Diameter of Rotor (mm):	9
Type of Rotor Slot:	2
Rotor Slot	
hs0 (mm):	1.2
hs1 (mm):	1
hs2 (mm):	9.8
bs0 (mm):	3
bs1 (mm):	8.6
bs2 (mm):	4
Top Tooth Width (mm):	4.76809
Bottom Tooth Width (mm):	4.1385
Skew Width (Number of Slots):	0
Length of Rotor Core (mm):	40
Stacking Factor of Rotor Core:	0.92
Type of Steel:	M19_24G
Slot Insulation Thickness (mm):	0.5
Layer Insulation Thickness (mm):	0.5
End Length Adjustment (mm):	0
Number of Virtual Slots per Slot:	1
Number of Conductors per Slot:	20
Type of Armature Winding:	Lap Winding
Multiplex Number:	1
Coil Pitch (Virtual Slots):	5
Number of Wires per Conductor:	2
Wire Diameter (mm):	0.95
Wire Wrap Thickness (mm):	0.09
Number of Parallel Branches:	2
Slot Area (mm <sup>2</sup> ):	77.4232
Net Slot Area (mm <sup>2</sup> ):	50.535
Limited Slot Fill Factor (%):	75
Slot Fill Factor (%):	85.612

#### STATOR DATA

Minimum Air Gap (mm):	0.5
Outer Diameter (mm):	79
Length of Stator (mm):	100
Stacking Factor of Iron Core:	1
Type of Steel:	M19_24G
Polar Arc Offset (mm):	0
Polar Arc Radius (mm):	28
Physical Pole Embrace:	0.726
Computed Pole Embrace:	0.72585
Max. Thickness of Magnet (mm):	9
Length of Magnet (mm):	40
Type of Magnet:	XG196/96

#### PERMANENT MAGNET DATA

Residual Flux Density (Tesla):	0.96
Coercive Force (kA/m):	690
Maximum Energy Density (kJ/m <sup>3</sup> ):	183
Relative Recoil Permeability:	1
Demagnetized Flux Density (Tesla):	0.377109
Recoil Residual Flux Density (Tesla):	0.950971
Recoil Coercive Force (kA/m):	756.781

#### COMMUTATOR & BRUSH DATA

Type of Commutator:	Cylinder Type
Commutator Diameter (mm):	24

[4] P. CKrause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill, USA, pp.67-121, 2004.

[5] M. Lankarany, A. Rezazade, "Parameter estimation optimization based on genetic algorithm applied to DC motor", ICEE, pp.1-6, April 2007.

[6] K. Kherraz, "Application of the genetic algorithms to the reduction of order of an engine with D.C current", MCCA, pp.1-6, June 2007

[7] Z. Heidaran and M. Rezaie "Design, analys and optimization in permanent magnet synchronous motor (PMSM)" the international conference on non- linear systems and optimization in computer and electrical engineering on 26-27 may, 2015 Dubai international academic city

[8] M.R. soheily and M. Rezaie "Design, analysis and study effect of the armature slot model and appropriateness of the slot size in optimizing the efficiency and magnetic design of Dc motor" Cumhuriyet University Faculty of Science Science Journal (CSJ), Vol. 36, No: 3 Special Issue (2015) ISSN: 1300-1949

[9] Mounir Zeraoulia., Mohamed El Hachemi Benbouzid, and Demba Diallo "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 55, no. 6, november 2006

[10] Chu Jianxin, Gu Wei, Chen Xiaoya, "Study on Adaptive Control of The Propelling And Turning Manoeuvre of An Autonomous Water Vehicle for Ocean Observation," mts/oceans '08, quebec, pp. 1-4, 15-18-Sept., 2008

[11] Bowes, S.R., Sevinc, A., Holliday, D., "New natural observer applied to speedsensor less DC servo and induction motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 51, No. 5, pp.1025-1032, October 2004.

[12] Jafarboland, M, Sadati, N., Momeni, H., R., "Robust Tracking Control of Attitude Satellite with Using New SMC and EKF for Large Maneuvers," IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, March 4-11, 2006

ضمیمه

#### PERMANENT MAGNET DC MOTOR DESIGN

File: Setup1.res

#### GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):	0.075
Rated Voltage (V):	24
Number of Poles:	2
Frictional Loss (W):	1.89352
Windage Loss (W):	0
Brush Displacement:	10
One-Pair Brush Voltage Drop (V):	1.5
Type of Load:	Fan Load
Operating Temperature (C):	75

#### ROTOR DATA



Total Loss (W): 79.1625  
Output Power (W): 430.166  
Input Power (W): 509.328  
Efficiency (%): 84.4575

Rated Speed (rpm): 4295.91  
Rated Torque (N.m): 0.956206

Locked-Rotor Torque (N.m): 11.1899  
Locked-Rotor Current (A): 244.955

#### COMMUTATING DATA

Induced Voltage by Inductance (V): 0.32291  
Induced Voltage  
by Armature Reaction Field (V): 0.665837  
Induced Voltage by Main Field (V): -0.688652  
Total Induced Voltage (V): 0.300096

#### TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding:  
Number of Turns: 120  
Parallel Branches: 2  
Terminal Resistance (ohm): 0.0918537  
End Leakage Inductance (H): 5.44898e-005  
For One Armature Coil:  
Number of Turns: 10  
Parallel Branches: 1  
Terminal Resistance (ohm): 0.0343317  
End Leakage Inductance (H): 1.81633e-005  
2D Equivalent Value:  
Equivalent Model Depth (mm): 40  
Equivalent Stator Stacking Factor: 2.5  
Equivalent Rotor Stacking Factor: 0.92  
Equivalent Br (Tesla): 0.950971  
Equivalent Hc (kA/m): 756.781  
Estimated Rotor Inertial Moment (kg m<sup>2</sup>): 0.000280288

Commutator Length (mm): 10  
Commutator Insulation (mm): 0.5  
Brush Width (mm): 8  
Brush Length (mm): 8  
Number of Brush Pairs: 1  
Press per Unit Area (g/mm<sup>2</sup>): 2  
Frictional Coefficient: 0.25  
Magnetic Shaft: No

#### MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Density (kg/m<sup>3</sup>): 8900  
Permanent Magnet Density (kg/m<sup>3</sup>): 7800  
Armature Core Steel Density (kg/m<sup>3</sup>): 7650  
Rotor Core Steel Density (kg/m<sup>3</sup>): 7650

Armature Copper Weight (kg): 0.339579  
Permanent Magnet Weight (kg): 0.416291  
Armature Core Steel Weight (kg): 0.38938  
Stator Core Steel Weight (kg): 0.459635  
Total Net Weight (kg): 1.60488

Armature Core Steel Consumption (kg): 0.947033  
Stator Core Steel Consumption (kg): 0.459635

#### NO-LOAD MAGNETIC DATA

Rotor-Teeth Flux Density (Tesla): 1.74966  
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla): 1.75227  
Stator-Yoke Flux Density (Tesla): 2.49336  
Air-Gap Flux Density (Tesla): 0.484889  
Magnet Flux Density (Tesla): 0.420461

Rotor-Teeth Ampere Turns (A.T): 130.808  
Rotor-Yoke Ampere Turns (A.T): 55.2246  
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T): 3391.54  
Air-Gap Ampere Turns (A.T): 223.624  
Magnet Ampere Turns (A.T): -3799.61

Armature Reactive Ampere Turns  
at Start Operation (A.T): 7348.65  
Leakage-Flux Factor: 1  
Correction Factor for Magnetic  
Circuit Length of Rotor Yoke: 0.290625  
Correction Factor for Magnetic  
Circuit Length of Stator Yoke: 0.303911

No-Load Speed (rpm): 4697.74  
No-Load Current (A): 0.294516  
No-Load Input Power (W): 7.06838

Torque Constant KT (Nm/A): 0.0456817  
Back-EMF Constant KE (Vs/rad): 0.0456817

Cogging Torque (N.m): 0.0744286

#### FULL-LOAD DATA

Input Current (A): 21.222  
Armature Current (A): 10.611  
Armature Thermal Load (A<sup>2</sup>/mm<sup>3</sup>): 110.318  
Specific Electric Loading (A/mm): 14.7386  
Armature Current Density (A/mm<sup>2</sup>): 7.48496  
Frictional and Windage Loss (W): 3.38933  
Iron-Core Loss (W): 2.57169  
Armature Copper Loss (W): 41.3685  
Brush Loss (W): 31.833