طراحی، تحلیل و ساخت موتور معکوس‌گرد مغناطیس دائم بدون جاروبک جهت استفاده در سامانه‌های دریایی

علی اکبر دامکی[۱*]، مسلم امینی[۲]، محسن ترابی[۳]

[۱]استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، alidamaki@yazd.ac.ir
[۲]کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، moslemusf@gmail.com
[۳]کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، torabi.mohs@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۷

کلمات کلیدی:
الگوریتم ژنتیک
موتور جریان مستقیم بدون جاروبک
چگالی توان
بازده
تحلیل اجزای محدود

چکیده

موتورهای مغناطیس دائم دارای ویژگی‌هایی همچون چگالی توان بالا، بازده بالا و مشخصه حرارتی مناسب می‌باشند و در بسیاری از صنایع به کار گرفته می‌شوند. هدف از این مقاله، طراحی بهینه و ساخت موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک معکوس‌گرد جهت استفاده در سامانه‌های دریایی می‌باشد. به دلیل محدودیت فضا و نیز عدم تبادل حرارتی با محیط، موتور طراحی شده باید ضمن داشتن چگالی توان بالا، بازده بالایی نیز داشته باشد. برای این منظور با استفاده از معادلات الکترومغناطیسی حاکم بر موتور و به کارگیری الگوریتم ژنتیک، ابعاد بهینه موتور با هدف افزایش چگالی توان محاسبه شده است. همچنین در مرحله طراحی و ساخت ملاحظاتی جهت افزایش بازده در نظر گرفته شده است. به منظور تأیید طراحی، نتایج به دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود Maxwell شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت موتور طراحی شده، ساخته شده و نتایج آزمایشگاهی آن ارائه شده است.

Design, Analysis and Fabrication of a Counter Rotate Brushless Permanent Magnet Motor for Using in Marine Systems

Aliakbar Damaki[1*], Moslem Amini[2], Mohsen Torabi[3]

[1]Assistant professor, Electrical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran, alidamaki@yazd.ac.ir
[2] M.Sc. Student, Electrical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran, moslemusf@gmail.com
[3]M.Sc. Student, Electrical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran, torabi.mohs@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 28 Oct. 2016
Accepted: 28 Nov. 2017

Keywords:
Genetic Algorithm
Brushless DC motor
Power Density
Efficiency
Finite Element Method

ABSTRACT

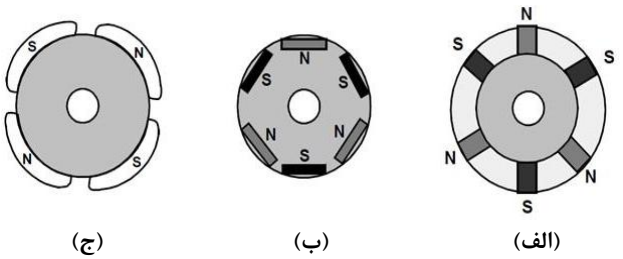
Permanent magnet motors have some advantages including high power density, high efficiency and good thermal characteristic and are used in many industrial applications. The aim of this paper is to present the optimal design and fabrication of a counter rotate brushless permanent magnet motor for using in marine systems. Due to the motor space limitations and lack of heat transmission with the environment, the designed motor must have high power density meanwhile high efficiency. For this purpose, the motor dimensions are calculated with goal of increasing power density by using motor's electromagnetic equation and genetic algorithm. Furthermore, some considerations have been performed in order to increase the motor efficiency. In order to validate the calculated results, the motor has been simulated with finite element method. At the end, the motor has been fabricated according to the calculated parameters and the experiments results have been presented.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.3.1]

۱- مقدمه

در سیستم رانش سامانه‌های دریایی لازم است از موتورهای معکوس‌گرد یعنی موتورهایی که روتور و استاتور در خلاف جهت یکدیگر چرخیده و دو پروانه را در خلاف جهت یکدیگر به چرخش در می‌آورند استفاده شود. در غیر این صورت، اگر تنها از یک موتور استفاده شود به هنگام چرخش موتور یک گشتاور مخالف به سامانه وارد شده و باعث می‌شود سامانه تعادل خود را از دست بدهد[۱]. این سامانه‌ها جهت دستیابی به سرعت و شتاب لازم با محدودیت حجم و وزن روبرو هستند. از این رو به موتوری با بیشترین چگالی توان احتیاج می‌باشد. علاوه بر این به دلیل معکوس‌گرد بودن موتور، روتور و استاتور، اتصالی با بدنه نداشته و تبادل حرارتی آن ها با محیط بسیار کم است. بنابراین لازم است از موتوری با تلفات کم و بازده بالا استفاده شود تا دچار مشکلات حرارتی نگردد. موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک[1] به دلیل داشتن بازده و چگالی توان بالا بهترین گزینه جهت استفاده در این سامانه‌ها می‌باشند. این موتورها دارای ظاهری فیزیکی شبیه به موتورهای سنکرون مغناطیس دائم[2] هستند و عموماً از یک اینورتر شش پالسه تغذیه می‌شوند که یک ولتاژ ثابت را به ولتاژهای سه‌فاز با فرکانس متناظر با سرعت لحظه‌ای رتور تبدیل می‌کند. ترکیب اینورتر و ماشین، مشخصه‌ای شبیه به موتور DC شنت را نتیجه می‌دهد؛ بنابراین آن را موتور DC بدون جاروبک می‌نامند[۲]. استاتور موتور BLDC شبیه به استاتور موتور القایی سه فاز بوده و متشکل از ورقه‌های فولادی به هم پرچ شده و سیم‌پیچ قرار گرفته در شیارهای آن می‌باشد. در این موتورها آرمیچر بر روی استاتور قرار دارد و آهنرباهای نصب شده بر روی رتور، میدان را به وجود می‌آورند[۳].

روتور می‌تواند دارای ساختارهای مختلفی از نظر نحوه قرار گرفتن آهنرباها بر روی آن باشد. شکل ۱ مقطع عرضی ترکیب‌های متفاوت مغناطیس در رتور را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود روتور می‌تواند دارای آهنربای سطحی، آهنربای داخلی و یا آهنربای دفن شده باشد[۴].



شکل ۱ - مقطع عرضی انواع مغناطیس‌های رتور الف) رتور با آهنربای دفن شده ب) رتور با آهنربای داخلی ج) رتور با آهنربای سطحی [۴]

در زمینه طراحی موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک مقالات زیادی ارائه شده است. در [۵] یک موتور BLDC با سیستم کنترل حلقه بسته به همراه مدار درایو از نوع پل H طراحی شده است. در [۶]، [۷]، [۸] طراحی بهینه موتور BLDC مورد استفاده در وسایل نقلیه الکتریکی ارائه شده است. در [۹] دو نوع موتور BLDC و BLAC از نوع رتور خارجی طراحی و مشخصات آنها با یکدیگر به وسیله تحلیل عددی و آنالیز المان محدود مقایسه شده‌اند. در [۱۰] روش کلی طراحی موتور DC مغناطیس دائم بدون جاروبک تشریح شده است و با استفاده از نرم‌افزار MagNet 7.1.1 مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. در [۱۱]، [۱۲] تعدادی از موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک از نوع اسپوک با یکدیگر مقایسه و سپس یک موتور BLDC از نوع اسپوک با روش جدید جهت استفاده در کاربردهای با گشتاور بالا طراحی شده است. در [۱۳] طراحی و تحلیل یک موتور BLDC سرعت بالا جهت کاربرد در سانتریفیوژ ارائه شده است. در [۱۴] طراحی یک موتور BLDC جهت عملکردهای حالت گذرا تشریح شده است. در [۱۵] یک موتور سنکرون مغناطیس دائم معکوس‌گرد جهت استفاده در سامانه‌های زیر آب طراحی و ساخته شده است. به منظور کنترل سرعت موتور PMSM نیز از روش کنترل برداری استفاده شده است. در [۱۶] طراحی یک موتور مغناطیس دائم شار محور معکوس‌گرد برای کاربردهای دریایی ارائه شده است. در [۱۷] یک موتور مغناطیس دائم با قابلیت تحمل دمایی بسیار زیاد جهت سیستم رانش کشتی‌ها طراحی و ساخته شده است. در [۱۸] یک موتور BLDC با توان بالا جهت کاربرد در سامانه‌های زیر آب طراحی و ساخته شده است. در [۱۹] انواع موتورهای مورد استفاده در سیستم رانش کشتی‌ها شامل موتورهای dc، موتورهای القایی، موتورهای سنکرون و موتورهای ابررسانا تشریح شده است. در [۲۰] مدلسازی و شبیه‌سازی یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با سیستم کنترل گشتاور مستقیم به منظور استفاده در سامانه‌های دریایی ارائه شده است.

در این مقاله، در بخش دوم ساختار مناسبی برای موتور معکوس‌گرد تعیین شده است؛ بخش سوم با هدف دستیابی به کمترین طول به طراحی بهینه موتور BLDC می‌پردازد؛ بخش چهارم، ساختار بهینه به دست آمده را با روش اجزاء محدود شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار می‌دهد و در بخش پنجم فرآیند ساخت موتور و تست آزمایشگاهی آن تشریح شده است.

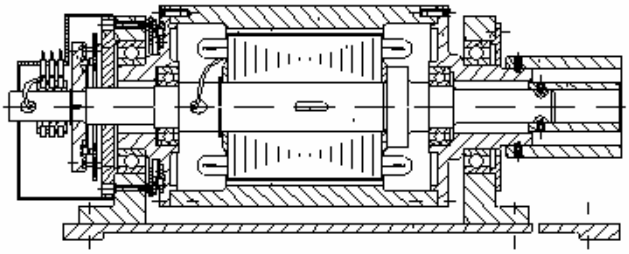
۲- تعیین ساختار موتور BLDC

پیش از به دست آوردن پارامترهای مربوط به طراحی، بایستی ساختار موتور BLDC از لحاظ خاصیت معکوس‌گردی، نوع رتور و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.3.1]

سیم‌پیچ مشخص گردد. برای ایجاد خاصیت معکوس‌گردی برای موتور BLDC روش‌های مختلفی نظیر استفاده از موتور دو رتوره (یکی داخلی و یکی بیرونی) [۲۱]، استفاده از دو موتور یکی به صورت چپگرد و یکی راستگرد [۲۲] و استفاده از موتور شار محور دوبل وجود دارد[۲۳]. در هر سه طرح فوق با توجه به اینکه هر روتور توسط یک سیم‌پیچ مجزا در استاتور درایو می‌شود، کنترل کردن موتور به گونه‌ای که همیشه گشتاور مساوی به دو روتور وارد شود (تا به سامانه گشتاوری وارد نگردد) کار پیچیده و دشواری است. در این پروژه به منظور ایجاد این خاصیت از روش موتور معکوس‌گرد استفاده شده است. به این صورت که هم روتور و هم استاتور بر روی بلبرینگ سوار شده و هر دو قابلیت چرخش خواهند داشت. با فرمان دادن به موتور، روتور و استاتور به یکدیگر گشتاور وارد کرده و در خلاف جهت هم شروع به چرخش می‌کنند. مزیت عمده این طرح آن است که در این فرآیند هیچ گشتاوری به سیستم وارد نشده و حرکت موتور باعث بر هم زدن تعادل و یا چرخش سیستم نمی‌گردد. به همین دلیل این طرح نسبت به طرح‌های دیگر عملی و قابل اجرا می‌باشد. ساختار این طرح در شکل ۲ ارائه شده است[۲۴].

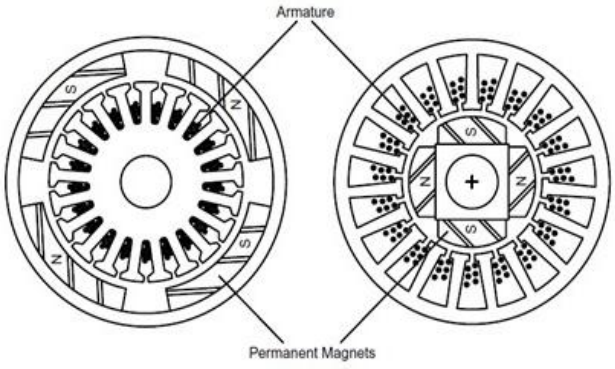


شکل ۲ - مقطع عرضی ساختار معکوس‌گرد [۲۴]

برای تزریق جریان به سیم‌پیچ‌های استاتور از سه عدد جاروبک و حلقه لغزان استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که این جاروبک‌ها بر خلاف جاروبک‌های متصل به کموتاتور موتورهای DC، مشکلات کموتاسیون و ایجاد جرقه و حرارت را ندارند و به خوبی جریان را به داخل استاتور منتقل می‌کنند. برای سنجش موقعیت رتور از روش هارمونیک سوم ولتاژ Back-EMF که یکی از روش‌های تخمین موقعیت بدون سنسور است استفاده می‌شود.

ساختار رتور موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک در دو نوع رتور داخلی و رتور خارجی موجود می‌باشد و در شکل ۳ نشان داده شده است[۲۵].

موتور آهنربایی مناسب در سامانه‌های دریایی، موتور BLDC روتور خارجی می‌باشد. استفاده از روتور خارجی باعث می‌شود قطر فاصله هوایی بیشتر شده و چگالی توان موتور افزایش یابد. علاوه بر این، انتخاب این ساختار باعث می‌شود حجم آرمیچر بیشتر شده و تحمل گرمای بالاتری داشته باشد؛ در نتیجه موتور می‌تواند مدت زمان بیشتری کار کند. همچنین این ساختار از نظر کارایی و پایداری مطمئن است و نسبت به موتور DC موجود مشکل کموتاسیون و چگالی توان به دلیل استفاده از آهنربای دائم را ندارد؛ زیرا مغناطیس دائم، چگالی شار زیادی نسبت به سیم‌پیچ‌های تحریک موجود در موتورهای DC ایجاد می‌کند[۲۶].



(الف) (ب)

شکل ۳ - موتور BLDC الف) رتور داخلی ب) رتور خارجی [۲۵]

سیم‌پیچی آرمیچر در موتورهای مغناطیس دائم بر روی استاتور قرار دارد و همین امر سبب می‌شود حرارت ایجاد شده از طریق بدنه موتور دفع گردد. نحوه سیم‌پیچی بر توزیع mmf و عملکرد موتور به لحاظ بازده، تلفات، چگالی شار فاصله هوایی و ... اثر می‌گذارد و از همین رو انتخاب مناسب نوع سیم‌پیچ (سیم‌پیچی متمرکز یا توزیع شده) برای موتورهای PM از اهمیت بسزایی برخوردار است. موتورهای مغناطیس دائم با سیم‌پیچ متمرکز در سرعت‌های پایین و موتورهای مغناطیس دائم با سیم‌پیچ توزیع شده در سرعت‌های بالا عملکرد خوبی را از خود نشان می‌دهند. از این رو با توجه به سرعت بالای موتور (۴۰۰۰ rpm) بهتر است از ساختار سیم‌پیچ توزیع شده استفاده کرد؛ چرا که به دلیل سینوسی بودن شار و جریان، تلفات موتور کمتر بوده و با توجه به عدم تبادل حرارتی با محیط بیرون، موتور می‌تواند مدت زمان بیشتری کار کند[۲۷].

۳- طراحی بهینه موتور BLDC

در این بخش ابتدا با استفاده از روابط الکترومغناطیسی حاکم بر موتور مغناطیس دائم، مدل تحلیلی موتور استخراج می‌شود و سپس به کمک الگوریتم ژنتیک پارامترهای بهینه موتور به دست می‌آید. هدف از بهینه‌سازی، مینیمم کردن حجم و وزن موتور است. با توجه به اینکه قطر موتور معین است، جهت مینیمم کردن حجم لازم است طول موتور به عنوان تابع هدف انتخاب شده و مینیمم گردد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.3.1]

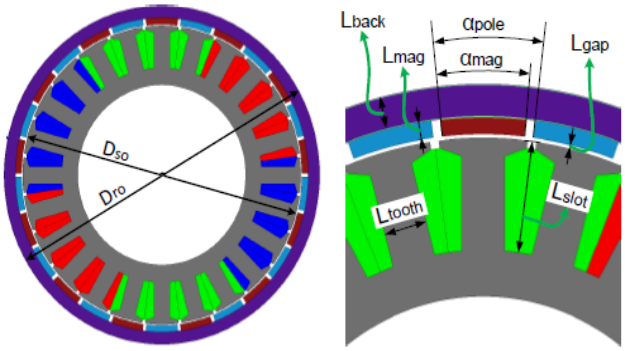
۳-۱- معادلات الکترومغناطیسی

در طراحی بهینه بایستی پارامترهای موتور به صورت مناسب انتخاب گردند. پارامترهای موتور BLDC در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل ۴ نیز پارامترهای ابعادی موتور را به همراه توپولوژی دو بعدی موتور مغناطیس دائم رتور خارجی نشان می‌دهد[۲۸].

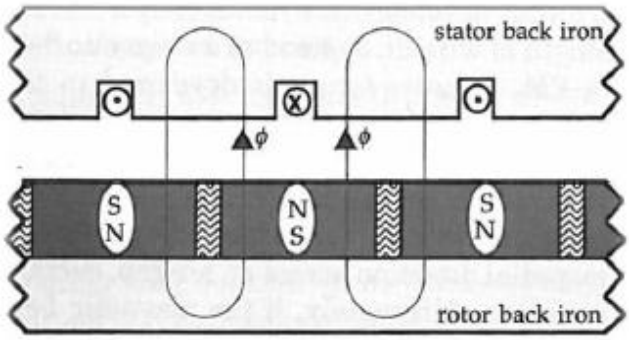
شکل ۵ ساختار پایه موتور BLDC را نشان می‌دهد. رتور از آهنربای دائم که یک در میان جهتشان تغییر می‌کند، تشکیل شده است و آنها به وسیله هوا از استاتور جدا شده‌اند. استاتور نیز از آهن و شیارهایی که سیم‌پیچ‌ها درون آنها هستند تشکیل شده است[۲۹].

جدول ۱ - پارامترهای موتور BLDC

مشخصه	نماد	واحد
توان	P	W
گشتاور نامی	T	N.m
سرعت نامی	N_r	rpm
نیرو محرکه القایی	E	V
تعداد فاز	N_{ph}	
تعداد قطب‌های مغناطیس دائم	N_m	
طول فاصله هوایی	L_{gap}	m
ضخامت آهنربا	L_{mag}	m
شعاع خارجی استاتور	R_{so}	m
شعاع خارجی رتور	R_{ro}	m
طول شیار	L_{slot}	m
طول دهانه شیار	W_s	m
پهنای دندانه شیار	L_{tooth}	m
شعاع خارجی استاتور تا قبل از یوغ	R_{sb}	m
فاصله هوایی مؤثر برای ضریب کارتر	g_c	m
گام قطبی	τ_p	
گام شیار در فاصله هوایی	τ_s	
زاویه شیار بر حسب درجه مکانیکی	θ_s	
زاویه شیار بر حسب درجه الکتریکی	θ_{se}	
نسبت پهنای قطب‌ها به گام قطبی	α_m	
چگالی جریان	J	A/m^2
طول موتور	L	m
تعداد دور سیم‌پیچ در هر شیار	n	
مساحت مغناطیس دائم	A_m	m^2
مساحت فاصله هوایی	A_g	m^2
هدایت مغناطیسی در فاصله هوایی	P_{ml}	
هدایت مغناطیسی آهنربا	P_m	
تعداد شیار بر قطب بر فاز	N_{spp}	
چگالی شار فاصله هوایی	B_g	T
ماکزیمم چگالی تولیدی مغناطیس دائم	B_r	T
ضریب نفوذ پذیری مغناطیس دائم	μ_r	
ماکزیمم چگالی مغناطیسی قابل قبول در آهن	B_{max}	T



شکل ۴ - ساختار دندانه و شیار و توپولوژی دو بعدی موتور مغناطیس دائم رتور خارجی [۲۸]



شکل ۵ - ساختار پایه موتور BLDC [۲۹]

با توجه به شکل، مقدار چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی طبق رابطه (۱) به دست می‌آید[۲۹]، [۳۰]:

$$B_g = \frac{C_\varphi}{1+\mu_r k_c k_{ml}/P_c} B_r \qquad (۱)$$

که C_φ ضریب تمرکز شار، k_{ml} فاکتور شار پراکندگی، P_c ضریب نفوذ پذیری و k_c ضریب کارتر است. محاسبه پارامترهای مذکور به ترتیب بر حسب روابط (۲) تا (۵) به دست می‌آید:

$$C_\varphi = \frac{A_m}{A_g} = \frac{\alpha_m \tau_p L}{\tau_p L(1+\alpha_m)/2} = \frac{2\alpha_m}{1+\alpha_m} \qquad (۲)$$

$$k_{ml} = 1 + 4\frac{P_{ml}}{P_m} = 1 + \frac{4L_{mag}}{\pi \mu_r \alpha_m \tau_p} \ln\left[1+\pi\frac{L_{gap}}{(1-\alpha_m)\tau_p}\right] \qquad (۳)$$

$$P_c = L_{mag}/(L_{gap} C\ ) \qquad (۴)$$

$$k_c = \left[1 - \frac{1}{(\tau_s/W_s)(5(g_c/W_s)+1)}\right]^{-1} \qquad (۵)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.3.1]

پس از به دست آوردن مقدار چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی می‌توان مقدار گشتاور را به ازای ساختار موتور و جریان آن، مطابق رابطه (۶) به دست آورد:

$$T = N_{ph}\, k_d\, k_p\, B_g\, L\, R_{so}\, N_{spp}\, A_s\, J\, k_{fill} \qquad (۶)$$

که A_s مساحت سطح مقطع شیار، k_{fill} ضریب پرشوندگی سیم‌پیچ در شیار، k_d ضریب توزیع سیم‌پیچ و k_p ضریب گام سیم‌پیچ می‌باشد و طبق روابط (۷) تا (۹) تعیین می‌شوند:

$$A_s = L_{slot}\left[\theta_s\left(R_{sb} + \frac{L_{slot}}{2}\right) - L_{tooth}\right] \qquad (۷)$$

$$k_d = \frac{\sin(N_{spp}\,\theta_{se}/2)}{N_{spp}\sin(\theta_{se}/2)} \qquad (۸)$$

$$k_p = \mathrm{int}(N_{spp})/N_{spp} \qquad (۹)$$

حال با استفاده از معادله (۶) و ارتباط توان ورودی و خروجی $T.\omega = E.i$، نیروی ضد محرکه الکتریکی در سرعت نامی ω_m برابر با رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$E = N_{ph}\, k_d\, k_p\, B_g\, L\, R_{so}\, N_{spp}\, n\, \omega_m \qquad (۱۰)$$

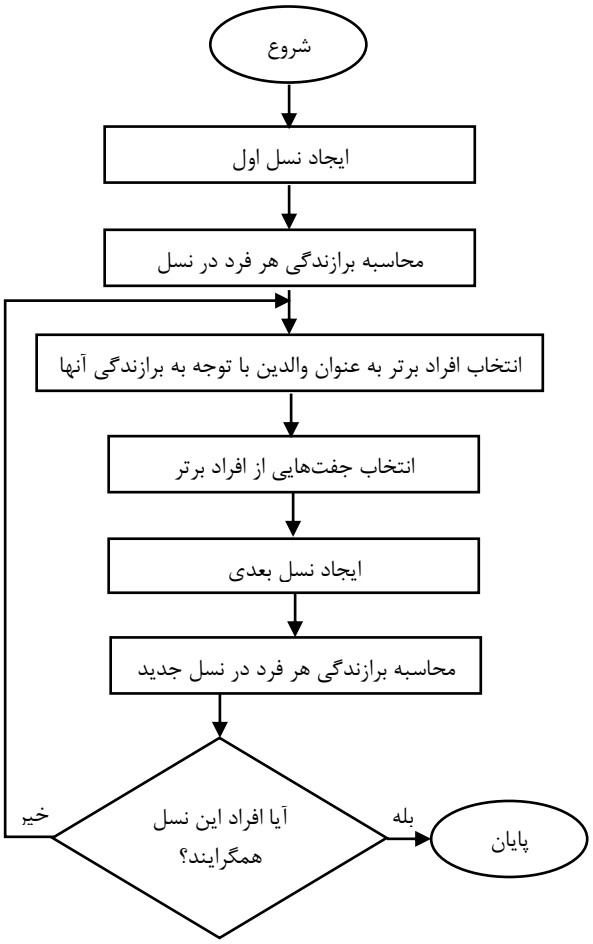
هدف از بهینه‌سازی، کاهش طول موتور تا حد ممکن است و با توجه به رابطه (۶)، مشخص است که طول موتور رابطه مستقیم با گشتاور دارد. در نتیجه می‌توان مطابق رابطه (۱۱) از رابطه گشتاور به راحتی تابع هدف را تعیین کرد. البته باید در نظر گرفت که گشتاور خروجی موتور ثابت است.

$$L = \frac{T}{N_{ph}\, k_d\, k_p\, B_g\, R_{so}\, N_{spp}\, A_s\, J\, k_{fill}} \qquad (۱۱)$$

۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم ریاضی است که در آن یک مجموعه از اشیاء ریاضی که غالباً به صورت رشته‌هایی از کاراکترها با طول ثابت هستند(کروموزوم)، بر پایه نظریه تکامل داروین یعنی بقای نسل برتر با استفاده از اعمال مختلف ژنتیکی، نسل جدید را ایجاد می‌کنند که با توجه به معیاری که وجود دارد، میانگین برتری اعضاء در نسل جدید نسبت به نسل قبل بالاتر است.

در میان روش‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت جاندار، الگوریتم ژنتیک از تکامل یافته‌ترین آنها به شمار می‌رود. اصول اولیه الگوریتم ژنتیک توسط جان هلند از دانشگاه میشیگان آمریکا در سال ۱۹۶۲ ارائه شد. برای به کارگیری الگوریتم ژنتیک ابتدا پارامترهای مسئله به صورت کدهای باینری، کد می‌گیرند. هر جواب با یک برازندگی متناظر است که کیفیت جواب را نسبت به سایر اعضای جمعیت مشخص می‌کند. هر چند برازندگی جواب بیشتر باشد، بخت آن برای بقاء و تولید مثل بیشتر است و در نسل-های بعدی بیشتر ظاهر می‌گردد. یک الگوریتم ساده از سه عملگر انتخاب، جابجایی و جهش تشکیل شده است. هر رشته از صفر و یک‌ها، صورتی کد شده از جواب مسأله بهینه‌سازی راتشکیل می-دهند. الگوریتم ژنتیک با استفاده از عملگرهای جابجایی و جهش، نسل بعدی را از نسل حاظر پدید می‌آورند. این چرخه تا جایی که شرط توقف برآورده شود، ادامه پیدا می‌کند. شکل ۶ شمای کلی الگوریتم ژنتیک یا به اصطلاح الگوریتم استاندارد را نشان می‌دهد [۳۱]، [۳۲].



شکل ۶ - شمای کلی الگوریتم ژنتیک [۳۲]

۳-۳- نتایج بهینه‌سازی

در بخش‌های قبلی روابط مورد نیاز جهت طراحی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک بیان گردید. حال می‌توان با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای موتور BLDC را در بهینه‌ترین حالت ممکن به دست آورد. مشخصات نامی طراحی موتور و محدودیت-های مربوطه در جدول ۲ نشان داده شده است.

به منظور دستیابی به پاسخ بهینه بایستی یکسری از پارامترهای طراحی موتور BLDC به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و محدوده تغییرات پارامترها نیز مشخص گردد که در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.3.1]

جدول ۳ نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است با توجه به اینکه قطر خارجی موتور، پارامتری مشخص و از پیش تعیین شده است، جزء متغیرهای بهینه‌سازی انتخاب نشده است.

این محدودیت‌ها بر اساس تجربه انتخاب شده‌اند تا الگوریتم بتواند در کمترین تکرار به پاسخ بهینه دست پیدا کند و تعدادی از آنها مانند پهنای مغناطیس دائم نمی‌توانند از مقدار مشخصی کمتر باشند؛ زیرا ساخت آنها غیر ممکن است. برای اطمینان، بهینه-سازی ۱۰۰ بار اجرا می‌شود و سپس بهترین نتیجه انتخاب می‌گردد. اندازه جمعیت و تعداد تکرار باید به اندازه کافی بزرگ، جهت اطمینان از همگرایی بزرگ باشند. مقادیر پارامترهای بهینه‌سازی شده در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به پارامترهای بهینه بدست آمده، می‌توان سایر پارامترهای مربوط به طراحی موتور را محاسبه نمود که در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۲ - مشخصات موتور BLDC

پارامتر / اندازه	مقدار	واحد
توان نامی خروجی	۶۳	kW
گشتاور نامی	۱۶۰	N.m
سرعت	۴۰۰۰	rpm
ولتاژ لینک dc	۴۰۰	V
جریان موثر هر فاز	۱۸۰	A
قطر خارجی رتور	۲۶۵	mm
طول موتور	حداقل طول ممکن	mm
بازده	بالای ۹۰	٪
تعداد فاز	۳	
مدت زمان عملکرد	۶۰۰	S
نسبت شیار بر قطب بر فاز	۱/۵	
چگالی جریان	۷	A/mm^2
ماکزیمم چگالی تولیدی مغناطیس دائم	۱	T
ماکزیمم چگالی مغناطیسی قابل قبول در آهن	۱/۷	T
ضریب نفوذ پذیری مغناطیس دائم	۱	

جدول ۳ - پارامترهای بهینه‌سازی و محدوده تغییرات آنها

پارامتر	نماد	محدوده تغییرات	واحد
نسبت پهنای قطب‌ها به گام قطبی	α_m	۰/۷-۰/۹	
ضخامت آهنربا	L_{mag}	۳-۱۰	mm
تعداد قطب‌ها	N_m	۲-۱۰	
طول شعاعی شیار	L_{slot}	۰-۱۲۰	mm
پهنای یوغ استاتور	L_{back}	۱-۳۰	mm
شعاع شفت	R_{si}	۱۰-۵۰	mm
طول فاصله هوایی	L_{gap}	۱-۱/۵	mm

جدول ۴: مقادیر بهینه پارامترها حاصل از الگوریتم ژنتیک

پارامتر	مقدار محاسبه شده	واحد
α_m	۰/۷	
L_{mag}	۳	mm
N_m	۱۰	
L_{slot}	۶۷	mm
L_{back}	۱۵	mm
R_{si}	۴۸	mm
L_{gap}	۱/۵	mm

جدول ۵ - پارامترهای موتورBLDC

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
چگالی شار فاصله هوایی	B_g	۰/۵۷۱۲	T
تعداد دور سیم‌پیچ	N	۲	
پهنای دندانه شیار	L_{tooth}	۶/۳	mm
پهنای دهانه شیار	W_s	۳	mm
مساحت شیار	A_s	۰/۵۱۷	mm^2
ولتاژ Back-EMF (پیک هر فاز)	E	۱۷۰	V
طول موتور	L	۹۰	mm
بازده	η	۹۵/۵۳	٪

۴- شبیه‌سازی

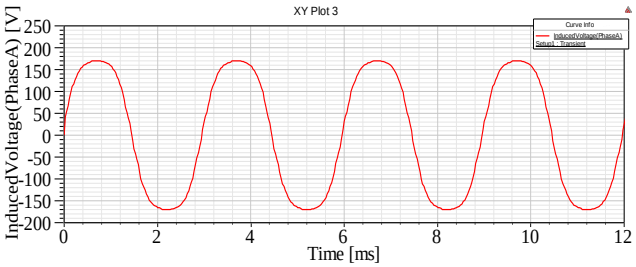
پس از طراحی تحلیلی و مشخص شدن پارامترهای طراحی موتور، به منظور تأیید مقادیر به دست آمده، نیاز به شبیه‌سازی و بررسی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک می‌باشد. از این رو برای تحلیل الکترومغناطیسی طراحی بهینه حاصل شده، از نرم‌افزار اجزای محدود Maxwell استفاده شده است. همانطور که قبلاً بیان شد، ساختار استاتور در نظر گرفته شده برای موتور از نوع شیار کسری با سیم‌بندی توزیع شده و ساختار رتور از نوع روتور خارجی با آهنربای سطحی می‌باشد. تعداد قطب‌های موتور ۱۰ عدد و استاتور دارای ۴۵ شیار است. این سیم‌بندی، هارمونیک‌های فضایی بسیار کمی تولید کرده و تلفات کمی را در آهنربا ایجاد می‌کند و درنتیجه منجر به افزایش بازده موتور می‌گردد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، شکل‌موج Back-EMF فاز در حالت بی‌باری، شکل‌موج گشتاور تولیدی و جریان و سرعت موتور تحت بارنامی و همچنین توزیع چگالی شار در دو حالت بی‌باری و بار نامی در شکل‌های ۷ تا ۱۱ نشان داده شده‌اند.

همانطور که مشاهده می‌شود مقدار گشتاور تولیدی موتور برابر با ۱۶۰ نیوتن متر بوده و با مقدار مورد انتظار مطابقت دارد. سرعت موتور نیز برابر با مقدار نامی یعنی ۴۰۰۰ دور بر دقیقه است. مقدار مؤثر جریان نیز حدود ۱۹۰ آمپر است که به مقدار طراحی شده نزدیک می‌باشد. لازم به ذکر است در این شبیه‌سازی به منظور

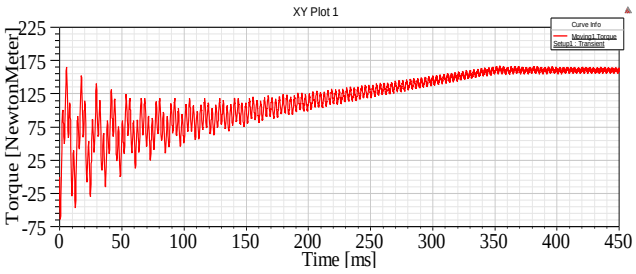
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.3.1]

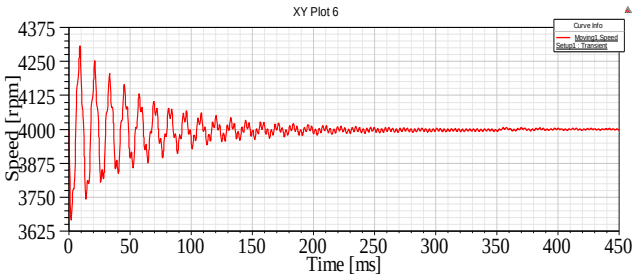
کاهش زمان اجرای برنامه، سرعت اولیه موتور برابر با ۴۰۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شده و برای جلوگیری از ناپایدار شدن موتور، گشتاور بار به تدریج افزایش داده شده است. همچنین مشاهده می‌شود شکل‌موج Back-EMF به شکل‌موج سینوسی بسیار نزدیک است که منجر به کمترین ریپل گشتاور در موتور می‌گردد. با توجه به توزیع چگالی شار نیز در قسمت‌های مختلف موتور، مشخص می‌شود که ماکزیمم چگالی شار در دندانه‌ها و زمانی که زیر قطب‌ها هستند، اتفاق می‌افتد. چگالی شار ماکزیمم در دندانه‌ها در حدود ۱/۸ T است که عدد بسیار مناسبی جهت دستیابی به چگالی توان بالاست.



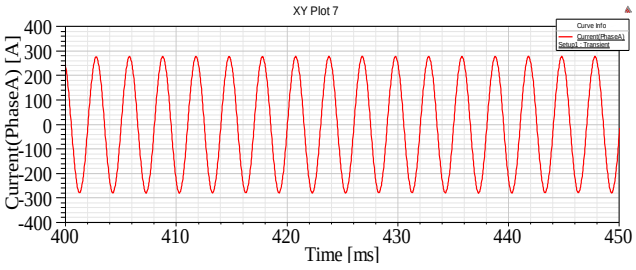
شکل ۷ – شکل‌موج Back-EMF هر فاز



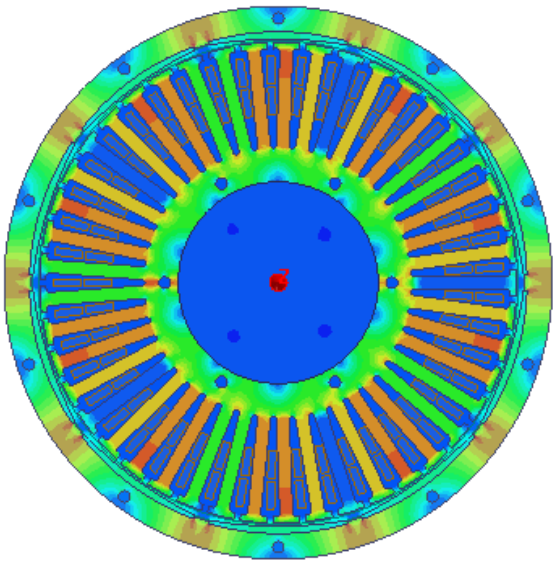
شکل ۸ – شکل‌موج گشتاور تولیدی موتور تحت بار نامی



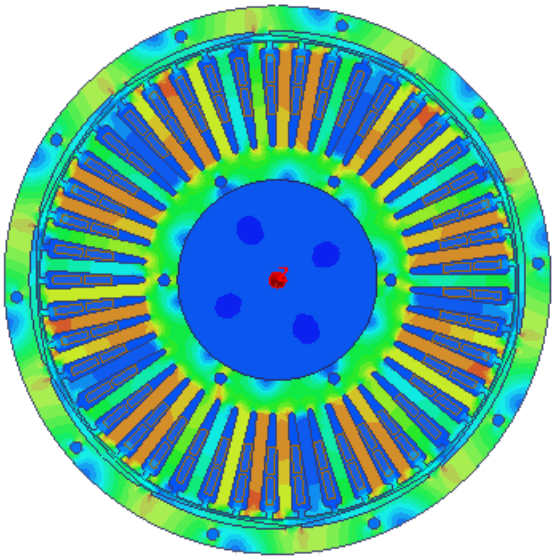
شکل ۹ – شکل‌موج سرعت موتور BLDC در حالت تحت بار



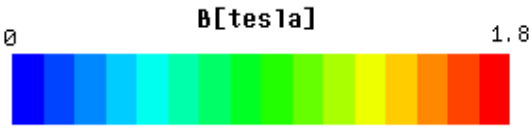
شکل ۱۰ –شکل‌موج جریان موتور BLDC در حالت بارداری



(الف)



(ب)



شکل ۱۱ – توزیع چگالی شار موتور BLDC الف) بی‌باری ب) بار نامی

۵- ساخت موتور

ساخت موتور شامل ساخت استاتور، ساخت روتور و ساخت بدنه و ملحقات موتور می‌باشد. برای ساخت روتور و استاتور از ورق‌هایی به ضخامت ۰/۳۵ میلی‌متر استفاده شده است. در موتورهای معمولی از ورق با ضخامت ۰/۵ میلیمتر استفاده می‌شود؛ اما با توجه به اینکه فرکانس نامی این موتور بالا بوده و برابر با ۳۳۳ هرتز است، لازم است از ورق‌های نازکتر که تلفات آهنی آن کمتر است استفاده شود. آهنرباها نیز از نوع NdFeB هستند که قویترین چگالی مغناطیسی را در بین مواد موجود دارد و بهترین نوع آهنربا است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.3.1]

شکل ۱۲ ورق‌های رتور و استاتور و آهنربای مورد استفاده در موتور را نشان می‌دهد.



(الف)

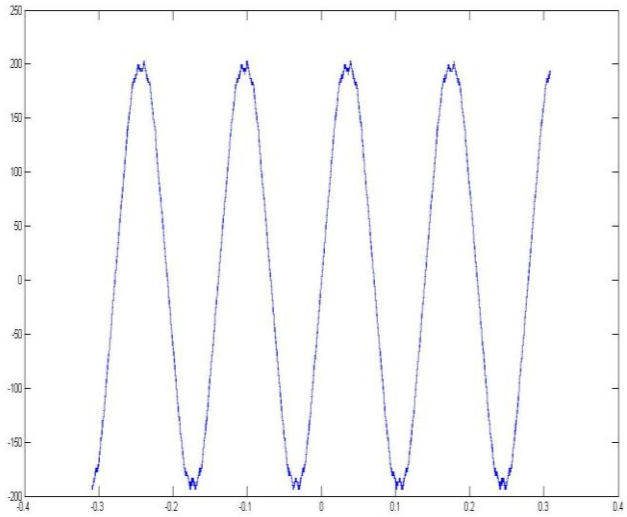
(ب)

شکل ۱۲ – اجزای موتور BLDC الف) ورق‌های رتور و استاتور ب) آهنربای دائم NdFeB

به منظور مقایسه موتور ساخته شده با نتایج حاصل از طراحی اجزاء محدود، ولتاژ بی‌باری (Back-EMF) موتور ساخته شده اندازه-گیری شده است. ولتاژ بی‌باری معیار بسیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد موتور است. برای این کار موتور BLDC با موتور دیگری کوپل شده و با سرعت نامی چرخانده شده است. شکل ۱۳ چیدمان تست موتور را نشان می‌دهد. شکل ۱۴ ولتاژ فاز موتور را در این حالت نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود شکل‌موج حاصل بسیار به شکل‌موج حاصل از تحلیل اجزاء محدود شبیه است؛ اما دامنه ولتاژ تولیدی به دلیل قوی‌تر بودن آهنربای خریداری شده کمی بیشتر از مقدار تئوری است.



شکل ۱۳ – چید مان تست موتور BLDC



شکل ۱۴ – ولتاژ فاز القایی اندازه‌گیری شده

۶- نتیجه گیری

در این مقاله موتور مغناطس دائم بدون جاروبک با چگالی توان بسیار بالا به وسیله معادلات مربوطه و الگوریتم ژنتیک به صورت بهینه طراحی و با استفاده از نرم‌افزار Maxwell شبیه‌سازی گردید و سپس موتور شبیه‌سازی شده ساخته شد. این موتور دارای توان ۶۳ کیلووات است و نسبت به موارد مشابه خود از کاهش طول و وزن قابل توجهی برخوردار است. نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی، شبیه‌سازی و تست عملی، صحت روش طراحی را نشان می‌دهند. به دلیل چگالی توان و بازده بسیار بالا و در ضمن مدت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.3.1]

زمان کارکرد این موتور جهت کاربردهای دریایی و نظامی بسیار مناسب می‌باشد؛ چرا که تجهیزات دریایی نظیر شناورها دارای فضای کم و در عین حال نیازمند نیروی پیشران بسیار بالایی هستند. از این رو موتور DC بدون جاروبک در حداقل حجم و با بالاترین توان ممکن طراحی شده و از نظر حرارتی نیز به گونه‌ای است که بتواند در مدت زمان کارکرد، دمای بسیار زیاد تولید شده را تحمل کند.

کلید واژگان

1- Brushless DC Motor (BLDC)
2- Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

۷- مراجع

1- Adnanes, A.K., (2003), *Maritime electrical installations and diesel electric propulsion*, ABB Marine AS.

2- Hendershot, J.R., and Miller, T.J.E., (2010), *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*, 2nd ed, Motor Design Books LLC.

3- Tangudu, J.K., and Jahns, T.M., (2011), *Comparison of interior pm machines with concentrated and distributed stator windings for traction applications*, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), p.1-8.

4- Yedamale, P., (2003), *Brushless dc (bldc) motor fundamentals*, AN885, Microchip Technology Inc., p.1-20.

5- Wang, H., (2012),*Design and implementation of brushless dc motor drive and control system*, International Workshop on Information and Electronics Engineering, p.2219-2224.

6- Markovic, M., Muller, V., Hodder, A., and Perriard, Y., (2010), *Optimal design of an in-wheel BLDC motor for a kick scooter*, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, p.292-296.

7- Chung, M.J., (2008), *Development of in-wheel motor system using blushless dc motor of hall sensor type*, International Conference on Control, Automation and Systems, p.1508-1511.

8- Nikam, S.P., Rallabandi, V., and Fernandes, B.G., (2012), *A high-torque-density permanent-magnet free motor for in-wheel electric vehicle application*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.48, No.6, p.2287-2295.

9- Lee, T.Y., Seo, M.K., Kim, Y.J., and Jung, S.Y., (2016), *Motor design and characteristics comparison* of *outer-rotor type BLDC motor* and *BLAC motor based* on *numerical analysis*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.26, No.4.

10- Caranaiselvane, C., and Jeevananthan, S., (2012), *Generalized procedure for BLDC motor design and substantiation in magnet 7.1.1 software*, International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies, p.18-25.

11- Lee, B.K., Kang, G.H., Hur, J., and You, D.W., (2004), *Design of spoke type BLDC motors with high power density for traction applications*, IEEE Industry Applications Conference, p.1068-1074.

12- Kim, S.Y., Kim, B.T., Cho, J.H., and Lee, J., (2016), *Novel spoke-type BLDC motor design for cost effective and high power density*,IEEE Transportation Electrification Conference andExposition, p.90-93.

13- Yang, H.M., Cha, J.W., Baik, B.H., and Kwon, B., (2015), *Design and analysis of high speed BLDC motor for centrifuge*. International Conference onElectrical Machines and Systems, p.968-972.

14- Chin, Y.K., Arshad, W.M., Backstrom, T., and Sadarangani, C., (2001), *Design of a compact BLDC motor for transient applications*, European Conference on Power Electronics and Applications, p.1-5.

15- Zamani, H., Karimi, M.H., Kanzi, K., and Vasheghani, Q., (2013), *Vector control of counter-rotating permanent magnet synchronous motor for underwater propulsion application*, Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), p.44-48.

16- Caricchi, F., Crescimbini, F., and Santini, E., (1994), *Basic principle and design criteria of axial-flux pm machines having counter-rotating rotors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31, No.5, p.1062-1068.

17- Choi, H., Jasinski, M., and Liu, J., (2015), *Novel permanent magnet systems for high efficiency electric ships*, IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), p.219-223.

18- Kumar, P., (2016), *Design, interpretation and progression of bldc motor for coreless thruster*, International Journal of Scientific Research and Education, Vol.4, No.6, p.5449-5454.

19- Kirtley, J.L., Banerjee, A., and Englebretson, S., (2015), Motors for ship propulsion, Proceedings of the IEEE, Vol.103, No.12, p.2320-2332.

20- Zhang, C., and Zhang, J., (2013), *Modeling and simulation of the marine permanent magnet synchronous propulsion motor with direct torque control system*, Trans Tech Publications, Advanced Materials Research, Vol. 655-657, p.612-619.

21- Ronghai, Q., and Lipo, T.A., (2003), *Dual-Rotor, Radial-Flux, Toroidally Wound, Permanent-Magnet Machines*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.39, No.6, p.1665-1673.

22- Grassi, D., Brizzolara, S., and Viviani, M., (2010), *Design and analysis of counter-rotating propellers comparison of numerical and experimental results*, International Conference on hydrodynamics, p. 570-576.

23- Ani, S.O., Bang, D., Polinder, H., Lee, J.Y., Moon, S.R., and Koo, D.H., (2010), *Human powered axial flux permanent magnet machines: review and comparison*, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, p.4165-4170.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.3.1]

24- Qiu, T., and Shi, C., (2006), *Counter-Rotating permanent magnet brushless dc motor for underwater propulsion*, IEEE International Conference on Power Electronics and Motion Control, Vol.2, p.1-5.
25- Ikhlas, M., (2015), *Rotor position identificatin for brushless dc motors*, Thesis for the Degree in Master of Engineering Science, University of Western Ontario, Ontario, Canada.
26- Chlebosz, W., Ombach, G., and Junak, J., (2010), *Comparison of permanent magnet brushless motor with outer and inner rotor used in e-bike*, International Conference on Electrical Machines, p.1-5.
27- EL-Refaie, A.M., Zhu, Z.Q., Jahns, T.M., and Howe, D., (2008), *Winding inductances of fractional slot surface-mounted permanent magnet brushless machines*. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, p.1-8.
28- Wu, D., Fei, W., and Luk, P.C.K., (2015), *Design optimizations of outer-rotor permanent magnet synchronous machines with fractional-slot and concentrated-winding configurations in lightweight electric vehicles*, International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), p.1-8.
29- Hanselman, D.C., (1994), *Brushless permanent-magnet motor design*, NewYork: McGraw-Hill.
30- Rahideh, A., Korakianitis, T., Ruiz, P., Keeble, T., and Rothman, M.T., (2010), *Optimal brushless dc motor design using genetic algorithms*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.322, No.22, p.3680-3687.
31- Chambers, L.D., (1999), *Genetic algorithm complex coding systems*, 1st ed, CRC Press: Boca Raton.
32- Soleimani Keshayeh, M., Gholamian, S.A., Masoumi, P., and Ilka, R., (2012), *Presentation of high performance method for design of brushless dc motor using genetic algorithm (GA) and finite element analysis (FEA)*, Journal of Operational Research and Its Applications (Journal of Applied Mathematics), Vol.9, No.3, p.49-62. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.3.1]