ICEMG 2019-XXXXX

طراحی مناسب برای سیم پیچی های شیارکسری در موتورهای مغناطیس دائم سطحی

سیدحسین طباطبایی'، آرش کیومرثی'، محمد صادق محمودی ؓ

^{(ف}ارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.؛ E-Mail: htabal10@yahoo.com ^۲دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان. (نویسنده مسئول)؛ E-Mail: kiyoumarsi@eng.ui.ac.ir ۲دانشجوی دوره دکترا، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان. Te-Mail: m.s.mahmoudii@eng.ui.ac.ir

چکیدہ

مهمترین ویژگی های موتور های سنکرون مغناطیس دائم، بازده بالا (در محدوده تقریبا گسترده ای از توان خروجی)، چگالی توان زیاد، تلفات حداقل (به دلیل عدم وجود سیستم تحریک و تلفات ناشی از آن در روتور)، قابلیت اطمینان بالا در سرعتهای زیاد و هزینه تعمیرات پایین می باشد.

به دلیل ویژگی های برتر این موتور، در صنایعی که نیاز به راندمان بالا و قابلیت اطمینان میباشد، از این موتورها استفاده می کنند و به کار گیری این موتورها در صنایع مختلف، رو به افزایش است. ولی از طرف دیگر، یکی از مهم ترین عیب های این موتورها، نوسان گشتاور نسبتا بالا در آنها میباشد. در موتورهای بزرگ، برای کاهش دامنه هارمونیک های موجود در توزیع فضایی آمپر-دور استاتور، از سیم پیچی های متمرکز و توزیع شده با گام کسری استفاده می شود. در این تحقیق، سیم پیچی استاتور یک موتور مغناطیس دائم دورپایین و گشتاور بالا مورد بررسی قرار گرفته و دو آرایش متفاوت برای بهبود عملکرد آن، طراحی و ارائه شده است. در نهایت، عملکرد آن ها با یکدیگر مقایسه شده است.

واژه های کلیدی

ماشین سنکرون مغناطیس دائم، سرعت پایین، توان بالا، کاهش ضربان گشتاور، طراحی سیم پیچ استاتور

۱– مقدمه

استفاده از موتورهای سنکرون مغناطیس دائم در سال های اخیر، افزایش داشته است. یکی از معایب قابل توجه این موتورها، ضربان گشتاور آن ها می باشد.

این ضربان گشتاور را می توان توسط دو راه کار کلی بهبود بخشید:

- ۱ با استفاده از سیستم درایو موتور و توسط تجهیزات
 ۱) الکترونیک-قدرت
 - ۲- با استفاده از بهبود ساختار موتور

در این مقاله، تمرکز بر روی روش دوم بوده است. ابتدا در این مقاله، موتور سنکرون مغناطیس دائم 1.0MW موجود در صنعت با استفاده از ابررایانه تحلیل شده و به طور ویژه، سیم پیچ استاتور آن مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با الگو گرفتن از آرایش این سیم پیچ، دو آرایش سیم پیچ متمایز دیگر برای کاهش ضربان گشتاور ارائه شده است.

۲-تحليل ماشين اوليه

در این پژوهش، ابتدا موتور مغناطیس دائم 1.0MW با ۱۴۴ شیار، ۲۴فاز و ۲۰ قطب در رایانه تحلیل شد و برخی از نتایج این تحلیل در ادامه آمده است. با استفاده از ابررایانه، موتور در زوایای مختلف روتور در نرم افزار المان محدود شبیه سازی شده و نتایج گشتاور حاصل، تحلیل شده و متوسط آن بدست آمده است. با کنار هم قرار دادن این متوسط گشتاورها در زوایای مورد نظر، شکل ۱ که مشخصه گشتاور برحسب زاویه روتور می باشد؛ بدست آمده است.



شکل ۱: گشتاور متوسط برحسب زاویه روتور

در شکل ۱ مشاهده می شود که بیشترین مقدار گشتاور تحت بار در زاویه حدود ۹۰ درجه (زاویه بین محور استاتور و روتور) حاصل می-شود. در شکل ۲، شکل موج گشتاور تحت بار در زاویه ۹۰ درجه ترسیم شده است[۱۲–۱].



شکل ۲: گشتاور تحت بار در زاویه ۹۰ درجه

۳-تحریک ماشین با استفاده از تغذیه جریان سینوسی

پس از تحلیل کلی موتور، نیروی محرکه مغناطیسی ناشی از هر یک از ۲۴ فاز با تغذیه جریان سینوسی بدست آمده و آن ها با هـم ترکیـب شده اند تا نیروی محرکه مغناطیسی برآیند بدست آیـد. در شـکل ۳، برآیند نیروی محرکه مغناطیسی ۲۴ فاز موتور و مولفـه اول آن آمـده است.



تبدیل فوریه نیروی محرکه مغناطیسی برآیند شکل ۳ محاسبه شده است و مولفه های تبدیل فوریه سیگنال برآیند در شکل ۴ آمده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، مولفه اصلی تبدیل فوریه در مولفه دهم قرار دارد، زیرا موتور ۲۰ قطب می باشد.



با توجه به محاسبات انجام شده، مقدار اعوجاج هارمونیکی کل برای طیف هارمونیکی سری فوریهی نیروی محرکه مغناطیسی برآیند شکل ۴ برابر با ۲۵۱۹/۰ میباشد[۲۰–۱۳].

۴-نتایج طراحی سیم پیچ موتور با ۹۶شیار، ۲۰ قطب و ۲۴ فاز پس از تحلیل سیم پیچ موتور با ۱۴۴شیار، ۲۰قطب و ۲۴فاز، یک سیم پیچ برای موتور با ۹۶ شیار، ۲۰قطب و ۲۴فاز طراحی شده است. با قراردادن این سیم پیچ در موتور مربوطه و تغذیه جریان سینوسی به آن، نیروی محرکه مغناطیسی هر فاز محاسبه شد. سپس با ترکیب نیروی محرکه مغناطیسی هر ۲۴ فاز با هم، نیروی محرکه مغناطیسی برآیند موتور حاصل از این سیم پیچ بدست آمد که در شکل ۵ آمده است.



پس از تبدیل فوریه گرفتن از نیروی محرکه مغناطیسی برآیند، مولفه های تبدیل فوریه در شکل ۶ ارائه شده است.



با توجه به محاسبات انجام شده ، مقدار اعوجاج هارمونیکی کل برای طیف هارمونیکی سری فوریهی نیروی محرکه مغناطیسی برآیند شکل ۶ برابر با ۱/۱۵۵۴ می باشد.

در شکل ۶ مشاهده می شود که مقدار مولفه مفید نیروی محرکه مغناطیسی (مولفه ۱۰) بالا می باشد؛ درحالی که مولفه های دیگر کم

میباشند که این از خصوصیات مناسب این سیم پیچ برای موتور است.

مقایسه مولفه های شکل ۶ با مولفه های هارمونیکی شکل ۴ (شامل مولفه های تبدیل فوریه سیم پیچ موتور با ۱۴۴ شیار) نشان می دهـد مولفه های فرعی تبدیل فوریه نیروی محرکه مغناطیسی برآینـد در سیم پیچی موتور با ۹۶ شیار، کـاهش یافتـه اسـت کـه باعـث بهبـود گشتاور موتور میشود.

۵-نتایج طراحی سیم پیچ موتور با ۱۹۲ شیار، ۲۰قطب و ۲۴فاز

پس از تحلیل سیم پیچ موتور با ۹۶ شیار، ۲۰قطب و ۲۴فاز، یک سیم پیچ برای موتور با ۱۹۲شیار، ۲۰قطب و ۲۴فاز طراحی شده است. با قراردادن این سیم پیچ در موتور مربوطه و تغذیه جریان سینوسی به آن، نیروی محرکه مغناطیسی هر فاز محاسبه شد. سپس با ترکیب نیروی محرکه مغناطیسی هر ۲۴ فاز با هم، نیروی محرکه مغناطیسی برآیند موتور حاصل از این سیم پیچ بدست آمد که در شکل ۷ آمده است.



با محاسبهی تبدیل فوریه سیگنال شکل ۳، مولفه های تبـدیل فوریـه نیروهای محرکه مغناطیسی برآیند، در شکل ۸ آمده است.



با توجه به محاسبات انجام شده، مقدار اعوجاج هارمونیکی کل برای طیف هارمونیکی سری فوریهی نیروی محرکه مغناطیسی برآیند شکل ۸ برابر با ۰/۰۴۳۱ می باشد.

مقایسه مولفه های شکل ۸ با مولفه های شکل ۴ (شامل مولفه های تبدیل فوریه سیم پیچ موتور با ۱۴۴ شیار) نشان می دهد مولفه های فرعی تبدیل فوریه نیروی محرکه مغناطیسی برآیند در سیم پیچی موتور با ۱۹۲ شیار، کاهش یافته است که باعث بهبود گشتاور موتور می شود.

۶- محاسبه ضریب سیم پیچی

برای تحلیل بهتر سیم پیچ های طراحی شده و سیم پیچ اولیه، مقدار ضریب سیم پیچی سیم پیچ های ارائه شده، بدست آمده و در جدول ۱ آورده شده است.

ماشین ۳	ماشین ۲	ماشین ۱	سيم پيچ
. ۴	. *	تعداد شیار س	
•,,	•,1	• , 1	بر فاز برقطب)
	۰,٩٩۶۴ ۰,٩٩٧٩ ۰,٩٩۶۵		ضريب سيم
•,9994		•,9990	پیچی مولفهی
			اول

جدول ۱: مقادیر محاسبه شده ضریب سیم پیچی

با توجه به ضرایب سیم پیچی اندازه گیری شده، مشاهده می شود که ضریب سیم پیچی مولفه اول هر سه سیم پیچ بسیار خوب می باشد ولی از لحاظ مقایسه، ضریب سیم پیچی مربوط به موتور با ۹۶ شیار (q=0.2) بهتر از دو سیم پیچ دیگر می باشد.

۷- محاسبه مقاومت سیم پیچی ها

در اقدامی دیگر با بدست آوردن مقاومت سیم پیچ های مطرح شده، مشخصهی دیگری برای مقایسه بین این سیم پیچ ها، ارائه شده است. پس از محاسبه طول کل سیم استفاده شده در هر یک از سیم پیچها، با توجه به مقاومت ویژه سیم، مقدار تقریبی مقاومت بدست آمده است که مقادیر آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ : مقادیر مقاومت سیم پیچ های اشاره شده

ماشین ۳	ماشین ۲	ماشین ۱	سيم پيچ
۰,۴	۰,۲	۰,۳	q
۱۰,۵۵	۱۰,۵۵	٩,٧	مقاومت سيم پيچ (mΩ)

پس از محاسبه مقاومت، با محاسبهی جریان وارد شده در سیم پیچ می توان توان تلف شده اهمی بر روی سیم پیچ را بدست آورد کـه مقادیر تلفات بر روی این سیم پیچ ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: مقادیر تلفات روی سیم پیچ های اشاره شده

ماشین ۳	ماشین ۲	ماشین ۱	سيم پيچ	
۰,۴	۰,۲	۰,۳	q	
27, 7.47	27,2.42	29,0175	تلفات روى	
kW	kW	kW	سيم پيچ	

با توجه به مقادیر بدست آمده تلفات روی سیم پیچ، می توان گفت که تلفات بر روی این سیم پیچ ها، تقریبا با هم برابر بوده و در مقابل توان کل ماشین، مقدار نسبتا کمی را شامل می شود[۲۹-۲۱].

۸-تحليل نتايج

با توجه به بررسی های انجام شده بر روی هر سه سـیم پـیچ، مقـادیر محاسبه شده در جدول ۴ آمده است.

شده	های ارائه	پيچ	سيم	های	مشخصه	مقادير	۴:	جدول
-----	-----------	-----	-----	-----	-------	--------	----	------

			1		
ماشین ۳	ماشین ۲	ماشین ۱	سيم پيچ		
74	74	74	تعداد فاز		
۲۰	۲.	۲۰	تعداد قطب		
۱۹۲ شیار	۹۶ شیار	۱۴۴ شیار	تعداد شيار		
			تعداد شيار		
۴	• • 7	• . ٣	بر فاز بر		
,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	,	قطب		
			q (SPP)		
۰,۰۴۳۱	•,1004	•,707	THD		
ب س ع	6 W X		اندازه مولفه اول		
۲,۰۱۱	F,•10	1,/			
			اندازه		
۰,.۶۲	• , • • ٨۴	۰,۰۰۵	هارمونيک		
			سوم		
			اندازه		
۰,۰۴۵	• , • • • •	۰,۰۰۳۷	هارمونيک		
			پنجم		
			ضريب سيم		
•,9994	۰,۹۹٧٩	•,9990	پيچى		
			مولفهی اول		
۲۸,۷۰۴۳	71, 7.47	19,0175			
kW	kW	kW	تلفات		

با توجه به جدول ۴ می توان نتایج زیر را بیان نمود: ۱- مولفه اصلی متعلق به سیم پیچ موتور ۹۶ شیاره از هر دو سیم پیچ دیگر بالاتر است. ۲- THD برای سیم پیچ موتور ۱۹۲ شیاره پایین تر از بقیه

و پس از آن نیز سیم پیچ موتور ۹۶ شیاره عملکرد بهتری از نظر THD نسبت به سیم پیج موتور ۱۴۴ شیاره دارد.

۳- ضریب سیم پیچی در سیم پیچ موتور ۹۶ شیاره بزرگتر از دو سیم پیچ دیگر می باشد.

۴- تلفات در سیم پیچ موتور ۱۴۴ شیاره کمتر از دو سیم پیچ دیگر است.

۵- دامنه مولفه اول نیروی محرکهی منتجه استاتور در سیم پیچی ۱۴۴ و ۹۶ شیار تقریبا ثابت است ولی در موتور با ۱۹۲ شیار، این دامنه ثایت نیست و تغییرات اندکی دارد.

۹-جمعبندی

با توجه به نتایج بدست آمده از سیم پیچ های طراحی شده و مقایسه این مقادیر با مقادیر محاسبه شده از سیم پیچ اولیه، معلوم گردید که می توان برای بهبود ضربان گشتاور موتور مورد نظر، از سیم پیچ های پیشنهاد شده در این مقاله که دارای q های کمتر از ۱ و نزدیک به مقدار قبل هستند، استفاده نمود.

۱۰-فهرست علائم

MMF	نیرومحرکه مغناطیسی کل، Amper-turns
q	تعداد شیار بر فاز بر قطب
THETA	زاویه مکانیکی
THD	مقدار اعوجاج هارمونیکی کل

۱۱-مراجع و منابع

- J. R. Hendershort, Jr and T. J. E. Miller, *Design of* Brushless Permanent-Magnet Machines. Venice, FL:Motor Design Books, 2010.
- [2] Kim T, Lee H W, Ehsani M, "Position sensorless brushless DC motor/generator drives review and future trends", IET Electr. Power Appl, Vol1, No.4, pp. 557–564,2007.
- [3] Z.Q.Zho, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet Dc Motors, part III: Effect of Stator Sloting," IEEE Trans. Magn, Vol, 29, No.1, Janaury 1993.
- [4] A. Vagati, M. Pastorelli, G. Francheschini, and S. Petrache, "Design of low-torque-ripple synchronous reluctance motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 34, pp. 758-765, 1998.
- [5] G. H. Kang, Y. D. Son, G. T. Kim, and J. Hur, "A novel cogging torque reduction method for interiortype permanent-magnet motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 45, pp. 161-167, 2009.
- [6] M. S. Islam, S. Mir, T. Sebastian, and S. Underwood, "Design considerations of sinusoidally excited permanent-magnet machines for low-torque ripple applications," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 41, No. 4, pp. 955–962, Jul./Aug. 2005.
- [7] M. S. Islam, S. Mir, and T. Sebastian, "Issues in reducing the cogging torque of mass-produced permanent magnet brushless DC motor," in *Proc. IEEE 38th Annu. Ind. Appl. Conf.*, 2003, Vol. 1, pp. 393–400.
- [8] S. H. Han, T. M. Jahns, W. L. Soong, M. K. Guven, and M. S. Illindala, "Torque ripple reduction in interior permanent magnet synchronous machines using stators with odd number of slots per pole

Appl., Vol. 44, No. 5, pp. 1513–1521, Sep./Oct. 2008.

- [19] Roselschl E, Schroedl M, "Optimized INFORM measurement sequence for sensorless PMSM drive with respect to minimum current distortion", IEEE Trans. Ind . Appl, Vol.40, No.4, pp. 591–598,2004.
- [20] S. K. Sul, Control of electric machine drive systems vol. 88: Wiley-IEEE Press, 2011.
- [21] I. Boldea and L. N. Tutelea, *Electric Machines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB*: Taylor & Francis, 2009.
- [22] D. G. Dorrell, and M. Popescu, "Odd stator slot number in brushless DC machine – An aid to cogging torque riduction," *IEEE Transactions* on , Vol. 47, No. 10, Oct 2011.
- [23] N. Bianchi and S. Bolognani, "Influence of rotor geometry of an IPM motor on sensorless control feasibility," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 43, pp. 87-96, 2007.
- [24] Jahns T. M., Kliman G. B., and Neuman T. W., "Interior permanent magnet synchronous motor for adjustable-speed drive", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol.IA-22, pp.738-747, 1986.
- [25] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, *Design of rotating electrical machines*: Wiley, 2009.
- [26] J. F. Gieras and M. Wing, Permanent magnet motor technology: design and applications vol. 113: CRC, 2002.
- [27] R. Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors: Taylor & Francis, 2009.
- [28] A. Kioumarsi, M. Moallem, and B. Fahimi, "Mitigation of torque ripple in interior permanent magnet motors by optimal shape design," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 42, pp. 3706-3711, 2006.
- [29] B. K. Bose, "A high-performance inverter-fed drive system of an interior permanent magnet synchronous machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 24, pp. 987-997, 1988.

pair," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, pp. 118-127, 2010.

- [9] L.Zhu, S.Z. Jiang, Z.Q. Zhu and C.C.Chan, "Comparison of Alternative Analytical Models for Predicting Cogging Torque in Surface Mounted Permanent Magnet Machines," in IEEE VehiclePower and Propulsion Conf, pp.1-6, 2008.
- [10] L.J.Wu, Z.Q.Zhu, D.Staton, M. Popescu, and D. Hawkins, Comparision of Analytical Models for Predicting Cogging Torque in Surface Mounted Permanent Magnet Machines," in IEEE XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010.
- [11] Wallmark O, Harnefors L, "Sensorless control of salient PMSM drives in the transition region", IEEE Trans. Ind. Electron, Vol.53, No.4, pp.1179– 1187, 2006.
- [12] I. Boldea, "Synchronous Reluctance Motor Drives," CRC Press, 2002.
- [13] T. M. Jahns and W. L. Soong, "Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac motor drives—A review," IEEE Trans. Ind.Electron., Vol. 43, No. 2, pp. 321–330, Apr. 1996.
- [14] J. Cros and P. Viarouge, "Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 17, No. 2, pp. 248–253, Jun. 2002.
- [15] I. Boldea and S. A. Nasar, *The induction machine handbook*: CRC, 2001.
- [16] Silva C, Asher G M, Sumner M, "Hybrid rotor position observer for wide speed range sensorless PM motor drives including zero speed", IEEE Trans. Ind. Electron, 53, (2), pp. 373–378,2006.
- [17] A.M. EL-Refaie and T.M. Jahns, "Optimal flux weakening in surface PM machines using fractionalslot concentrated windings," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 41, No. 3, pp. 790–800, May–Jun. 2005.
- [18] N. Bianchi, S. Bolognani, and M. Dai Pre, "Magnetic loading of fractional-slot three-phase PM motors with nonoverlapped coils," IEEE Trans. Ind.