

基于多支路港口大功率永磁直驱电机优化设计

周志勇, 程 祥*, 张炳义

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Optimal Design of a High-Power Permanent Magnet Direct-Drive Motor with Multi-Branch Configuration for Port Applications

ZHOU Zhiyong, CHENG Xiang*, ZHANG Bingyi

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] High-power permanent magnet direct-drive motors for port transmissions are usually designed with high voltage ratings. However, this solution poses significant challenges in terms of electromagnetic design, manufacturing precision and maintenance reliability. For variable-speed drive systems, relying on high-cost power electronics for frequency conversion greatly increases the production cost. To address these problems, a low-voltage multi-branch structure design for permanent magnet direct-drive motors is proposed in this paper. [Methods] Firstly, according to the design requirements of high-power permanent magnet direct-drive motor for port transmissions, the electromagnetic scheme of the motor was designed to use multiple low-voltage inverters to supply power, and the total current of the whole motor was shared by each branch circuit. Then, the stator winding of the motor was designed with multi-branch structure, and the coupling between different branch windings and the electromagnetic performance of the motor when different branches were put into operation were analyzed by finite element simulation to theoretically verify the feasibility of the multi-branch motor. When different branches were put into operation, it increased the unevenness of the air-gap magnetic field and affected the stability of the motor. Finally, the cogging torque of the motor was optimized by opening an auxiliary slot in the rotor. [Results] Simulation results showed that the low-voltage multi-branch structure scheme, which effectively solved the problem of high current in the low-voltage scheme, put different branches into operation according to the load demand and improved the overall efficiency of the motor. When a certain inverter failed, the reliability of the motor drive system was greatly improved by controlling other inverters and increasing the current so that the motor output the rated torque. The peak-to-peak value of cogging torque of the un-slotted motor was 2 419.5 N·m, and

after opening the rotor auxiliary slot optimization, the peak-to-peak value of cogging torque was reduced to 1 136.7 N·m, a reduction of 53.02%. [Conclusion] The low-voltage multi-branch structure optimization scheme proposed in this paper effectively solves the high cost and high current problems of high-power permanent magnet direct-drive motors for port transmission. The scheme can decide the number of branches to be put into operation according to the load requirements, which improves the efficiency of the motor and provides a certain reference for the design of high-power motors.

Key words: permanent magnet direct-drive motor; multi-branch; low-voltage; auxiliary slot; simulation

摘 要: 【目的】港口传输大功率永磁直驱电机通常采用高电压等级设计。然而,这种方案给电磁设计、制造精度和维护可靠性带来了巨大挑战。对于变速驱动系统来说,依靠高成本的电力电子设备进行频率转换大大增加了生产成本。为解决这些问题,本文提出了一种用于永磁直驱电机的低压多支路结构设计。【方法】首先,根据港口传输大功率永磁直驱电机的设计要求,对电机的电磁方案进行设计,采用多个低压变频器供电,由各个支路共同分担整个电机的总电流。然后,对电机的定子绕组进行多支路结构设计,并通过有限元仿真分析不同支路绕组之间的耦合以及不同支路投入运行时电机的电磁性能,从理论上验证多支路电机的可行性。当不同支路投入运行时,会增加气隙磁场不均匀,影响电机的稳定性。最后,通过在转子开设辅助槽对电机的齿槽转矩进行优化。【结果】仿真结果表明,低压多支路结构方案,有效解决了低压方案电流大的问题,根据负载需求投入不同的支路运行,提高了电机整体效率;当某个变频器出现故障时,通过控制其他变频器,增大电流,使电机输出额定转矩,大大提高了电机驱动系统的可靠性;未开槽的电机齿槽转矩峰峰值为 2 419.5 N·m,经过开设转子辅助槽优化后齿槽转矩峰峰值降为 1 136.7 N·m,降幅为 53.02%。

【结论】本文所提低压多支路结构优化方案有效解决了港口传输大功率永磁直驱电机的高成本和大电流问题。该方案可根据负载要求来决定投入运行的支路数,提高了电机效率,为大功率电机设计提供了一定的参考。

关键词: 永磁直驱电机;多支路;低压;辅助槽;仿真

0 引言

随着全球经济快速发展,港口作为全球贸易的关键枢纽,扮演着不可替代的角色^[1]。港口传输装备作为港口物流的重要环节,其技术水平和生产效率直接影响港口运营效率和服务水平^[2-4]。传统港口传输驱动系统由多级传动结构组成,能量损失大、系统效率低且维护成本高^[5-6]。同时,由于港口传输装备的工作性质,负载会随着物料流量的变化而变化,电机工作点也随之变化,虽然异步电机在额定工作点时具有较高的效率,但偏离额定工作点时,效率明显降低^[7]。随着永磁技术的发展,永磁同步电机已被广泛应用于各行业。永磁同步电机具有结构简单、重量轻、传动平稳以及无噪声等优点,并且永磁同步电机更加节能、环保^[8-9]。但是对于大功率的永磁电机,通常采用高电压等级设计,需要高压变频器来驱动,高昂的成本限制了其在应用中的普及^[10]。

文献[11]通过建立多支路永磁同步电机的数学模型,列写永磁同步电机的相关方程,设计了一台 30 kW 的多支路自起动永磁电机,并对不同支路投入运行时的起动过程进行有限元仿真。文献[12]设计了一台多支路感应电动机,对多支路感应电动机在若干电源供电条件下进行建模及磁场分析,给出了最优支路的投切方案。文献[13]设计了定子采用多支路绕组结构的发电机,降低了发电机各支路的电流等级,增加了发电机单机容量。文献[14]研究了集中绕组采用多三相设计时槽极配合的选择,并对电机容错能力进行了分析。文献[15]对多三相集中绕组和分布绕组的正常运行、开路、短路以及匝间短路故障进行了分析,发现集中绕组具有更高的效率和更强的容错性能^[15]。

本文将港口大功率永磁直驱电机设计为四条支路,对不同支路投入运行时的性能进行仿真。并基于转子辅助槽对电机齿槽转矩进行优化,该

方案不仅能降低设备成本,还能在低负载情况下通过部分支路工作来提高系统节能效果。

1 港口大功率永磁电机电磁设计

1.1 港口大功率永磁电机设计要求

港口大功率永磁电机的技术要求如表 1 所示。

表 1 永磁电机的技术要求

Tab. 1 Technical requirements for permanent magnet motor

参数名称	参数值
额定功率/kW	500
相数	3
额定电压/V	1 140
额定转速/(r·min ⁻¹)	60
绕组连接方式	Y 型
冷却方式	水冷
功率因数	≥0.95
效率	≥95%
过载倍数	≥2 倍

对于功率较大的永磁电机,常采用高电压等级来设计。但会带来一些问题,尤其对于需要变频控制的电机,不仅增加了电机成本,还会对电机控制产生影响。

若采用低电压等级来设计电机,定子绕组中的大电流不可避免。通过多支路结构设计,可以将电机中的总电流由各个支路共同分担,每个支路单独接变频器进行控制,降低了器件成本,同时低压利于变频器控制。不同设计方案对比如表 2 所示。

表 2 三种设计方案对比

Tab. 2 Comparison of three design schemes

特性	高压单支路	低压单支路	低压多支路
电压等级/V	6 000	1 140	1 140
绕组结构	单支路	单支路	4 支路
单支路功率/kW	500	500	125
定子绕组总电流理论值/A	53.3	280	280
支路电流理论值/A	53.3	280	70
变频器成本	极高	高	中
维护成本	高	中	低
可靠性	单点故障	单点故障	容错设计
控制系统	简单	简单	中等

由表 2 可知,采用低压多支路方案,可降低对变频器的要求和维护成本,同时多个支路运行,增加了系统可靠性。但多个变频器同时控制也增加了控制系统的难度,为保证各支路电流相等,可采用主从控制等策略。

1.2 多支路电机电磁方案设计

多支路永磁电机其基本结构与现行永磁电机的结构基本相同,主要区别在于定子绕组的连接设计和电源接线端子^[16-18]。因此,对电机进行电磁设计时只需要特别注意电机的并联支路数。根据本文的设计要求,将并联支路数设计为 4 支,其他设计要求与现行永磁电机相同。

低速大转矩永磁直驱电机通常采用真分数槽集中绕组^[19]。常见的真分数槽集中绕组系数较高的单元电机组合有 8 极 9 槽、10 极 12 槽和 10 极 15 槽^[20],本文选择 10 极 12 槽单元电机组合,根据电机频率要求范围,本文电机极槽配合为 60 极 72 槽。

利用 Matlab 编写的程序对电机进行详细的电磁方案设计,主要电磁参数如表 3 所示。

表 3 永磁直驱电机主要电磁参数

Tab. 3 Main electromagnetic parameters of permanent magnet direct-drive motor	
参数名称	参数值
定子内、外径/mm	1 020、1 250
转子外径/mm	1 015.6
铁心长度/mm	1 060
气隙长度/mm	2.2
电机极数	60
定子槽数	72
永磁体尺寸/mm	40×16
永磁体牌号	N38UH
20°时永磁体矫顽力/(kA·m ⁻¹)	915
20°时永磁体剩磁磁密/T	1.23
每槽导体数	38
绕组跨距	1
并联支路数	4
线规宽度、高度/mm	7.94、2.69
定子槽宽、槽深/mm	25、60

2 永磁电机多支路结构设计及仿真

2.1 永磁电机多支路绕组结构设计

本文电机采用四支路绕组结构,将每一相分为四路,如 A 相分为 A1、A2、A3 和 A4,每条支路单独引出三相接线端子与低压变频器相连。绕组接线图如图 1~图 3 所示。

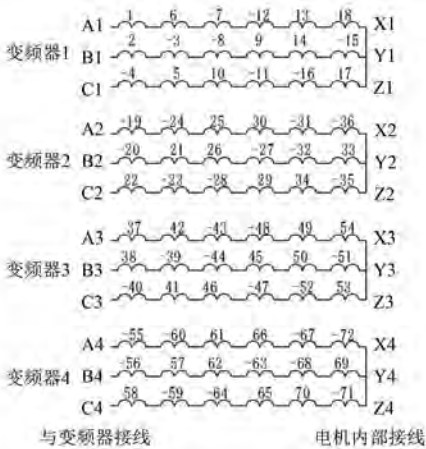


图 1 多支路绕组接线示意图

Fig. 1 Multi-branch winding wiring diagram

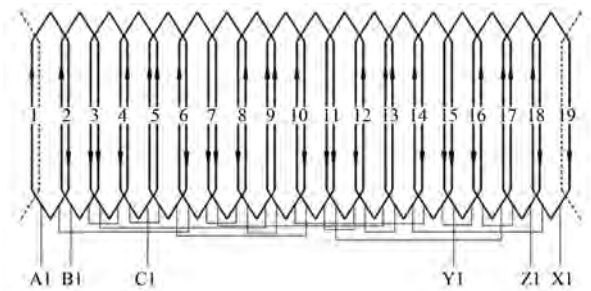


图 2 支路一定子绕组接线图

Fig. 2 Stator winding wiring diagram of branch one

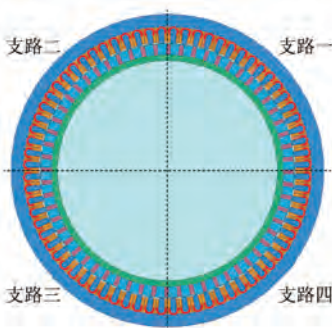


图 3 四支路绕组位置图

Fig. 3 Four-branch winding location diagram

2.2 多支路结构电机仿真分析

2.2.1 全部支路运行仿真分析

在 Maxwell 软件中,根据绕组接线图给不同支路添加绕组和激励,并对全部支路投入运行进行仿真。仿真结果如图 4~图 8 所示。

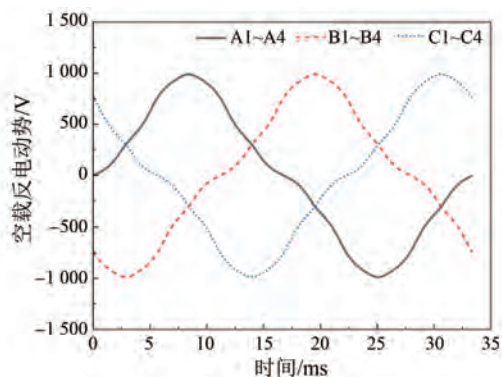


图 4 四条支路全部运行时的空载反电动势

Fig. 4 No-load back electromotive force for full four-branch operation

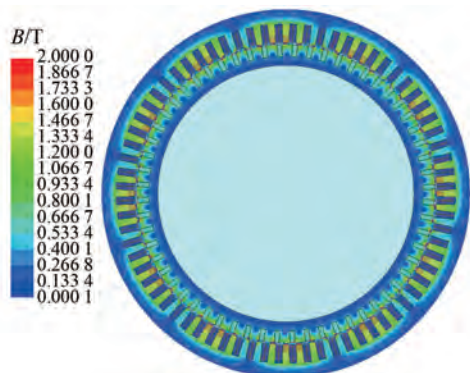


图 5 四条支路全部运行时的空载磁密云图

Fig. 5 No-load magnetic flux density distribution for full four-branch operation

由图 4~图 8 可知,各个支路的空载反电动势有效值为 598.6 V,占额定电压的 92%。定子齿顶部位的定子磁密最大,稍有饱和;定子齿中部位,磁密未出现饱和,电机磁力线分布合理,符合永磁电机设计要求。给电机的全部支路都通入额定激励时,电机负载转矩为 80.911 9 kN·m,满足驱动要求。电机全部支路运行时,气隙磁密沿定子圆周方向均匀分布。

为了进一步分析不同支路绕组上的耦合情况,在建立的有限元仿真模型中查看不同支路对应相之间的电感参数^[15]。电机电感参数如表 4 所示。

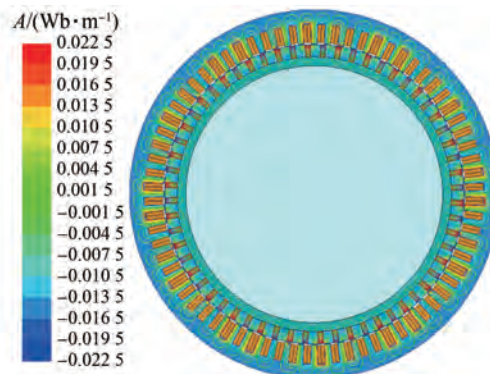


图 6 四条支路全部运行时的空载磁力线图

Fig. 6 No-load magnetic field lines for full four-branch operation

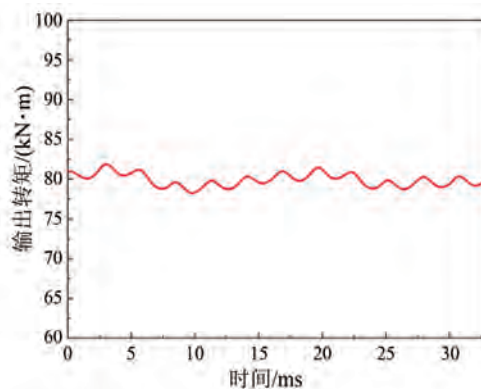


图 7 四条支路全部运行时的输出转矩

Fig. 7 Output torque for full four-branch operation

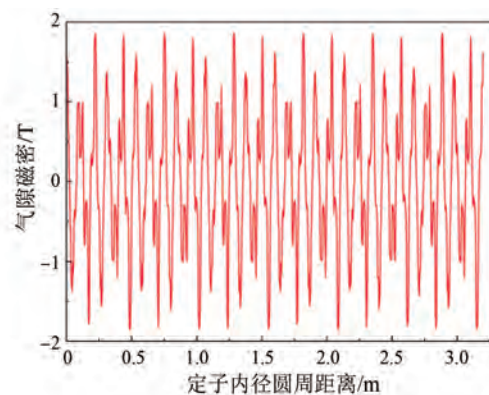


图 8 四条支路全部运行时的气隙磁密

Fig. 8 Air-gap flux density for full four-branch operation

由表 4 可知,不同支路对应相之间的互感很小,为自感的 4.98%。集中绕组采用多支路结构时电机绕组跨距为 1,采用左右分层时单齿缠绕^[14],不同相位的线圈不会重叠,因此不同支路之间影响较小,可忽略不计。

表 4 电机电感参数
Tab. 4 Motor inductance parameters

支路	电感/mH			
	A1	A2	A3	A4
A1	22.52	1.123	0	1.122
A2	1.123	22.51	1.120	0
A3	0	1.122	22.52	1.121
A4	1.122	0	1.120	22.52

2.2.2 三条支路运行仿真分析

现给支路一、二、三的绕组通入电流源激励, 支路四的绕组开路。仿真结果如图 9 和图 10 所示。

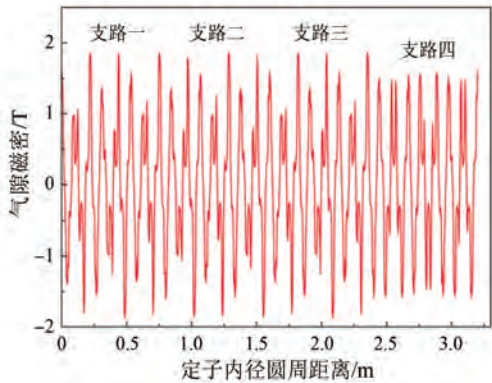


图 9 三条支路运行时的负载气隙磁密
Fig. 9 Load air-gap flux density for three-branch operation

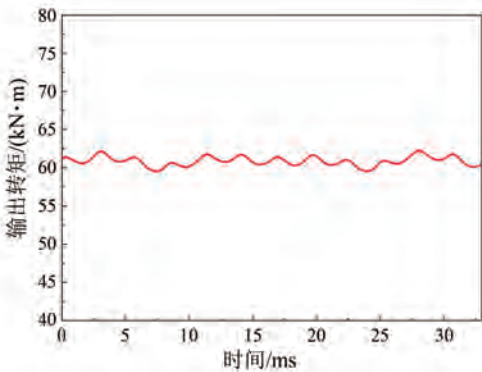


图 10 三条支路运行时的输出转矩
Fig. 10 Output torque for three-branch operation

由图 9 可知, 三条支路运行时, 气隙磁场分布不均匀, 这是因为通电绕组部分的磁场由定子绕组和永磁体共同作用产生, 而不通电部分的磁场仅由永磁体产生。由图 10 可知, 三条支路运行时, 电机的输出转矩为 60.82 kN·m, 为额定转矩

的 3/4。因此为了提高整个系统的运行效率, 可以在负载率低于 75% 时, 通过控制器使电机仅投入三条支路运行, 使电机处于满载运行状态, 以提高电机整体效率。

2.2.3 两条支路运行时仿真分析

当两条支路运行时, 理论上可以任选两条支路, 由于本文电机仅有四条支路, 因此可分为两种情况, 即选择对称支路投入运行或选择相邻支路投入运行。针对这两种运行情况选择相应的支路设置电源激励进行有限元仿真。仿真结果如图 11~图 14 所示。

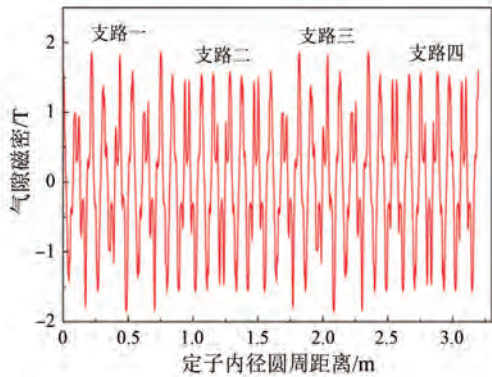


图 11 两条对称支路运行时的负载气隙磁密
Fig. 11 Load air-gap flux density for two symmetrical branches operation

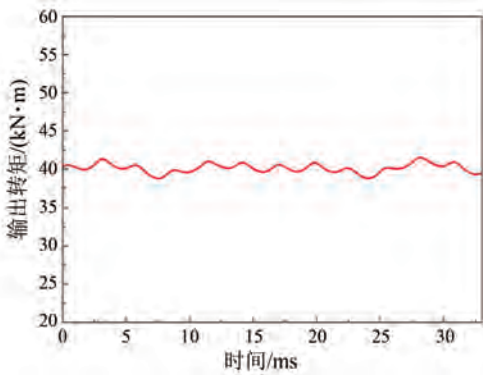


图 12 两条对称支路运行时的输出转矩
Fig. 12 Output torque for two symmetrical branches operation

由图 11 和 13 可知, 通电绕组部分的磁场比不通电部分仅由永磁体产生的磁场大, 气隙磁场分布不均匀。由图 12 和 14 可知, 两条支路运行时, 无论是两条对称支路投入运行或是两条相邻支路投入运行, 电机的输出转矩都达到 40 kN·m 以上, 为额定转矩的 1/2, 因此当系统的负载率低

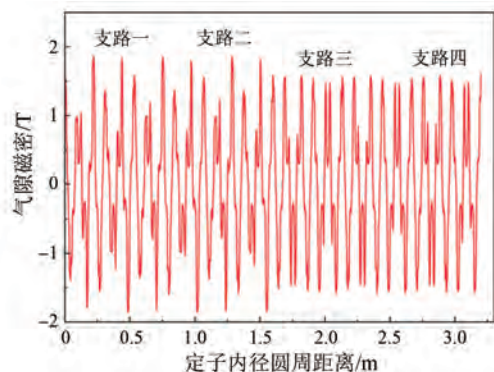


图 13 两条相邻支路运行时的负载气隙磁密

Fig. 13 Load air-gap flux density for two adjacent branches operation

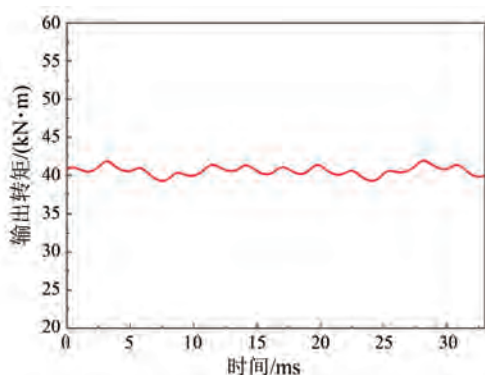


图 14 两条相邻支路运行时的输出转矩

Fig. 14 Output torque for two adjacent branches operation

于 50% 时,可以使电机投入两条支路运行,以提高电机效率。

2.2.4 一条支路运行仿真分析

当一条支路运行时,仿真结果如图 15 和图 16 所示。

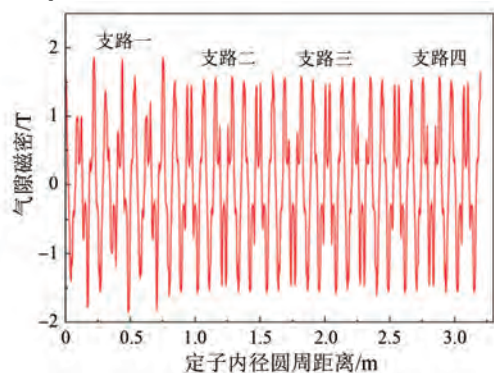


图 15 一条支路运行时的负载气隙磁密

Fig. 15 Load air-gap flux density for one branch operation

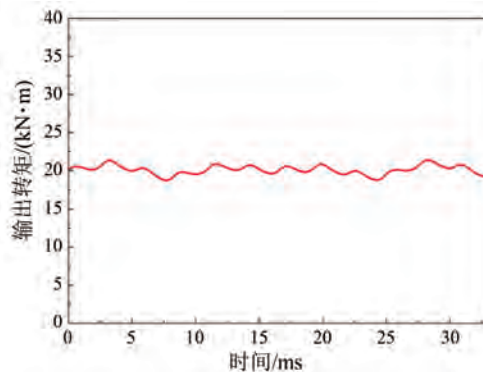


图 16 一条支路运行时的输出转矩

Fig. 16 Output torque for one branch operation

由图 16 可知,当只有一条支路运行时,电机的输出转矩为额定转矩的 1/4,从仿真结果看电机能够正常运行,但具体还需要进行样机试验来进一步验证电机性能。

2.2.5 电机可靠性分析

考虑到当某个低压变频器出现故障时,为保证电机输出额定转矩,需加大电机其他三条支路的输入电流,仿真结果如图 17 所示。

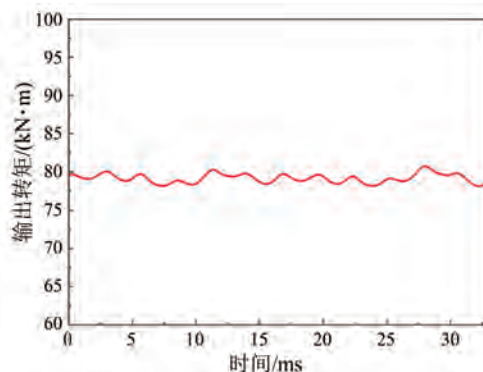


图 17 三条支路加大电流运行时的输出转矩

Fig. 17 Output torque at increased current operation of the three branches

此时仅有三条支路运行,电流为原支路电流的 1.37 倍,电机同样可以输出额定转矩。当某个变频器发生故障时,可以保证设备正常运行,提高系统可靠性。

3 基于转子辅助槽的齿槽转矩优化

对于采用多支路结构的电机,只有部分支路运行时会导致气隙磁场分布不均匀,从而加剧电机齿槽转矩,同时因为电机自身转矩大,即使齿槽转矩占比小,但实际值仍然很大。因此在电机设

计时应尽量减少小齿槽转矩^[20-23]。

目前研究中永磁电机齿槽转矩的优化措施分为三类: 基于永磁电机的定子槽来降低齿槽转矩^[24-26]; 基于转子辅助槽来降低齿槽转矩^[27-28]; 基于磁极结构来降低齿槽转矩^[29]。

3.1 转子辅助槽尺寸分析

本文通过在转子上开设辅助槽来优化电机齿槽转矩。转子冲片横截面如图 18 所示。椭圆辅助槽的长轴尺寸 a 和短轴尺寸 b 对齿槽转矩的影响如图 19 和图 20 所示。

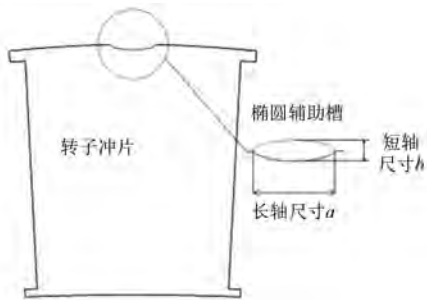


图 18 转子冲片横截面

Fig. 18 Cross-sectional view of rotor lamination

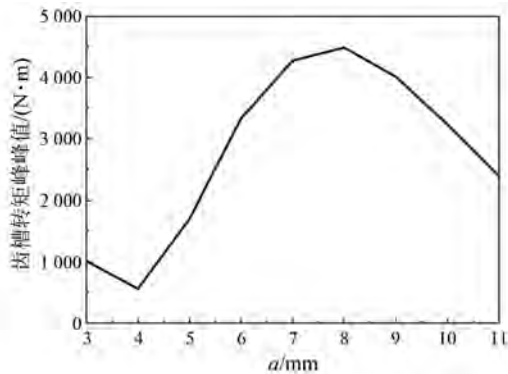


图 19 辅助槽长轴对齿槽转矩的影响

Fig. 19 The influence of the major axis of the auxiliary slot on the cogging torque

由图 19 和图 20 可知, 齿槽转矩随着 a 的增加先减小后增加再减小, 最大值为 $4\,491\text{ N}\cdot\text{m}$, 最小值为 $562\text{ N}\cdot\text{m}$; 齿槽转矩随着 b 的增加先减小后增加, 最大值为 $1\,407\text{ N}\cdot\text{m}$, 最小值为 $562\text{ N}\cdot\text{m}$ 。结合实际情况, 本文设置 a 为 3 mm , b 为 1 mm 。

3.2 齿槽转矩优化结果

设置转子辅助槽长轴尺寸 a 为 3 mm , 短轴尺寸 b 为 1 mm 。优化前后的齿槽转矩和输出转矩如图 21 和图 22 所示。

由图 21 可知, 优化前电机齿槽转矩峰峰值为

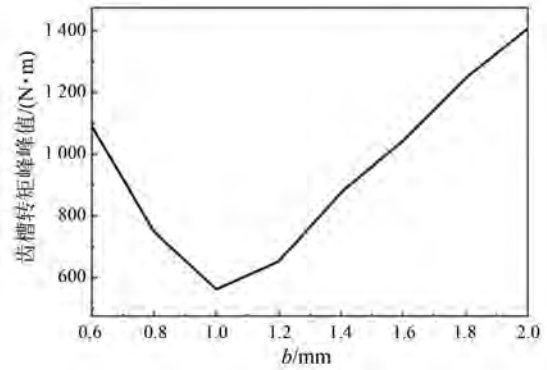


图 20 辅助槽短轴对齿槽转矩的影响

Fig. 20 The influence of the minor axis of the auxiliary slot on the cogging torque

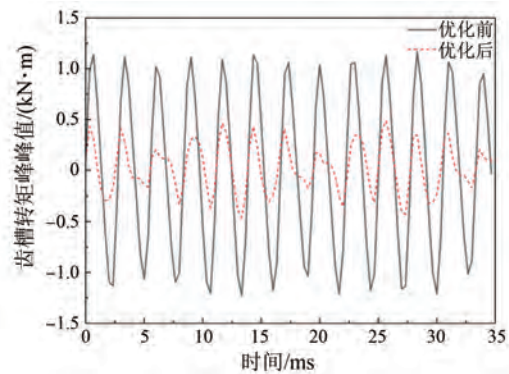


图 21 优化前后齿槽转矩波形

Fig. 21 Cogging torque waveforms before and after optimization

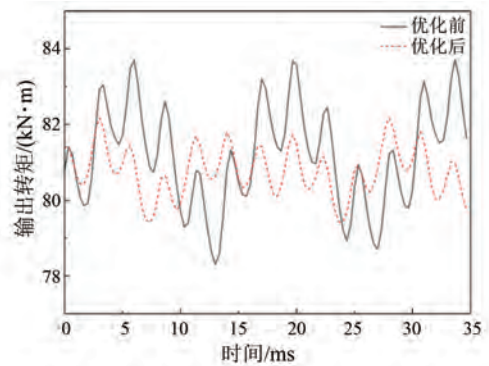


图 22 优化前后输出转矩波形

Fig. 22 Output torque waveforms before and after optimization

$2\,419.5\text{ N}\cdot\text{m}$, 优化后齿槽转矩峰峰值降为 $1\,136.7\text{ N}\cdot\text{m}$, 降幅为 53.02% 。由图 22 可知, 电机的输出转矩平均值虽然由优化前的 $80.91\text{ kN}\cdot\text{m}$ 下降至 $80.42\text{ kN}\cdot\text{m}$, 但输出转矩脉动得到了明显改善。

4 结语

本文根据港口大功率永磁直驱电机的设计要求,对电机进行电磁设计,将绕组的并联支路数设计为4支,对电机的定子绕组进行多支路结构设计,并通过有限元仿真分析不同支路投入运行时电机的电磁性能,然后通过转子开设辅助槽对电机的齿槽转矩进行优化。得出以下结论。

(1)对于港口传输用大功率永磁电机,采用低压多支路结构,由各个支路来共同分担整个电机的电流,有效解决了低压方案电流大的问题。

(2)由多个低压变频器给各个支路独立供电,可根据负载的需求投入不同的支路运行,提高电机整体效率。同时当某个变频器出现故障时,可通过控制其他变频器,增大电流,使电机仍输出额定转矩,大大提高了电机系统的可靠性。

(3)在转子冲片的气隙侧中间位置开设辅助槽,有效降低了电机齿槽转矩。未开槽的电机齿槽转矩峰值为 $2\,419.5\text{ N}\cdot\text{m}$,经过转子开槽优化后降为 $1\,136.7\text{ N}\cdot\text{m}$,降幅为53.02%。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

周志勇、程祥进行了方案设计、内容总结与论文撰写,周志勇、张炳义进行了仿真研究,周志勇、程祥参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Zhou Zhiyong and Cheng Xiang. The simulation study was conducted by Zhou Zhiyong and Zhang Bingyi. The manuscript was reviewed and revised by Zhou Zhiyong and Cheng Xiang. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

[1] 魏恒. 港口起重机永磁驱动系统中电机温升与参数辨识研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.

WEI H. Research on motor temperature rise and parameter identification in the permanent magnet drive systems of port crane [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.

[2] 熊勇清, 许智宏. 海上丝绸之路港口与港口城市的互动发展机制研究[J]. 财经理论与实践, 2017, 38(1): 128-133.

XIONG Y Q, XU Z H. Research of interactive relationship between port development and urban economic development based on the key port city of maritime silk road [J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2017, 38(1): 128-133.

[3] 贺林林, 金勇, 彭银霞, 等. “双碳”背景下国内外绿色港口建设发展综述[J]. 水运工程, 2024, (7): 42-50+67.

HE L L, JIN Y, PENG Y X, et al. Review of green port construction and development under carbon peaking and carbon neutrality goals background [J]. Port & Waterway Engineering, 2024, (7): 42-50+67.

[4] 刘晋川. 我国港口机械的现状与发展[J]. 港口装卸, 2013, (2): 1-5.

LIU J C. Status of china port machinery and its development [J]. Port Operation, 2013, (2): 1-5.

[5] 吴磊. 港口散料输送系统外转子式永磁直驱技术应用分析[J]. 港口装卸, 2024, (2): 16-18.

WU L. Application analysis of external rotor type permanent magnet direct drive technology for port transporting bulk materials systems [J]. Port Operation, 2024, (2): 16-18.

[6] 吴家成. 矿井用皮带传输机直驱永磁电机关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.

WU J C. Study on key technology of direct drive permanent magnet motors for belt conveyor used in mine [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.

[7] 王传奇. 带式输送机驱动系统技术现状及发展趋势[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(1): 37-39.

WANG C Q. Technical status and development trend of belt conveyor drive system [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2022, 58(1): 37-39.

[8] 金磊. 低速大扭矩永磁同步电动机的电机设计及转矩优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.

JIN L. Motor design and torque optimization of low-

- speed high-torque permanent magnet synchronous motors [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [9] 葛研军, 万宗伟, 王雪, 等. 新型永磁复合电机的设计与优化[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(6): 51-55.
- GE Y J, WAN Z W, WANG X, et al. Design and optimization of new permanent magnet compound motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(6): 51-55.
- [10] 鲍晓华, 刘佳伟, 孙跃, 等. 低速大转矩永磁直驱电机研究综述与展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1148-1160.
- BAO X H, LIU J W, SUN Y, et al. Review and prospect of low-speed high-torque permanent magnet machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1148-1160.
- [11] 刘宇. 低压兆瓦级多支路永磁同步电动机研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
- LIU Y. Research on low-voltage MW-rate multi-branch permanent magnet synchronous motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2010.
- [12] 李硕. 低压兆瓦级多支路感应电动机研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
- LI S. Research on low-voltage MW-rated multi-branch induction motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2010.
- [13] 孙少男. 宽转速运行多支路直驱永磁风力发电机系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- SUN S N. A study on the direct-drive permanent magnet wind turbine system with wide speed operation and multiple branch [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [14] 汪波, 王荣鑫, 程明, 等. 多三相容错 FSCW-IPM 极槽配合分析[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 352-361.
- WANG B, WANG R X, CHENG M, et al. Slot and pole combination analysis of multiple 3-phase fault tolerant FSCW-IPM [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 352-361.
- [15] 查陈诚. 多三相分数槽集中式绕组永磁同步容错电机的研究与分析[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- ZHA C C. Research and analysis of multiple 3-phase fractional slot concentrated winding fault tolerant permanent magnet synchronous motor [D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [16] ZHAO W X, ZHENG J Q, JI J H, et al. Star and delta hybrid connection of a FSCW PM machine for low space harmonics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9266-9279.
- [17] ZHAO S H, CHEN J H, GUO Y P, et al. Harmonic and vibration analysis of dual three-phase PMSM with one-phase open circuit fault [J]. Symmetry, 2022, 14(2): 290-290.
- [18] XU P L, FENG J H, GUO S Y, et al. Analysis of dual three-phase permanent magnet synchronous machines with different angle displacements [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 1941-1954.
- [19] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- TANG R Y. Modern Permanent Magnet Machines Theory and Design [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [20] 刘晓磊. 低压大功率多支路永磁同步电动机参数计算及绕组端部电磁力分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- LIU X L. Parameter calculation and electromagnetic force analysis of the low-voltage high-power multi-branch permanent magnet synchronous motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [21] 徐重鹤, 张炳义. 不同极槽配合内置永磁电机转矩性能研究[J]. 微电机, 2017, 50(4): 1-5+16.
- XU Z H, ZHANG B Y. Analysis of torque characteristic of IPMSM with pole-slot combination [J]. Micromotors, 2017, 50(4): 1-5+16.
- [22] 孙重阳. 矿用防爆永磁直驱电机关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- SUN C Y. Research on key technologies of mine explosion-proof permanent magnet direct drive motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.
- [23] 王秀和. 永磁电机[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- WANG X H. Permanent-Magnet Machine [M]. 2th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [24] 张琪, 梁冰洁, 黄苏融, 等. 槽口宽度对分数槽集中绕组永磁电机齿槽转矩的影响[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(7): 1-5.
- ZHANG Q, LIANG B J, HUANG S R, et al. Effect of slot opening on cogging torque of permanent magnet synchronous motor with fraction-slot concentrated

- winding [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2015, 42(7): 1-5.
- [25] 王江兰, 谷昭斌. 定子闭口槽对永磁同步电机齿槽转矩削弱的研究[J]. *汽车实用技术*, 2023, 48(14): 119-123.
- WANG J L, GU Z B. Study on influence of stator closed slot on cogging torque of permanent magnet synchronous motors [J]. *Automobile Applied Technology*, 2023, 48(14): 119-123.
- [26] 古海江, 黄文美, 王超, 等. 定子齿开槽对内置式永磁电机齿槽转矩的影响[J]. *电机与控制应用*, 2016, 43(8): 40-45.
- GU H J, HUANG W M, WANG C, et al. Influence of stator tooth notching on cogging torque in interior permanent magnet motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2016, 43(8): 40-45.
- [27] 李天元, 夏加宽, 龙宇航, 等. 不同转子辅助槽对内置式永磁电机齿槽转矩的影响[J]. *微特电机*, 2019, 47(5): 17-20+28.
- LI T Y, XIA J K, LONG Y H, et al. Influence of different rotor's auxiliary slots on cogging torque of IPM motor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2019, 47(5): 17-20+28.
- [28] 冯魏, 郭凯凯. 低转矩脉动永磁辅助同步磁阻电机转子结构优化设计[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(9): 70-79.
- FENG W, GUO K K. Optimized rotor design for permanent magnet assisted synchronous reluctance motors with low torque ripple [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(9): 70-79.
- [29] 阮博, 谷爱昱, 刘海, 等. 基于磁极分段优化的内置式永磁同步电机齿槽转矩削弱方法[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(7): 20-25.
- RUAN B, GU A Y, LIU H, et al. Cogging torque reduction of interior permanent magnet synchronous motor based with permanent magnet segmentation optimization [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(7): 20-25.

收稿日期:2025-05-24

收到修改稿日期:2025-08-27

作者简介:

周志勇(2000-),男,硕士研究生,研究方向为高品质永磁及特种电机系统,15163849852@163.com;

*通信作者:程 祥(1966-),男,硕士,副教授,研究方向为电力系统无功补偿与电能质量控制,1380539230@qq.com。