

大功率多相变频驱动系统设计

邢 印

(卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司, 河南 南阳 473008)

摘 要: 与传统三相变频器相比, 大功率多相变频驱动系统在功率不变的情况下可以通过增加相数降低电压, 并在极短时间内进行飞车启动、在缺相情况下进行并网、旁路运行。整个系统具有安全可靠、系统效率高、低振动、低噪声、低成本、节能环保等优点。对高低压转换星型多相变频驱动系统拓扑结构进行了详细说明, 对大功率多相变频驱动系统进行了参数与结构设计, 并通过工程样机测试验证, 依据数据分析、试验结果、现场运行验证了该产品的先进性。

关键词: 电动机; 多相; 变频器; 飞车启动; 缺相并网

中图分类号: TM 921 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)08-0082-05

Development of High-Power Multiphase Variable Frequency Drive System

XING Yin

(Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473008, China)

Abstract: Compared with traditional three-phase inverters, high-power multiphase variable frequency drive system could reduce the voltage by increasing the number of phases under the condition of unchanged power. It could speed flying start in a very short period of time, and operate under grid connection and bypass modes in the absence of under phase loss. The whole system had the advantages of safety and reliability, high system efficiency, low vibration, low noise, low cost, energy saving and environmental protection. The topology structure of star-shaped multiphase variable frequency drive system with high-low voltage conversion was described in detail, and the parameters and structure of high-power multi-phase variable frequency drive system were designed. Through the test and verification of the engineering prototype, the advantages nature of the product were proved based on data analysis, test results and field operation.

Key words: motor; multiphase; inverter; flying start; grid connection under phase loss

0 引 言

受传统三相和正弦波形供电的限制, 大功率变频器的共同特点是通过提高电机的输入电压或输入电流来实现大功率, 没有将变频电机与变频调速系统作为一个整体去考虑。同时, 由于三相电机追求变频器输出电压为正弦波的特点, 变频器结构复杂、可靠性低, 一旦其中一个器件损坏, 将导致整个传动系统故障。

随着电力电子技术的快速发展, 变频调速系统的相数和供电波形已不再是限制条件, 变频调速装置与电机完全可以看作一个整体, 在电压和

电流 2 个设计自由度的基础上增加相数的自由度, 通过 3 个自由度的优化组合达到最佳的大功率驱动性能。

本文针对高压电机及其驱动技术方案存在的问题, 从电力电子技术与电机技术紧密结合的系统角度考虑, 提出了一种新的高低压转换星型多相变频驱动系统拓扑结构。采用多相结构, 可以在不增大或少增大电压、电流等级的前提下实现大功率变频调速, 简化了变频调速系统的工艺流程, 对器件特性要求有所降低, 结构简单, 有助于低成本推广应用大功率变频调速系统^[1-2]。

作者简介: 邢 印(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机、风机设计与开发。

1 大功率多相变频驱动系统设计

大功率多相变频驱动系统由 1 台输入变压器、3 台二电平变频器和 1 台九相电机组成。

1.1 高低压转换星型多相变频驱动系统

高低压转换星型多相变频驱动系统拓扑结构如图 1 所示。该设计汲取了“罗宾康”方案中多脉波移相变压整流系统的优点,可以减少电网侧污染;实行若干个独立整流电路,避免了多个整流电路并联过程中的回路振荡。

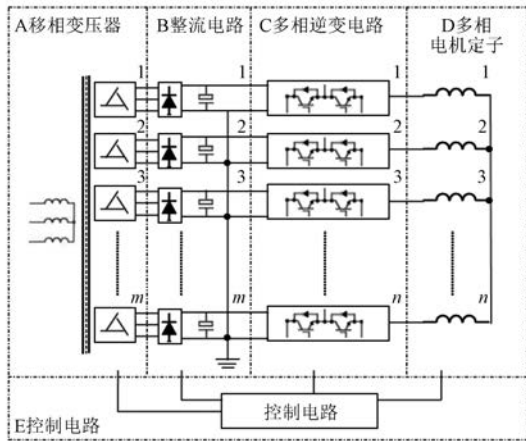


图 1 高低压转换星型多相变频驱动系统拓扑结构

移相变频器一次侧为高压电路,二次侧、整流电路、逆变电路、电机本体均为低压电路;逆变电路为二电平单桥臂逆变电路;简化逆变电路结构,与级联电路相比可以少用 50% 的功率器件;电机本体按照低压电机的规范设计,降低绝缘厚度,提高电机槽利用率,从而提升功率密度^[3-5]。

由于采用多相变频,工作时定子磁场矢量呈

现多边形(2N),即使某一相出现故障,通过控制软件调整可实现带故障运行。

1.2 变频器设计

变频器控制芯片采用 ADI 公司的 ADSP 21489 芯片,450M 内核时钟速度,优于目前常用的 TI 公司的 28335 芯片的 150M,处理速度更快。控制柜集成在变压器柜内部,变频器长度方向减小了 800 mm,使变频器整体体积更小,结构更紧凑。直流电容采用干式薄膜电容,寿命长,性能和可靠性均优于电解电容和油浸式电容。采用热管散热器,与普通铝型材散热器相比,散热能力更强、体积更小^[6]。

1.3 多相变频飞车起动技术

变频器将无外部供电的自由旋转电机在极短时间内切换成变频运行的过程称为飞车起动。飞车起动可以减少自由旋转电机静止后重新进行变频拖动的等待时间。本文将飞车起动由三相扩展至九相,打破了原有算法的局限性,使其应用领域更广泛。

分断工频供电对应并网接触器、合闸变频器输入及输出接触器,变频器充电就绪后,起动运行,通过软件控制算法输出 5% ~ 20% 的额定电压,并对自由旋转的电机进行频率搜索,当检测到九相电流矢量分解的模长出现“拐点”(最小电流)后,则表示搜索到了此时电机的旋转频率。在变频器运行正常的前提下,快速提升此时运行频率对应的 V/f 曲线电压,完成九相电机的飞车起动^[7-8]。

多相变频器飞车起动原理图和输出波形如图 2 和图 3 所示。

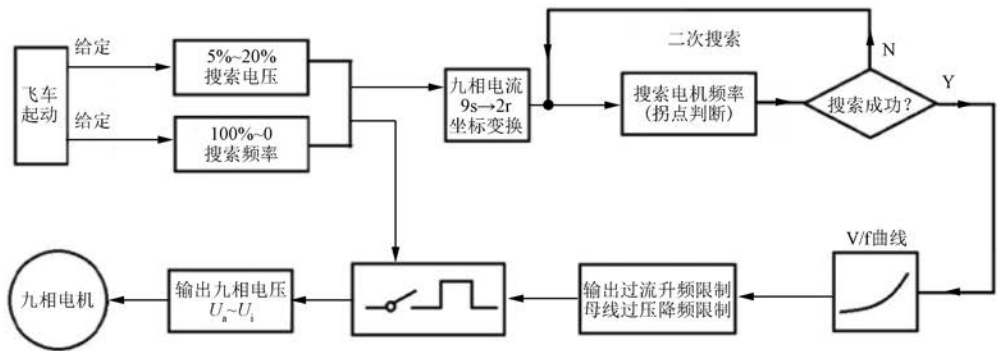


图 2 多相变频器飞车起动原理图

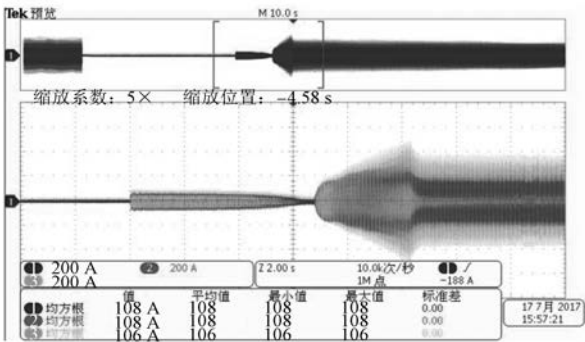


图3 多相变频器输出波形图

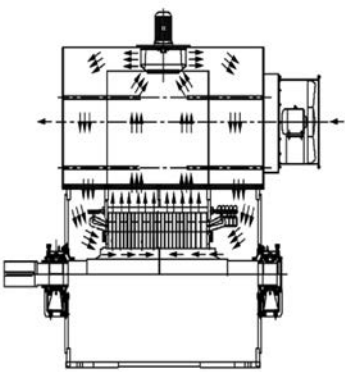


图4 九相电机风路结构图

1.4 多相变频缺相并网技术

传统三相变频器在出现故障时,若要保证现场设备运行,只能进行直接工频并网,电机的启动冲击电流可达额定值的5~8倍,对设备操作的安全性和电机的使用寿命等均有较大影响。

九相变频系统的缺相并网技术,可在一组变频器出现故障时,另两组变频器输出六相电压将电机拖动至工频,在满足电压差、频率差、角度差均在设定范围内的情况下,使并网冲击电流减小。

1.5 多相变频系统旁路技术

移相旁路变压器二次侧3组独立绕组连接九相变频器的3组功率柜,可以组成3套独立的三相变频控制系统。在任意一套三相变频控制系统出现故障时,可以将故障系统切除,实现任意两组组合,采用六相拖动电机运行。此项创新技术可以减少因变频器维护造成的用户停产损失,极大地提高了设备的使用效率^[9]。

1.6 九相电机风路结构设计

九相电机内风路采用对称双侧通风结构,无内风扇,在冷却器上设置内通风机。内风路从转子铁心两端进入,冷却效果好,铁心两端温度均匀,保证定子绕组不产生过热点,延长了电动机的使用寿命;外风路在冷却器上增加一个强迫风机,有效地解决了电机带外风扇机械耗大、效率低、噪声大、铁心冷却不均匀等问题^[10]。

九相电机风路结构图如图4所示。

1.7 九相电机电磁设计

由于九相电机电磁设计没有成熟的计算软件,使理论与计算成为设计难点,因此,卧龙公司与浙江科技学院合作,进行联合电磁设计计

算。先分别采用公式计算法和有限元仿真分析2种方法,并对2种方法进行了不同方案优化组合,再经过对比分析选用最佳方案。

九相电机电磁设计基本参数如表1所示。不同方案电磁设计计算结果如表2所示。

表1 九相电机电磁设计基本参数

参数名称	参数值
三圆尺寸/mm	1 190/825/500
铁心长度 L_{Fe} /mm	1 300
绕组线规	8-7.1×2.24
绕组匝数 SN1(匝/槽)	8
绕组接法 A1	Y
绕组节距 Y	9
径向通风道数	23
定、转子槽配合	721z90
定子槽高 H_{12} /mm	91.5
定子槽宽 B_1 /mm	17.08
气隙/mm	2.5
转子槽形代号 LS	3
转子槽口宽度 B_{02} /mm	4.5
转子槽口高度 H_{02} /mm	2.2
转子槽上半圆 B_{R1} /mm	6.25
转子槽下半圆 B_{R2} /mm	4.45
转子槽高度 H_{R2} /mm	50
端环厚度/mm	45
端环内、外径/mm	638,818
端环材料	T2Y
笼条材料	T2Y

表 2 不同方案电磁设计计算结果

参数名称	公式计算法	有限元仿真分析
定子齿、轭磁密/T	1.2、0.9	1.3、0.9
转子齿、轭磁密/T	1.4、0.8	1.4、0.8
相电流/A	591.2	572.8
定子绕组电密/(A·mm ⁻²)	2.38	2.31
线负荷/(A·mm ⁻²)	657	637
热负荷/(A·mm ⁻²)	156.2	146.0
转子导条电密/(A·mm ⁻²)	2.71	2.66
转子端环电密/(A·mm ⁻²)	2.255	2.21
定子电阻/Ω	0.006 13	0.006 13
定子铜耗/kW	19.25	18.1
转子铜耗/kW	19.5	18.84
铁耗/kW	16.1	16
杂散损耗/kW	14.6	14.6
风摩损耗/kW	25.2	25.2
效率/%	96.9	96.83
功率因数 cos φ	0.852 6	0.882 6
额定转速/(r·min ⁻¹)	744.86	745.1

1.8 九相电机低压绝缘结构

国内首次生产 2 800 kW 低压电机,绝缘厚度的选取是关键。绝缘厚影响电机性能,厚度大会增加成本;绝缘薄不可靠、不安全。通过研究和单支线圈老化试验可得,直线部分主绝缘厚度为 1.28 mm。

1.9 端部引线布置

电机引线多、截面积大,使电机绕组引线布置成为难题。该设计采用 18 个同心并联铜环左右分布(非整圆,铜排规格为 40 mm×16 mm,左侧布置 9 个并联环,右侧布置 9 个并联环)短接,并并联环排列在线圈支架和端部上,有较高的机械强度。铜环到主接线盒的连接采用 2 根 120 mm² 硅橡胶引线并联。

2 对比试验

九相电机采用陪试机对托温升试验法,较准确地模拟出多相电机负载温升、性能等试验,并在用户的见证下,顺利完成各项试验。试验样机基本参数及测试结果对比如表 3 和表 4 所示。

表 3 试验样机基本参数

名称	参数名称	参数值
九相电机	额定功率/kW	2 800
	额定相电压/kV	0.66
	相数	9
	额定电流/A	575
	额定频率/Hz	50
	变频范围/Hz	11.5~50.0
	额定转速/(r·min ⁻¹)	745
	效率/%	96.4
	热分级	155(F)
	冷却方式	IC666,强迫风机
九相变频器	防护等级	IP55
	额定输入电压/kV	10(-5%~5%)
	最高输出相电压/kV	0.68
	额定电流/A	590
	额定功率/kW	2 800
	冷却方式	强迫风冷
	柜体防护等级	IP30
	进出线方式	下进下出

表 4 样机试验结果对比

项目	试验结果	国外某电机 1	国外某电机 2
效率/%	96.94	96.60	96.50
功率因数 cos φ	0.85	0.83	0.84
堵转电流倍数	5.1	5.5	5.7
堵转转矩倍数	0.65	0.60	0.63
最大转矩倍数	2.2	2.0	1.8
振动/(mm·s ⁻¹)	0.6	1.8	1.5
噪声 L _p /dB(A)	84.5	86.0	88.0
定子温升/K	65	-	-
轴伸端轴承温度/℃	52	-	-
非轴伸端温度/℃	52	-	-

由表 4 可知,大功率多相变频驱动系统设计可靠性高、效率高、噪声低、振动小,与同规格的外三相电机相比,效率分别高了 0.34% 和 0.44%、功率因数分别高了 0.01 和 0.02、堵转电流倍数分别低 0.4 和 0.6、堵转转矩倍数分别高了 0.05 和 0.02、最大转矩倍数分别高 0.2 和 0.4、振动分别低了 1.2 mm/s 和 0.9 mm/s、噪声分别低了 1.5 dB 和 3.5 dB,各个性能均领先国际。

3 应用实例

2017年9月,大功率多相变频驱动系统(九相电机和九相变频器)在马鞍山钢铁股份有限公司顺利投运,至今已连续稳定运行一年零六个月,无故障情况发生且该系统可靠性高、效率高,节能效果明显;起动电流小,运行更平稳;多相电机温升低、噪声低、振动小。

4 结 语

本文所设计的大功率多相变频驱动系统具有起动平稳、系统节能、运行安全可靠、成本低等优点,九相电机运行效率高、温升低、振动小、噪声低,各种性能优异,产品世界领先。

大功率多相变频驱动系统可用于驱动各种通用机械,如压缩机、水泵、破碎机、切削机床、运输机械及其他机械设备,可在矿山、机械工业、石油化工工业、发电厂等各种工矿企业中广泛推广和应用,在舰船、潜艇、航空等军工领域具有广阔的发展前景。

【参考文献】

[1] 薛山,温旭辉,王又珑.多相永磁同步电机多维控制

技术[J].电工技术学报,2008,23(9): 65.

[2] 刘雪梅,倪泽浩,李爱平.基于ANSYS的大型异步电机转子系统动态特性分析[J].中国工程机械学报,2013,11(6): 480.

[3] 王天煜,王凤翔.大型异步电动机定子振动与模态分析[J].中国电机工程学报,2007,27(12): 41.

[4] 王又珑.十五相感应电机磁场分析及驱动技术研究[D].北京:中国科学院电工研究所,2009.

[5] 李发海,朱东起.电机学[M].3版.北京:科学出版社,2001.

[6] 黄进.p对极n相对称系统的变换理论[J].电工技术学报,1995,10(1): 53.

[7] 王东,马伟明,顾伟峰,等.12/3相双绕组感应发电机的谐波不对称分析[J].中国电机工程学报,2004,24(5): 148.

[8] 吴新振,王祥珩,罗成.多相异步电机谐波电流与谐波磁势的对应关系[J].清华大学学报(自然科学版),2005,45(7): 865.

[9] 鲍晓华,程晓巍,方勇,等.大型异步电机定子端部绕组电磁力的研究[J].电机与控制学报,2013,17(10): 27.

[10] 王建乔,赵强.大功率九相变频异步电机通风系统热流耦合仿真分析[J].电机与控制应用,2018,45(7): 78.

收稿日期: 2019-04-30

(上接第69页)

[4] 许实章.新型电机绕组——理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2002.

[5] 诸自强,陈永校,商庆元,等.低噪声异步电动机的理论和设计[J].微特电机,1988,16(4): 13.

[6] 程小华,陈雪华,张城生,等.交流电机变极绕组设计I:理论基础——概念和法则[J].中国电机工程学报,1997,17(2): 84.

[7] 程小华,陈雪华,张城生,等.交流电机变级绕组的设计II:统一设计法[J].中国电机工程学报,1997,17(2): 87.

[8] 程小华.交流电机绕组的变极理论[M].北京:科学出版社,2014.

[9] RAWCLIFFE G H, BURBIDGE R F, FONG W. Induction-motor speed-changing by pole-amplitude modulation [J]. Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering, 1958, 105(22): 411.

[10] 海勒尔 B, 哈马塔 V. 异步电机中谐波磁场的作用[M]. 章名涛, 俞鑫昌, 译. 北京: 机械工业出版社, 1980.

收稿日期: 2019-04-26