

高可靠性多相多单元冗余型工业永磁电机设计

鲁方春 黄家友 李文成

安徽明腾永磁机电设备有限公司

DOI:10.12238/ems.v5i11.6594

[摘要] 通过分析永磁电机的基本工作原理,结合现阶段工业用永磁电机对可靠性要求越来越高的发展现状,提出了一种永磁电机多相多单元的冗余型设计方案。通过多并联支路数拆分成多个单元,均布于电机定子圆周,实现各单元的单个或多个单元驱动控制可稳定运行,提高了工业用永磁电机的可靠性;并且可以将一个大功率电机拆分成几个小功率驱动控制,以低压变频驱动替代高压变频驱动,降低了驱动器成本。作多单元冗余设计,在正常状态下,多单元同时运行,降低了各单元电机的负载率,从而降低电机温升,提高了电机使用寿命与可靠性。同时,在以铜耗为主的低速永磁直驱电机上,低负载率也提高了电机运行效率。多相多单元冗余型工业永磁电机设计,为一些需要高可靠性的工业应用领域提供了系统解决方案,在低速永磁直驱电机应用领域,冗余型设计更高效、节能,为工厂生产降本、降低碳排放提供了最优动力。

[关键词] 高可靠性电机; 多相电机; 多单元电机; 冗余型设计电机

中图分类号: TM3 **文献标识码:** A

Design of high reliability multi-phase multi-unit redundant industrial permanent magnet motor

Fangchun Lu Jiayou huang Wencheng Li

Anhui Mingteng Permanent Magnet Electromechanical Equipment Co., Ltd

[Abstract] Based on the analysis of the basic working principle of permanent magnet motor and the increasing reliability requirement of industrial permanent magnet motor, a redundant design scheme of multi-phase and multi-unit permanent magnet motor was proposed. By dividing the number of parallel branches into multiple units, distributed in the stator circumference of the motor, the single or multiple units of each unit can be driven and controlled stably, which improves the reliability of the industrial permanent magnet motor. And a high-power motor can be divided into several low-power drive control, with low-voltage variable frequency drive instead of high-voltage variable frequency drive, reducing the driver cost. Multi-unit redundancy design, in normal state, multiple units run at the same time, reduce the load rate of each unit motor, thereby reducing the motor temperature rise, improve the motor service life and reliability. At the same time, on the low-speed permanent magnet direct drive motor with copper consumption, the low load rate also improves the operation efficiency of the motor. The design of multi-phase multi-unit redundant industrial permanent magnet motor provides a system solution for some industrial applications requiring high reliability. In the application field of low-speed permanent magnet direct drive motor, the redundant design is more efficient and energy-saving, providing the optimal power for factory production to reduce cost and reduce carbon emissions.

[Key words] high reliability motor; Polyphase motor; Multi-unit motor; Redundant design motor

引言

根据国家“双碳”目标的制定,为减少碳排放,高效节能永磁电机在工业领域的应用日趋广泛,逐步占领工业领域电驱市场,但在一些对驱动系统可靠性要求很高的应用工况,永磁电机的应用受阻。一方面是对新的电驱系统不够了解,厂家缺乏成功的应用案例,不敢贸然作设计更改。另一方面对永磁电机驱动系

统可靠性存疑,特别是大多数永磁电机驱动系统都需要配备永磁电机专用变频器,变频器元器件繁多,增加了系统故障点,对系统的可靠性有一定影响。类似这些应用工况,驱动系统的高可靠性比高效节能更重要。

永磁电机想在工业应用领域进一步取得更广泛的应用,须同时考虑以下几点:第一,高可靠性的永磁电机驱动系统是基本

要求;第二,实现高效节能,降低碳排放,于国家“双碳”目标的实现有利;第三,从各应用客户考虑,需要高性价比,新驱动系统投入成本不能太高。

综上所述,高效节能、高可靠性、高性价比的永磁电机驱动系统,是市场需求,也是工业用永磁电机驱动系统重要发展方向。本文所述高可靠性多相多单元冗余型工业永磁电机设计,主要从上述三方面满足现阶段市场需求。

1 多相多单元永磁电机设计原理

1.1 多并联支路的磁动势

永磁同步电机各并联支路磁动势相同,故可按并联支路将电机拆分为 n 个三相独立的单元, n 为并联支路数 a 的因数。各单元磁动势幅值相同、相位相同,故各单元所加电压幅值相同、相位相同。

1.2 极/槽(P/Z)配合的选取与电机可拆分相数的关系

电机的最大并联支路与极槽配合有关,如定子槽数 Z ,极对数 P ,每相槽数 $Z/3$ 与极数 $2P$ 的最大公约数 a 即为最大并联支路数。但在电机设计过程中,选取极槽配合时,不能以最大并联支路数作为拆分单元数。在多并联支路拆分为多单元的设计中,为保证每个单元都能独立稳定运行,须保证每个单元线圈在圆周上的分布对称,以获得对称的磁势和电势,避免过大的单边磁拉力。所以对应极槽配合的电机可拆分的最大单元数要考虑电机的虚拟单元电机数,虚拟单元电机数为电机槽数 Z 与电机极对数 P 的最大公约数 t 。那么对应极槽配合可拆分的最大相数为 $3t$,可拆分相数为3乘最大公约数 t 的任意因数。

以一款3单元9相电机为研究对象,设计输入参数如下:

(1)额定电压:440V;(2)额定功率:1000kW;(3)额定转速:90RPM。

样机方案选用的是72槽60极极槽配合,最大并联支路数 $a=12$,虚拟单元电机数 $t=6$,拆分单元数为3,每单元每相线圈数 $72/3/3=8$,8个线圈,每两个一组,间隔90度均布于定子圆周上,分布对称,可独立稳定运行。

2 电机绕组型式与冗余设计

2.1 电机绕组型式

根据绕组线圈制造工艺的不同,永磁电机常规绕组型式有双层叠绕分布绕组和分数槽集中绕组。双层叠绕分布绕组同一槽两个线圈呈上下结构,分数槽集中绕组同一槽两个线圈呈左右结构,如图(1)所示。两种绕组型式,在设计成多单元多相电机时,同一槽两个线圈,可能属于不同的电机单元,某一个线圈发生匝间短路或对地绝缘击穿故障时容易造成其他单元线圈受损。为提高多相多单元电机的可靠性,需在每一槽两个线圈之间加隔热防火材料作为层间绝缘。

两种电机绕组型式,在可靠性方面的不同之处在于:双层叠绕分布绕组线圈端部各单元线圈之间有交错,某一个线圈端部发生匝间短路也易造成其他单元线圈受损,不易处理,所以集中绕组结构线圈端部可靠性高于分布绕组。

当然两种绕组型式应用范围有所差异,对于大型工业用普通转速电机永磁电机,由于电机极数较少,基本都是分布绕组,

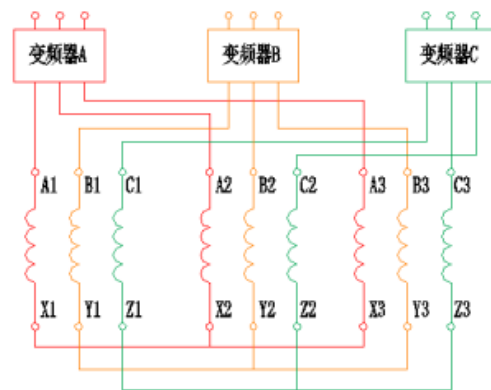
集中绕组齿槽转矩、定子齿谐波在设计时不可控,所以应用受阻。但在多极低速直驱永磁电机上,集中绕组应用较为广泛,一方面,是由于电机极数多,集中绕组定子槽数提高,齿槽转矩、定子齿谐波在设计时可控;另一方面,是散绕组可靠性低、应用电压受限,而小跨距的分布式成型绕组生产制造难于实现。

综上所述,多相多单元的设计,应用于集中绕组型式的低速直驱电机,在电机的可靠性方面较分布绕组高。

2.2 系统的冗余设计

2.2.1 变频器的冗余设计

同样样机方案为例,电机与变频器的电路原理图如图(1)所示。



图(1)三单元九相电机电路原理图

电机三个单元星点独立连接,以保证任何一相线圈出现故障时,断开对应单元,不影响另外两个单元的正常运行。三个单元分别由三个独立的变频器供电,变频器之间有通讯及同步控制,以确保三个变频器输出电压相位相同。同时为提高系统的高可靠性,任一变频器故障,可以在不停机的情况下,将故障变频器承担的功率均摊到另外两个正常的变频器上。故为保证两个变频器带全载稳定运行,三个变频器总功率在选型时需要有冗余。

变频器的冗余设计大大提高了系统可靠性,如果单台变频器的故障率是1%,该变频器系统的故障率降低到约万分之三。

变频器的冗余设计必然提高系统成本,实际系统设计由于功率被均分到多个变频器,单个变频器电流小、功率小,根据实际情况可以以低压系统替代高压系统,降低系统设计成本。

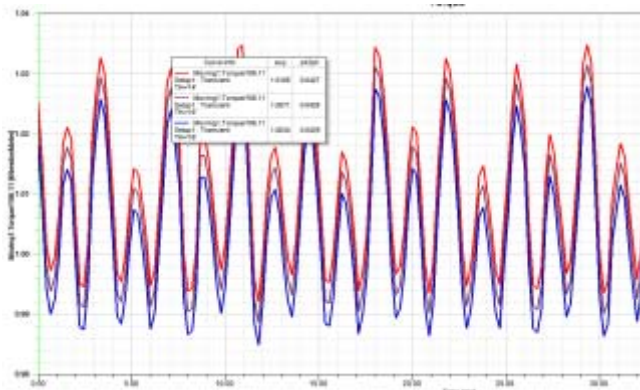
2.2.2 电机的冗余设计

电机的冗余设计原理与变频器相同,如例所示,电机两个单元工作,需满足额定负载需求。正常状态下,三个单元同时工作,电机负载率 $2/3$,此时各单元分配功率小、电流小,故电机总的铜耗下降,电机效率提高,特别是以铜耗为主的低速直驱电机,效率提升明显,冗余设计成本可通过节能回收。且降低的电机正常状态温升,提高电机可靠性和使用寿命,性价比较高。

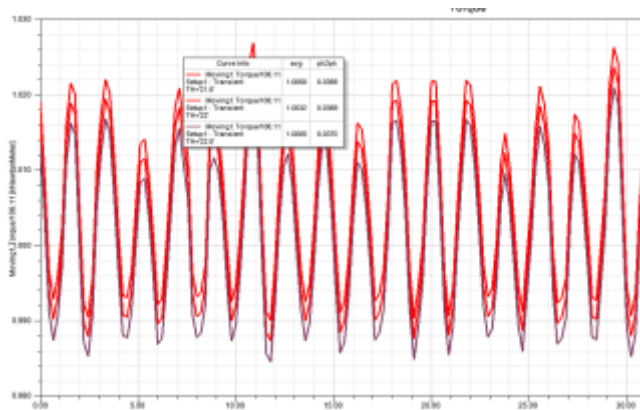
3 电机有限元仿真计算与性能分析

同样以样机方案为研究对象,设计选用60极72槽极槽配合,集中绕组。

仿真计算3个单元9相同时工作和2个单元6相工作的输出转矩曲线对比。



图(2)9相工作输出转矩曲线



图(3)6相工作输出转矩曲线

从上图可以看出,9相工作转矩脉动2.1%,6相工作转矩脉动1.8%,差异不大,主要与相电流大小相关。由于绕组分布对称,缺相缺单元工作,转矩脉动变化很小。

同时,仿真分析9相和6相分别带额定负载时的性能参数。

电机某相故障时,驱动切除故障单元,另外两个单元可正常

带额定负载运行。但运行参数出现差异,首先是相电流增大,功率因数降低,铁耗基本不变,但铜耗增加明显。同时,由于缺相导致的气隙磁密波形畸变,磁钢涡流耗等杂散损耗升高,电机运行效率降低。

4 结语

为了提高工业用永磁电机的可靠性,本文提出了一种多相多单元冗余型工业用永磁电机的设计方案。介绍了多单元结构实现多相设计原理,以及电机与变频器的冗余设计、系统成本控制,如何提高系统可靠性。同时,以直驱永磁电机的设计实例,进行了性能仿真分析,通过参数对比,我们了解了冗余设计,实现电机高效的原理。

[参考文献]

- [1]叶金虎.现代无刷直流永磁电动机的原理和设计[M].北京:科学出版社,2007.
- [2]唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [3]王秀和.永磁电机[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [4]T.Krishnan.永磁无刷电机及其驱动技术[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [5]刘文彬,韩雪岩,朱龙飞.基于谐波注入算法的变频器驱动下PMSM损耗抑制方法[J].电机与控制应用,2023,50(01):1-8.
- [6]付家祥.多相电机控制策略研究综述[J].通信电源技术,2018,35(05):28-29.
- [7]何京德,刘陵顺,赵国荣.基于定子谐波电流的六相永磁同步电动机双电机串联系统的仿真[J].电机与控制应用,2011,38(06):11-14.
- [8]袁飞雄,汪伟,龙文枫.双三相永磁同步电机矢量控制研究[J].船电技术,2010,30(8):1-3,15.