

异步电动机定子绕组三维温度分布的测试与分析

杨明发, 张培铭

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:为提高电动机运行温度保护的性能,本文针对全封闭外置风扇冷却电动机定子结构特点,设计了异步电动机温度测试方案,测量了定子绕组三维温度分布。测量结果表明,由于结构的不对称以及由此导致的散热条件不对称,电动机定子绕组的温度分布也是不对称的,最高温度区域位于接线盒区域的绕组端部。在电动机温度分布测试结果的基础上,分析了定子绕组温度分布特点及其原因,提出了电动机保护和优化设计的新思路,为实现电动机运行温度保护奠定基础。

关键词:异步电动机; 温度分布; 测试; 分析; 保护

中图分类号: TM301

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2010)02-0072-05

引言

电动机运行的大部分故障都会在其定子绕组的温度上有所反映。电动机工作过程中产生的热量,一部分通过传导、对流、辐射等方式散发到周围环境中,另一部分使电动机各部分温度升高。正常工作时电动机各部分温升应保持在允许范围内,各种故障引起的过多的热量将加速绝缘老化、烧毁电动机甚至引起火灾,造成巨大的经济损失;为避免电动机烧毁而采取的保护措施如果不够恰当,其误动作将造成不必要的生产过程中断,同样会造成巨大的经济损失。为了可靠地保护电动机,必须准确地掌握各种正常及故障运行情况下电动机内部温度的分布,特别是电动机内部最高温度点的温度的变化规律。

利用实际测量或参数辨识的方法计算出绕组的电阻,根据电阻值与温度值之间的函数关系估计电动机绕组温度的方法^[1-6]可以估算绕组的平均温度,但无法得出某一具体位置的温度值,特别是最高温度值。传统的等效热路法^[7-10]能够较准确描述电动机的实际状态,物理意义明确,计算量相对较小,但是该方法不能很好地确定电动机各部件温度的实际分布情况。应用有限单元法求解电动机温度场^[11-13]可以计算出电动机各部位的温度值。

应用有限单元法求解电动机温度场必须准确确

定电动机各种材料的尺寸以及传热系数、热容等物理特性。然而,由于各种原因,槽绝缘等材料的参数无法通过理论分析的方法准确计算,因此传统的方法是采用经验公式计算。但是经验公式中的一些系数取值范围较大,系数的选择具有较大的主观性,导致求解结果误差较大,甚至是错误的。所以,有必要通过实际测量掌握电动机绕组温度分布规律,而且是其三维温度分布规律,这不仅可以为实现准确的电动机热保护提供重要的依据,而且可以为电动机有限元温度模型提供验证。

本文以一台型号为 Y100L2-4,额定功率为 3kW 的笼型转子感应电动机为对象,测量电动机定子绕组的温度分布,并对测量结果进行分析,提出电动机优化设计和热保护的建议。

1 电动机温升实验

被测电动机为全封闭外置风扇冷却电机,虽然其定子铁芯和绕组均为对称结构,但其机座及散热条件是非对称的。电动机的机座结构如图 1 所示。与其他区域不同的是,接线盒所在区域机座表面没有散热筋,该区域机座内表面开有上下两个出线槽。冷却风扇位于机座非传动侧(以下称为风扇侧),电机工作时,冷却气流从风扇侧吹向传动侧。

考虑到电动机散热条件的特点及测量点数的限制,在被试电动机不同位置埋置了 61 个测温点。

收稿日期: 2009-08-04

作者简介: 杨明发(1977-),男,福建籍,讲师,博士研究生,主要研究方向为电器及其系统智能化与在线检测技术;

张培铭(1943-),男,福建籍,教授/博导,主要研究方向为电器及其系统智能化与在线检测技术。

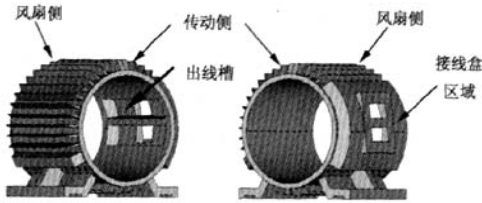


图1 电动机机座结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of motor frame structure

测温点的分布如图2所示。用于测量定子绕组温度的54个测温点分为A-I共9组,每组6个点沿轴向分布,其中1号点位于传动侧端部,2-5号点位于槽内并将整个槽5等分,6号点位于风扇侧端部。J、K、L共3组测温点位于机座表面,每组2个点,分别位于机座两端。M组测温点只有一个点,位于机座顶部吊环孔内的铁芯表面。此外还有一个测温点用于测量环境温度。除了测量温度,实验过程还实时采集了三相绕组的电流值。

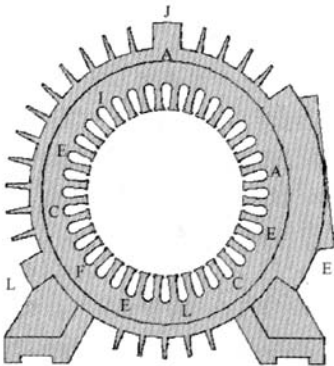


图2 测温点分布示意图

Fig.2 Distribution of temperature measurement point

测试系统的温度传感器采用台湾兴勤电子股份有限公司生产的型号为DHT0B104F4001NY,精度 $\pm 1\%$ 的负温度系数热敏电阻。

测试系统信号采集与处理电路原理框图如图3所示。

2 温度分布规律与分析

2.1 不同区域温度随时间变化规律

三相电流平衡时,绕组最高温度区域温度、铁芯温度、机座最高温度区域表面温度、环境温度以及定子电流随时间变化曲线如图4所示。整个测量过程包括空载起动、加载、随电流变化微调负载以及电流和温度稳定后关机冷却等阶段。从图中可以看出,

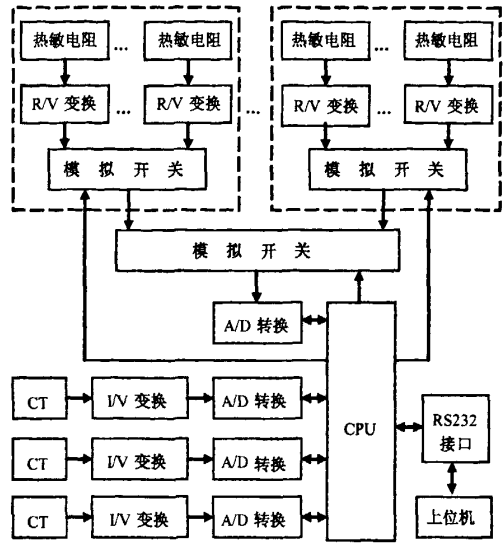


图3 测试系统信号采集与处理电路原理框图

Fig.3 Block diagram of signal acquisition and processing circuit of test system

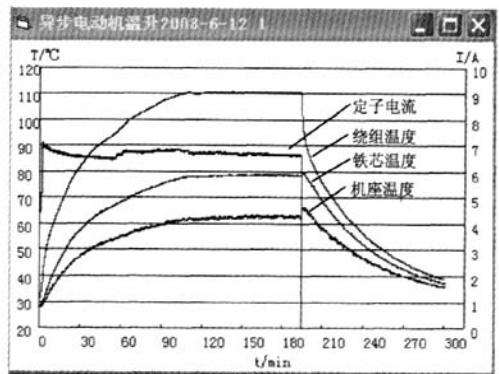


图4 电机各区域温度随时间变化曲线

Fig.4 Temperature-time curves of different positions

在定子电流一定的情况下,绕组温度、铁芯温度、机座温度均随时间按指数规律变化。

图4中开机以后绕组温度随时间以指数规律上升,130分钟以后定子电流和绕组温度已经达到稳定状态(实验过程由于负载电流的跳变,在60分钟和108分钟处分别有一个拐点),但此时铁芯温度和机座表面温度仍有一定程度的上升。194分钟时各测量点温度都已经稳定,切除异步电动机的电源,此时绕组温度直接按指数规律下降,而铁芯温度和机座表面温度不降反升。这是因为虽然电源切除,绕组不再发热,但绕组、铁芯和机座内部依然存储有大量的热量,由于电机停转,散热条件由强制对流冷

却转为冷却效果较差的自然对流冷却,由绕组经由铁芯向机座传递来的热量大于由机座表面散发的热量,导致铁芯温度和机座表面温度不降反升,其中机座表面温度升高的幅度更大,持续的时间也更长。铁芯和机座表面温度达到最高点以后也以指数规律下降。

2.2 长期运行绕组温度分布规律

以上试验电机停机前内部各点温度均已达到稳定状态,此时的绕组各区域温度分布见表 1,对应的温度分布示意图见图 5。

表 1 额定负载时的稳定温度分布

Tab. 1 Steady temperature distribution of winding at rated load

	1	2	3	4	5	6
A	107.7	105.0	104.4	104.1	102.9	106.6
B	110.4	100.7	99.8	98.8	99.5	106.6
C	106.0	96.4	/	96.0	/	104.1
D	107.7	97.4	94.4	95.2	93.1	/
E	103.8	95.9	94.4	/	92.7	99.2
F	103.2	93.7	92.9	92.3	92.3	98.4
G	102.5	93.6	93.3	91.6	90.9	99.8
H	103.2	95.3	94.3	92.0	93.3	99.8
I	103.9	95.8	93.6	/	91.9	99.1

注:由于工艺的原因,部分非高温区域测温元件在生产过程损坏。

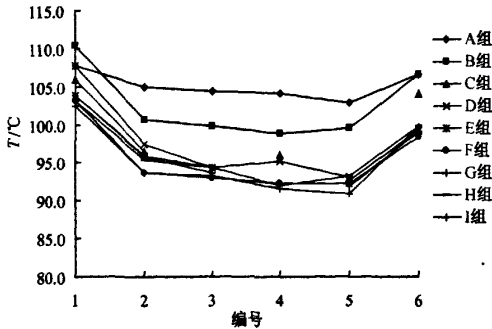


图 5 额定负载时的绕组稳定温度分布示意图

Fig. 5 Steady temperature distribution of winding at rated load

从测量结果可以看出,电动机绕组温度分布是不均匀的,最高温度区域的温度与最低温度区域的温度相差很大。绕组温度分布有以下特点:

A. 端部绕组温度高于槽内绕组温度

从测量数据看,每组的 1 号点区域和 6 号点区域的温度明显高于 2-5 号点区域的温度。

这是因为槽内导体产生的热量主要经由槽绝缘、铁芯和机座散发到空气中。虽然槽绝缘的导热

系数很小,但它的厚度也很薄,热量比较容易通过它传递给铁芯。铁芯和机座的导热系数都比较大,机座外部空气温度较低,机座表面的对流系数较大,这些因素都有利于槽内导体热量的散发。端部导体处于定子铁心与端盖之间,由于处于密闭空间内,电机内部空气的温度随着电动机温度的升高而升高,导致端部导体表面的对流系数下降。电动机温度稳定时,端部导体主要通过热传导向槽内导体传递热量,其温度必然高于槽内导体温度。

B. 传动侧端部绕组温度高于风扇侧端部绕组温度

每组数据中,1 号点区域的温度均高于 6 号点区域的温度。被试电动机与周围环境之间的热交换主要靠空气强制对流实现,冷却空气从风扇侧向传动侧流动过程中,吸收机座表面的热量使得温度逐渐升高。同时,由于摩擦和扩散等因素的影响,冷却空气相对机座表面的速度逐渐下降。两方面的因素都使得风扇侧散热效果好,传动侧散热效果差,从而使传动侧端部绕组温度高于风扇侧端部绕组温度。

C. 接线盒区域绕组温度高于其它区域绕组温度

对于槽内绕组,A 组温度高于 B 组温度,同时高于其他组温度。电动机的机座结构见图 1。从铁芯与机座之间的热交换情况看,出线盒区域机座内表面开有两个出线槽,其长度大于铁芯长度。该区域的铁芯没有与机座接触,只能通过对流与电动机内部空气进行热交换,散热效果不如其他区域。从机座外表面看,接线盒区域机座外表面没有散热筋,且其外径与罩壳内径相等,从罩壳出来的空气基本吹拂不到其表面,该区域机座表面与空气之间的热交换也不如其他区域好。两个因素共同作用使得接线盒区域绕组温度高于其它区域绕组温度。

对于端部绕组,接线盒所在区域的 A 组和 B 组的端部绕组温度也明显高于其他组。从测量结果还可以看出,端部温度沿周向的差异程度不如槽内温度大。主要是因为端部绕组之间散热条件的差异不如槽内导体大,而且所有的端部绕组是缠绕在一起的,绕组端部之间有直接的热交换。

除了测量额定负载时的稳定温度分布,本文还测量了 80% 额定负载时的温度分布,其温度分布规律与额定负载时相同。

2.3 模拟堵转状态下稳定温度分布规律

堵转时的温度分布规律对验证基于温度测试的电动机有限元温度模型与实现堵转故障时的热保护有一定的意义。为了使堵转实验时的稳定温升限制

在绝缘允许的范围内,堵转实验在降低电源电压的情况下进行。低压堵转时的稳定温度分布如表2所示。

表2 低压堵转时的稳定温度分布
Tab.2 Steady temperature distribution of winding
when motor was stalled

	1	2	3	4	5	6
A	107.1	106.0	106.0	106.5	107.0	109.3
B	108.7	102.8	102.8	103.9	103.8	108.8
C	106.8	102.0	/	103.4	/	107.7
D	107.3	103.1	102.0	103.1	102.6	/
E	105.9	102.2	102.0	/	102.9	105.9
F	105.6	101.2	101.3	101.9	102.0	104.8
G	105.4	101.2	101.6	102.0	101.8	102.8
H	106.3	102.8	103.2	102.6	103.5	106.8
I	106.6	103.4	102.9	/	103.6	106.8

和正常运行时一样,端部绕组的温度高于槽内绕组的温度,不同的是风扇侧的端部绕组与传动侧端部绕组温度并无明显的高低之分。出线盒区域槽内绕组的温度与其他区域槽内绕组温度之间也没有明显的高低之分。由此可以说明正常运行时轴向及周向温度分布不均匀主要是由于强制冷却的不均匀引起的。

3 测量结果的启发

1) 显然,从电动机运行温度保护的角度看,接线盒所在区域的传动侧端部绕组区域温度最具代表性,且位于易于埋置温度传感器和引出信号的区域。从电动机保护的角度看,可以在该区域埋置温度传感器实现真正意义上的电动机热全保护。

2) 由于散热条件不如槽内绕组,本文实验电机在正常工作时端部绕组的平均温度比槽内绕组高10%以上。采取适当的措施增强端部绕组的散热可以有效降低电动机的最高温升,从而提高电动机的输出功率。可以考虑在端部绕组与机座内表面之间的缝隙里填充导热性能较好的绝缘材料,使端部绕组产生的热量可以直接通过绝缘材料传递到机座并散发到周围环境中。

3) 接线盒所在区域的散热条件比其他区域差,导致该区域绕组温度远高于其他区域。改善该区域的散热条件同样可以有效降低电动机的最高温升,提高电动机输出功率。可以考虑把接线盒移到传动侧,这样可以去除引线槽并在机座表面增加散热翅。必要的话可以考虑垫高接线盒,使接线盒底部与机

座表面之间留有冷却气流通道。

4 结论

基于电动机运行温度保护的需要,本文对电动机样机三维温度分布规律进行测试,通过大量测试与分析表明:

1) 由于结构的非对称性,电动机运行时定子绕组各个部位的稳态温升并不相同,其温度分布特点为:端部绕组温度高于槽内绕组温度,传动侧端部绕组温度高于风扇侧端部绕组温度,接线盒区域绕组温度高于其它区域绕组温度,最高温度区域位于接线盒区域传动侧端部。

2) 对电动机上述最高温度区域的温度状况进行在线监测是实现电动机热全保护的有效措施。

3) 改善端部绕组和接线盒区域的铁芯的散热条件可以有效降低电动机的温升,提高电动机的输出功率与工作效率。

4) 在电机温度分布测试与分析的基础上,通过对电机运行温度分布,特别是最高温度区域的温度分布进行准确的仿真计算,可以实现电机温度的预测与保护奠定基础。

参考文献 (References):

- [1] Sang-bin Lee, Thomas G Habetler. A remote and sensorless thermal protection scheme for small line-connected AC machines [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2003, 39(5): 1323-1332.
- [2] Martin Maximini, Hans-Jürgen Koglin. Determination of the absolute rotor temperature of squirrel cage induction machines using measurable variables [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2004, 19(1): 34-39.
- [3] 汪镭,周国兴,吴启迪 (Wang Lei, Zhou Guoxing, Wu Qidi). 神经网络辨识方案在异步电机传动系统参数辨识中的应用讨论 (Application of hopfield neural network in asynchronous motor parameters'identification) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2001, 20(2): 58-63.
- [4] 李俊卿,李和明 (Li Junqing, Li Heming). 基于状态监测的汽轮发电机定子铁心温度标准值的确定 (Determination of standard temperature of stator iron-core in turbogenerator for condition monitoring) [J]. 中国电机工程学报 (Proc. CSEE), 2004, 24(3): 156-160.
- [5] Sang-bin Lee, Thomas G Habetler. An evaluation of model-based stator resistance estimation for induction motor stator winding temperature monitoring [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2002, 17(1): 7-15.

- [6] Beguenane R, Benbouzid M E H. Induction motor thermal monitoring by means of rotor resistance identification [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1999, 14(3): 566-570.
- [7] Christian Kral, Habetler T G, Harley R G. Rotor temperature estimation of squirrel-cage induction motors by means of a combined scheme of parameter estimation and a thermal equivalent model [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2004, 40(4): 1049-1056.
- [8] Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, Mario Lazzari, et al. A simplified thermal model for variable-speed self-cooled induction motor [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2003, 39(4): 945-952.
- [9] Wang Rongjie, Kamper M J. Development of a thermofluid model for axial field permanent-magnet machines [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2005, 20(1): 80-87.
- [10] 温家斌, 孟大伟, 鲁长滨 (Wen Jiabin, Meng Dawei, Lu Changbin). 大型水轮发电机通风发热综合计算 (Synthetic calculation for ventilation and heating of large water-wheel generator) [J]. 中国电机工程学报 (Proc. CSEE), 2000, 20(11): 115-119.
- [11] 温志伟, 傅德平, 顾国彪 (Wen Zhiwei, Fu Deping, Gu Guobiao). 浸润式混合强迫内冷的蒸发冷却汽轮发电机定子三维温度场的仿真分析 (Simulation of 3D temperature distribution of immersion evaporative cooling turbo-generator combined with forced inner cooling system) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(3): 13-17.
- [12] 栾茹, 傅德平, 唐龙尧 (Luan Ru, Fu Deping, Tang Longyao). 新型全浸式蒸发冷却水轮发电机定子三维温度场的研究 (Study on 3D temperature distribution in new evaporative cooling asynchronous generator) [J]. 中国电机工程学报 (Proc. CSEE), 2004, 24(8): 205-209.
- [13] 谢颖, 李伟力, 李守法 (Xie Ying, Li Weili, Li Shoufa). 异步电动机转子断条故障运行时定子温度场数值计算与分析 (Calculation and analysis of temperature field for induction motors with broken bars fault) [J]. 电工技术学报 (Trans. China Electrotechnical Society), 2008, 23(10): 33-39.

Test and analysis of 3D temperature distribution for induction motor stator winding

YANG Ming-fa, ZHANG Pei-ming

(College of Electrical Engineering & Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To improve the performance of motor temperature protection, this paper designed a temperature test system of totally enclosed fan cooled (TEFC) induction motor according to their structural characteristics. Three-dimensional temperature distribution of stator windings was measured. Measurement results show that because of the asymmetry of the structure and the heat dissipation conditions, temperature distribution of stator windings is asymmetric too. Temperature of end windings which located at the terminal box area is the highest. Based on the test results, the characteristics and reasons of stator windings temperature distribution were analyzed, based on which new ideas of motor protection and optimization design were put forward.

Key words: induction motor; temperature distribution; test; analysis; protection

(上接第47页, cont. from p.47)

Swarm Optimization with Dimension Mutation Operator) method is demonstrated and compared with QPSO approach, PSO approach and GA approach on the standard IEEE30-bus system. The investigations reveal that the proposed method is efficient in solving reactive power optimization problem. And by IEEE30 testing, reactive power optimization problem solved by QPSODMO can find better solution and have less loss than QPSO and the other PSO approach. Simulating algorithm shows feasibility and validity of the solution.

Key words: quantum-behaved particle swarm optimization; global optimal solution; reactive power optimization; non-stationary assignment penalty function