

IEC 60349-4 《与电子变流器连接的永磁同步电机》 标准介绍

李益丰, 许峻峰

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为配合 IEC 60349-4 《与电子变流器相连的永磁同步电机》标准的发布, 介绍了该标准的起草过程, 对标准主要内容进行了解读, 提出并分析了标准制定过程中的争议点, 为从事轨道交通永磁同步牵引电动机研究及试验的专业人士提供参考。

关键词: 标准; IEC 60349-4; 永磁同步电机; 牵引电机

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)03-0059-04

An Introduction of Standard IEC 60349-4 *Permanent Magnet Synchronous Electrical Machines Connected to an Electronic Converter*

LI Yi-feng, XU Jun-feng

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In order to play a supporting role for the releasing of standard IEC 60349-4 *Permanent Magnet Synchronous Electrical Machines Connected to an Electronic Converter*, the compiling process is described. On the basis of interpreting the main content, the contending focuses during compiling process are proposed and analyzed, which can provides a reference for the persons who are engaging in research and test of permanent magnet synchronous traction motor for rail transit.

Key words: standard; IEC 60349-4; permanent magnet synchronous motor; traction motor

0 引言

鉴于永磁同步牵引电动机的优点, 国际上各轨道交通公司和研究机构对永磁同步牵引电动机的理论进行了比较深入的研究, 开发了具有各自特色的永磁同步牵引电动机, 并将其应用于许多场合。为了规范和指导永磁同步牵引电动机的发展, IEC/TC9 MT30于2008年决定起草轨道交通用永磁电机标准, 并成立工作组, 于2009~2011年分别在瑞士、中国、法国召开5次会议, 形成CDV稿, 目前已进入FDIS稿阶段。标准的题目为: IEC 60349-4 Electric traction-Rotating electrical machines for rail and road vehicles-Part 4: Permanent magnet synchro-

nous electrical machines connected to an electronic converter(电力牵引 轨道机车车辆和公路车辆用旋转电机第4部分: 与电子变流器连接的永磁同步电机)

工作组成员分别来自Bombardier公司(瑞士、瑞典和奥地利公司)、德国Siemens公司、法国Alstom公司、日本东芝公司和铁道研究所、SNCF(法国国营铁路公司)、奥地利TSA公司(奥地利牵引系统公司)和中国株洲南车时代电气股份有限公司等7家公司, 共11名代表, 这些公司在轨道交通用永磁同步牵引电动机的研制和应用中均有建树。该标准制定的召集人为瑞士Bombardier公司的Walter Güntensperger先生。笔者作为工作组和专家组成员, 参与了本标准的修订工作, 并在会议上及CD comments(对委员会草案所提意见)、CDV comments(对征求意见草案所提意见)中提出了许

收稿日期: 2012-02-22

作者简介: 李益丰(1965-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 现从事异步和永磁牵引电机的研究工作。

多建议,大多数被采纳。

尽管距该标准第一版正式发布还有一段时间,为了配合本专辑,本文对该标准的主要内容进行解读,并就会议争议点进行介绍。

1 标准介绍

1.1 标准框架

该标准是在IEC 60349-2:2010 Electric traction-Rotating electrical machines for rail and road vehicles-Part 2: Electronic converter-fed alternating current motors基础上根据永磁电动机特点编写的,正文包括以下几部分:(1)范围;(2)规范性引用文件;(3)术语和定义;(4)使用条件;(5)特性;(6)标志;(7)试验类别;(8)型式试验;(9)例行试验;(10)研究性试验。

1.2 电机类型

本标准涉及4种电机:

- (1)牵引电动机;
- (2)主发电机;
- (3)IEC 60034《旋转电机 定额和性能》所未涉及的辅助电动机;
- (4)IEC 60034所未涉及的辅助发电机。

所涉及的电机类型与IEC 60349-1:2010 Electric traction-Rotating electrical machines for rail and road vehicles-Part 1: Machines other than electronic converter-fed alternating current motors相似。

1.3 定义

与IEC 60349-2相比,定义部分的内容变化有:

- (1)定额和最高工作转速中增加了发电机的相关要求;
- (2)增加了用户、制造商、系统制造商的定义;
- (3)增加了反电势、齿槽转矩等的定义。

1.4 使用条件

与IEC 60349-1和IEC 60349-2相同。

1.5 特性

1.5.1 信息交流

标准除规定电机设计者与变流器设计者之间的信息交流的基本内容外,特别强调:电机设计者应向变流器设计者提供在电机整个应用范围内,永磁体在20时的感应电动势与电机转速的函数关系以及感应电动势的温度系数值。

1.5.2 基准温度

定子绕组基准温度为150,永磁体为100。

1.6 标志

标志与IEC 60349-1和IEC 60349-2相同,但根据永磁

电动机特点以及欧洲电机生产模式(由欧洲公司设计,但在海外生产)的特点,欧洲公司的代表要求在铭牌上增加2项内容:

- (1)标明为永磁电动机(SNCF特别要求);
- (2)标明总装地点。

1.7 试验类别

1.7.1 试验分类

与IEC 60349-1和IEC 60349-2不同的是,该标准在试验分类中增加了一个试验类别,即减少试验项目的型式试验(Reduced type test),因此,其试验分为4类:

- (1)型式试验(type test);
- (2)减少试验项目的型式试验(reduced type test);
- (3)例行试验(routine test);
- (4)研究性试验(investigation test)。

关于减少试验项目的型式试验在1.7.2中将进一步说明。

1.7.2 试验项目

型式试验、例行试验和研究性试验的试验项目分别见1.8、1.9和1.10。

减少试验项目的型式试验项目与型式试验项目相同,但不需进行变流器供电条件下的温升试验和特性试验(即可减少的试验项目)。

1.8 型式试验

1.8.1 试验项目

型式试验项目除包括例行试验所有试验项目外,还包括:(1)变流器供电下的温升试验;(2)附加温升试验;(3)特性试验;(4)超速试验;(5)振动试验;(6)噪声测量;型式试验具体试验方法与IEC 60349-1和IEC 60349-2的相似。

1.9 例行试验

1.9.1 试验项目

例行试验项目包括:(1)空载试验;(2)电流负载试验;(3)耐电压试验;(4)振动试验。

1.9.2 试验项目的说明

1.9.2.1 空载试验

空载试验的目的是为了测量空载时的空载反电势。本标准采用了Siemens公司的提议,提出了4种方法,即:

方法1——拖动电机至规定转速,测量该转速下的电压,该电压的基波分量的均方根值即为电机在该转速下的空载反电势;

方法2——拖动电机至某一转速,向电机提供正弦电压,测量使电机基波电流最小的电压,该电压的基波

分量的均方根值即为电机在该转速下的空载反电势；

方法3——拖动电机至某一转速，电机由逆变器供电，测量使电机基波电流最小的电压，该电压的基波分量的均方根值即为电机在该转速下的空载反电势；

方法4——电机运行至某一转速，然后突然断电，测量断电瞬间的电压，即为电机在该转速下的空载反电势。

空载反电势的容差为不得偏离典型值的 $\pm 10\%$ 。

以上4种方法原理均正确，Siemens公司在先前的相关文献中也介绍过，但只有方法1最具有可操作性，也是电励磁同步电机采用的方法。

1.9.2.2 负载试验

负载试验即测量稳态短路电流。Siemens公司提出了3种方法，即：

方法1——将电机端子短接，然后拖动电机至某一转速，测量定子电流；

方法2——电机空载运行，并施加正弦电压，调节供电电压，直到电机的基波电流的均方根值超过额定电流的20%为止；

方法3——电机空载运行，并施加非正弦电压，调节供电电压，直到电机的基波电流的均方根值超过额定电流的20%为止。

负载电流的容差为不得偏离典型值的 $\pm 10\%$ 。

以上3种方法原理均正确，但只有方法1最具有可操作性，同样也是电励磁同步电机采用的方法。

1.9.2.3 对地耐电压试验

本标准在IEC 60349-2中提出的几个电压值基础上增加了电机开路且电机运行于最高转速时定子绕组的对地峰值电压 $U_{i\max}$ 。

以交流电试验为例，试验电压最大值为以下4个电压值的最大值： $2 \times U_{dc} + 1000$ ； $2 \times U_{rp} / \sqrt{2} + 1000$ ；

$U_{rpb} / \sqrt{2} + 1000$ ； $U_{imax} / \sqrt{2} + 1000$ 。其中： U_{dc} ——可能施加在直流环节的最高对地平均电压，此时供电网网压为最高电压，电机处于牵引状态； U_{rp} ——可能施加在电机绕组上的最高对地重复峰值电压，此时供电网网压为最高电压，电机处于牵引状态； U_{rpb} ——可能出现在绕组上的最高对地重复峰值电压，此时电机处于制动状态； U_{imax} ——当电机开路且电机运行于最高转速时定子绕组的对地峰值电压。

引入概念 U_{imax} 是考虑到当电机运行在最高转速时，一旦控制失效，会在定子绕组中产生电压 U_{imax} ，该电压值有可能很高。

1.10 研究性试验

研究性试验包括：

(1) 齿槽转矩测量

测量开路状态下的齿槽转矩。该项是SNCF特别提出的。

(2) 电机在高转速下开路状态时的温升试验

当电机运行在高速下，一旦控制失效，电机磁路可能高度饱和，仅铁耗就很可能将电机烧损，因而提出该试验项目。

(3) 感应电动势的温度系数测量

由于永磁体性能对温度比较敏感，该试验是通过测量电机热态和冷态工况下的反电势，计算出温度系数。

2 争议点

由于永磁电机技术还在发展，在会议上就CD comments和CDV comments中的几项内容进行了激烈的争论。

2.1 牵引电动机损耗容差

IEC 60349-1和IEC 60349-2对损耗容差的要求是：在保证定额时测得的电动机损耗不应超过由规定特性曲线推导出的损耗的15%。但本标准起草时，东芝公司提出的要求为：在保证定额时测得的电动机损耗不应超过（损耗的规定值+1%的额定功率）。

两种容差只在某一特定功率和效率下是相同的，在小功率、低效率时，前者的要求比后者更高；在大功率、高效率时，前者的要求比后者低。

虽然我们提议采用IEC 60349-1和IEC 60349-2的要求，但最终版依旧采用东芝公司的提案。

2.2 Reduced type test

为了避免重复的型式试验，IEC 60349-2引入了repeat type test概念。所谓“repeat type test”实际上应为避免“repeat type test”的条件或者更通俗地讲是“免于型式试验或者减少型式试验项目的条件”。

电机制造厂通常没有配套的逆变器，若要进行型式试验，代价很大。当对电机作局部调整（主要是接口尺寸改变时）或者生产场地、生产工艺改变时，如满足一定的条件，可以免于型式试验。

由于电机制造厂采用正弦供电进行温升试验比较容易实现，因此在型式试验项目引入“正弦供电条件下温升试验”，其试验条件（电压、电流、功率、时间、冷却等）由电机制造商和用户确定。该试验条件固定作为今后生产电机的试验条件，其温升值作为今后生产电机相关试验的基准值。

对于具有相同的电磁设计的电机，当以下条件发

生变化时：

- (1)更改接口尺寸；
- (2)更换生产场地；
- (3)更改工艺；
- (4)停产较长时间后恢复生产。

只要满足以下所有条件时，可免除部分必须由与电机配套逆变器供电的且在制造厂难以进行的型式试验项目（主要是特性试验和逆变器供电下的温升试验）：

- (1)当用户和制造商达成协议；
- (2)正弦供电型式试验时的温升不偏离最初型式试验测量值的 $\pm 8\%$ 或 $\pm 10\text{K}$ ；
- (3)电机空载电流不偏离典型值的 $\pm 10\%$ ；
- (4)电机堵转电流不偏离典型值的 $\pm 5\%$ ；
- (5)制造商能提供一份具有相同电磁设计的电动机在以相同或更高的定额下进行试验的试验报告。

在本标准中，也引入了类似的试验方法，但名字改为reduced type test,并作为一个试验分类。尽管reduced type test从字面上也不能完全反映该试验的目的，但比起repeat type test更好理解些。

将正弦供电下的温升试验作为“可选”型式试验的另一个目的是：可以从大批量生产的电机中抽样进行正弦供电的温升试验，以验证生产工艺是否存在偏差。

根据永磁电机的特点，温升试验（即1.8.1中指出的附加温升试验）可以选择以下方法中任何一种：

- (1)与电机配套的变流器供电下的温升型式试验；
- (2)与非电机配套的变流器供电下的温升试验；
- (3)正弦供电下的温升试验；
- (4)无源负载（电阻、电感或电阻+电感）发电模式下的温升试验。

在以上4种方法中，第4种方法最直接、最简单；第3种方法虽节能，但需要并网，对试验条件有一定的要求。

我们提议不将reduced type test作为一个试验分类，而是与IEC 60349-2一样，只作为一个“补充”的型式试验项目，但没有被接受和采纳。

另外，若将reduced type test作为一个试验分类，就不能很好地解释例行试验中的相同工况的温升试验，也就是说标准中9.1 General 的描述不清晰：“To confirm consistency within a series, the temperature rise from the type test on sinusoidal supply (see 7.3.3), or type test on a general converter supply (see 7.3.1 or 7.3.2), or type test on generating mode with passive load (see 7.3.4), may be under-

taken at intervals throughout the series, either randomly or at set intervals with agreement between user and manufacturer. The tolerances are as defined in 8.2.2.1 (traction motor) or 8.2.2.2 (main generator).”

2.3 热态下的突然短路试验

一旦逆变器换流的失败，永磁同步牵引电动机不可避免地存在突然短路的情况。在电机热态且突然短路时，永磁体失磁的风险最大。因此我们和瑞典Bombardier公司提出热态突然短路试验，并作为型式试验项目。但其他公司对该提案持反对意见，召集人平衡权益后，提出在第二版时再讨论。

2.4 短时过载试验

在IEC 60349-1和IEC 60349-2中提出了短时过载温升试验项目，并提出了试验方法和试验判据。但大多数与会代表认为该试验从来就没做过，要求取消。我们要求保留该试验项目并提出了理由。

通过激烈争论，IEC 60349-4保留该试验项目，但只有以下表述：

“If short-time overload ratings are specified, they shall be verified by one or more tests carried out as follows.

The following items shall be specified and agreed between user and manufacturer :

- Cooling conditions
- Start temperature and load
- Either a time or a temperature limit”

3 结语

世界各大公司在轨道交通用永磁电机的研究工作中取得了很大成绩，同时也对相关成果做了很好的保密工作。本标准在起草工作中，由于永磁电机的复杂性，且本标准为第一次起草，故尚存在某些瑕疵。但无论如何，本标准的即将发布，会对永磁电机的规范发展起到积极的推动作用。随着各国对永磁电机的进一步研究和理解，标准将日趋完善，正如IEC60349-2:2002比IEC 60349-2:1993更完善一样。

参考文献：

- [1] IEC 60349-1:2010 Electric traction-Rotating electrical machines for rail and road vehicles-Part 1: Machines other than electronic converter-fed alternating current motors[S].
- [2] IEC 60349-2:2010 Electric traction-Rotating electrical machines for rail and road vehicles-Part 2: Electronic converter-fed alternating current motors[S].
- [3] IEC 60034 Rotating electrical machines-Rating and Performance [S].