

JJG 1005-2005 电子式绝缘电阻表

JJG 1005-2005 旋转电机绝缘电阻测试规定了额定功率 750W 及以上旋转电机和磁场绕组绝缘电阻的测量方法，本标准适用于同步电机，感应电机，直流电机和同步调相机（不适用于分马力电机）。

JJG 1005-2005 旋转电机绝缘电阻测试还阐述了旋转电机绕组绝缘电阻的典型特性，以及这些特性与绕组状况的关系，并推荐了交流电和直流电机绕组绝缘电阻的最小值。

旋转电机绝缘电阻测试目的在于：

- a) 定义旋转电机绕组绝缘电阻和极化指数的测量；
- b) 阐述影响和改变绝缘电阻特性的因素；
- c) 规定统一的测量条件；
- d) 规定测量绝缘电阻的统一方法，避免产生错误的结果；

标准编号：GB/T 20160-2006

规程名称：旋转电机绝缘电阻测试

发布时间 2006-03-14

实施时间：2006-09-01

发布部门：国家质量监督检验检疫总局

中国国家标准化管理委员会

制造厂商：武汉鼎升电力自动化有限责任公司

产品名称：DC2010 [智能双显绝缘电阻测试仪](http://www.kv-kva.com/914/) <http://www.kv-kva.com/914/>

DC2000 [智能双显绝缘电阻测试仪](http://www.kv-kva.com/915/) <http://www.kv-kva.com/915/>



中华人民共和国国家标准

GB/T 20160—2006

旋转电机绝缘电阻测试

Recommended practice for testing insulation resistance of
rotating machinery

2006-03-14 发布

2006-09-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

2015-7

目 次

前言 I

1 概述 1

1.1 范围 1

1.2 目的 1

2 规范性引用文件 1

3 定义 2

4 安全事项 3

5 绝缘电阻——一般理论 3

5.1 被测直流电流的组成 3

5.2 被测直流电流的特性 4

5.3 绝缘电阻读数 5

5.4 极化指数读数 5

5.5 放电电流 6

6 影响绝缘电阻的因数 6

6.1 表面状况的影响 6

6.2 潮湿的影响 7

6.3 温度的影响 7

6.4 试验电压幅值的影响 8

6.5 剩余电荷对绕组电阻测量的影响 8

7 测量绝缘电阻的条件 8

8 绝缘电阻试验时的绕组连接 9

9 测量绝缘电阻的方法 9

9.1 直接测量 9

9.2 计算测量 9

10 预防 9

11 绝缘电阻和极化指数试验结果的解释 10

11.1 监测绝缘状况 10

11.2 运行或继续试验的可行性 10

11.3 绝缘电阻试验的局限性 10

12 极化指数和绝缘电阻的最小推荐值 11

12.1 最小值 11

12.2 极化指数 11

12.3 绝缘电阻 12

附录 A(资料性附录) 派生的极化指数 13

附录 B(资料性附录) 直流与交流电压试验 14

附录 C(资料性附录) 用于直流电阻测量电源的校正 15

前 言

本标准等同采用 IEEE Std 43-2000。

本标准是测量旋转电机绝缘电阻及评价旋转电机绝缘电阻和极化指数的依据。

本标准的附录 A、附录 B 和附录 C 均为资料性附录。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国旋转电机标准化技术委员会发电机分技术委员会归口。

本标准由哈尔滨大电机研究所负责起草。

本标准主要起草人：隋银德、白亚民、阮羚、孙树敏、皮如贵、董蜀元、姚国萍、张生德。

本标准由全国旋转电机标准化技术委员会发电机分技术委员会负责解释。

旋转电机绝缘电阻测试

1 概述

1.1 范围

本标准规定了额定功率 750 W(1hp)及以上旋转电机电枢和磁场绕组绝缘电阻的测量方法。本标准适用于同步电机、感应电机、直流电机和同步调相机(不适用于分马力电机)。

本标准还阐述了旋转电机绕组绝缘电阻的典型特性,以及这些特性与绕组状况的关系。并推荐了交流电机和直流电机绕组绝缘电阻的最小值。

与绝缘电阻测量有关的其他 IEEE 标准列于第 2 章中。

1.2 目的

本标准的目的在于:

- a) 定义旋转电机绕组绝缘电阻和极化指数的测量;
- b) 阐述影响或改变绝缘电阻特性的因素;
- c) 规定统一的测量条件;
- d) 规定测量绝缘电阻的统一方法,避免产生错误的结果;
- e) 为绝缘电阻测量结果用于评估绕组运行或进行耐电压试验的可行性提供基础;本标准特别阐述了通过绝缘电阻测量而探测到的典型绝缘问题;
- f) 为各种旋转电机推荐绝缘电阻和极化指数的最小限值。

2 规范性引用文件

下列标准中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用本标准。然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

ASTM D257—1999 绝缘材料直流电阻或电导的标准试验方法¹⁾

ASTM D1711—1999 电气绝缘术语

ASTM F855—1997e1 电力线路和设备临时保护接地的标准规范

IEC 60085-1:1984 电气绝缘的耐热性评价和分级²⁾

IEEE Std 56—1977(Reaff 1991), IEEE 大型交流旋转电机绝缘维护导则(10 000 kVA 及以上者)^{3),4)}

IEEE Std 62—1995, IEEE 电力设备现场诊断试验——第一部分:油式变压器、调压器和电抗器

IEEE Std 67—1990(Reaff 1995), IEEE 透平发电机运行和维护导则

IEEE Std 95—1997 (Reaff 1991), IEEE 大型交流旋转电机绝缘高压直流试验的推荐方法⁵⁾

1) ASTM 出版物可从 American Society for Testing and Material 获得。100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, USA(<http://www.astm.org/>).

2) IEC 出版物可从 The Sales Department of the International Electrotechnical Commission 获得。Case Postale 131, 3, rue de Varembe, CH-1211, Geneve 20, Switzerland/Suisse(<http://www.iec.ch/>). IEC 出版物也可从美国的 The Sales Department, American National Standards Institute 获得。11 West 42nd Street, 13th Floor, New York, NY 10036, USA.

3) 当前版本。

4) IEEE 出版物可从 The Institute of Electrical and Electronics Engineers 获得。445 Hoes Lane, P. O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, USA(<http://www.standards.ieee.org/>).

5) 当前版本。

IEEE Std 118—1978 (Reaff 1992), IEEE 电阻测量的标准试验代码

IEEE Std 432—1992 (Reaff 1998), IEEE 旋转电机绝缘维护导则(5 hp~10 000 hp(不包括 10 000 hp))

IEEE Std 433—1974 (Reaff 1991), IEEE 绝缘试验的推荐方法

IEEE Std 434—1973(Reaff 1991), IEEE 大型高压电机绝缘系统功能性评定导则

IEEE Std 492—1999 IEEE 水轮发电机运行和维护导则

IEEE Std 510—1983 (Reaff 1992), IEEE 高压大功率试验安全性推荐方法

3 定义

本标准引入下列术语和定义。本章未定义的术语应参考 IEEE 电气和电子技术词典。

3.1

吸收(极化)电流 absorption(polarization) current

I_A

由于分子极化和电子漂移而形成的电流。它随施加电压的时间从相对较高的原始值衰减至接近于零,并取决于绝缘系统所用粘接材料的类型和状况。

3.2

电导电流 conduction current

I_G

从接地表面经绝缘流至高压导体,不随时间变化的体积电流。它取决于绝缘系统所用粘接材料的类型。

3.3

电内渗效应 electroendosmosis effect

偶然可以观察到的一种现象,且多产生于较旧的绕组。即当有水分存在时,施加相反极性的电压可获得不同的绝缘电阻值。对于典型的湿绕组,反极性比正常极性的绝缘电阻高很多。所谓的反极性即地线接绕组并且负极引线接地。

3.4

绝缘电阻 insulation resistance

R_i

绕组抵抗直流电流的电气绝缘能力。从施加电压起的某一特定时刻(t),所施加负极性直流高压除以通过电机绝缘的直流电流的商,并校正到 40℃。电压施加时间通常是 1 min(R_1)或 10 min(R_{10}),但也可使用其他值。时间 t 的单位规定:1 至 10 的单位为分钟,15 及以上的单位为秒。

3.5

几何电容电流 geometric capacitive current

I_C

一个幅值比较高且持续时间较短的可逆电流,它随施加电压时间按指数规律衰减。它取决于测量设备的内阻和绕组的几何电容。

3.6

极化指数 polarization index

$P. I. t_2/t_1$

极化指数是绝缘电阻随时间的变化值,是 t_2 时刻绝缘电阻除以 t_1 时刻绝缘电阻的商。若没有特别规定, t_2 和 t_1 分别为 10 min 和 1 min。时间 t 的单位规定:1 至 10 的单位为分钟,15 及以上的单位为秒(例如, $P. I. 60/15$ 指的是 R_{60s}/R_{15s})。

3.7

表面泄漏电流 surface leakage current

 I_1

不随时间变化的电流。它通常存在于定子绕组端部的表面或存在于已绝缘的转子绕组的裸露导体与转子本体之间。表面泄漏电流的幅值取决于温度和导电物质的数量。导电物质是指绝缘表面上的潮气或污染物。

4 安全事项

绝缘电阻测量涉及到向电机绕组施加直流高电压。这些绕组具有能够导致危险的容性和感性,而这些危险性又容易被忽视。本标准不可能涵盖所有的安全事项,试验人员应参考 IEEE Std 510—1983⁶⁾、ASTM F855-1997e1、制造商的使用说明书以及协会、公司和政府的规定。

在进行任何测量之前,必须对绕组绝缘进行放电。在未放电之前进行试验以及拆除地线之前未确定电压是否降下来(低于 20 V)都是危险的。试验完成后应通过合适的电阻器对绕组进行放电,将瞬时电流限制到 1 A。最短放电时间应为施加电压时间的 4 倍。这个时间间隔与充电(施加电压时间)和放电(从断开电源到试验绕组接地的共用时间)期间电路的 R (电阻)、 L (电感)、 C (几何电容)和吸收特性有关。必须牢记,只有绕组放电并且确认电压已经降下来试验才算完成,这是非常重要的。随后的交流耐电压试验也必须在绕组彻底放电后方可进行。

试验期间,必须采取相应的安全措施。对于试验电压为 5 000 V 及以上者,试验设备和绕组间的连线必须采取适当的绝缘措施,并与地之间保持一定空间距离;否则表面泄漏电流和电晕损耗数据将产生错误。出于安全考虑,同时为防止测到杂散电流应对连接线进行屏蔽。

高电压对人行通道的限制是强制性的。建议使用个人防护设施,例如,使用绝缘杆、绝缘梯子等。如果可能,试验期间将中性点与每一相的出线端连接在一起,以使会导致绕组失效的高压冲击反射的影响最小。

本标准所述的安全措施不是唯一的。上述仅仅说明了所包含的危险性。为保护人身安全、避免设备损坏,彻底检查试验中可能出现的危险是试验设备使用者的职责。

5 绝缘电阻——一般理论

旋转电机绕组绝缘电阻是所用绝缘材料的种类、状况及其应用工艺的函数。通常,绝缘电阻随绝缘厚度成正比变化,而随导体表面积反比变化。

电机绕组绝缘电阻测量的解释以及极化指数和绝缘电阻的最小推荐值分别见第 11 章和第 12 章。

5.1 被测直流电流的组成

绝缘电阻是施加于绝缘的直流电压除以某一时刻全部合成电流的商。总的合成电流(I_T)是 4 个不同电流的和:表面泄漏电流(I_1)、几何电容电流(I_C)、电导电流(I_G)和吸收电流(I_A)。

绝缘电阻测试中各种电流的等效电路如图 1 所示。

几何电容电流(I_C)通常不影响测量,因为在 1 min 内读取第一个读数时它就已经不存在了。

6) 参考文献可见第 2 章。

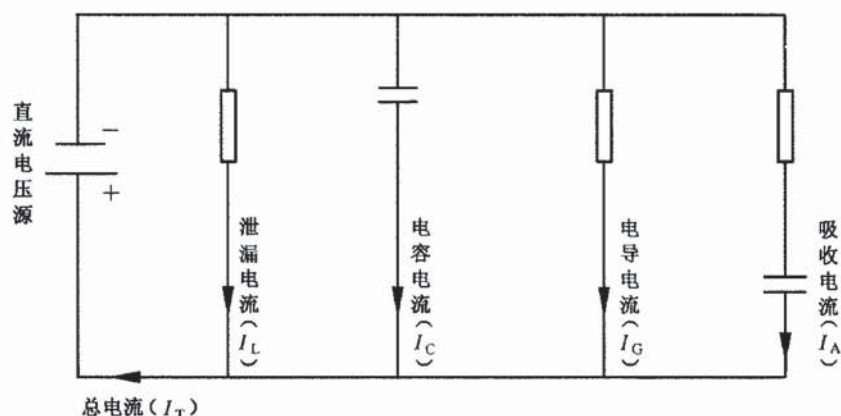


图1 绝缘电阻试验期间4种被测电流的等效电路

吸收(极化)电流(I_A)减速衰减。电流与时间的关系是一个幂函数,见式(1)。它可以直线的形式画在双对数坐标纸上。

$$I_A = Kt^{-n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

I_A ——吸收电流;

K ——特定绝缘系统和所施加试验电压的函数;

t ——施加直流电压的时间;

n ——特定绝缘系统的函数。

吸收电流有2个分量。第1个分量是由于浸渍材料极化所产生的。例如,环氧、聚酯和沥青的有机分子在直流电场的作用下会改变取向。由于这些分子必须反抗其他分子的吸引力,施加电场后分子重新取向通常需要几分钟的时间。因此,所施加电流的极化能量几乎降低至零。吸收电流的第2个分量是通过大部分有机材料的电子和离子的逐步漂移所产生的。这些电子和离子一直漂移至被隔在云母表面。云母在旋转电机的绝缘系统中是常见的。通常对于清洁干燥的旋转电机绝缘,其30 s和几分钟之间的绝缘电阻主要由吸收电流决定。

由于吸收电流与绝缘材料和绕组温度有关,所以对于特定的吸收电流不能评价绝缘的好坏。约从1970年开始,所生产的绝缘系统(通常是由热固性的环氧或聚酯粘合的),吸收电流 $I_A = Kt^{-n}$ 的指数 n 值与较老的热塑性材料(沥青或虫胶粘合的)的值是不同的。近代的绝缘材料的吸收电流较小而导致绝缘电阻较高,但这并不意味着比现代的绝缘材料好。例如,聚乙烯基本没有泄漏电流,但由于其耐热性能的限制大部分旋转电机几乎都不能采用。

在粘结较好的聚酯和环氧云母绝缘系统中,电导电流(I_G)几乎为零,除非绝缘受潮。

较老的绝缘系统由于补强带子电导率的原因具有固有较高的电导电流。例如,沥青云母或虫胶云母箔。

表面泄漏电流(I_L)对于时间是恒定的。高的表面泄漏电流,即低的绝缘电阻通常是由于电机内部潮湿或其他类型的导电污染所引起的。

5.2 被测直流电流的特性

在评价一个绕组的清洁和干燥状况时,将绝缘电阻或总电流的变化与所加电压持续时间相比较是有意义的。如绕组被污染或受潮,总电流(I_T)相对于时间近似恒定。因为 I_L 和/或 I_G (见图2)要比吸收电流(I_A)大得多。如绕组清洁干燥,总电流(I_T)通常随时间而降低,因为在这种情况下总电流受吸收(即极化)电流(I_A)的支配。

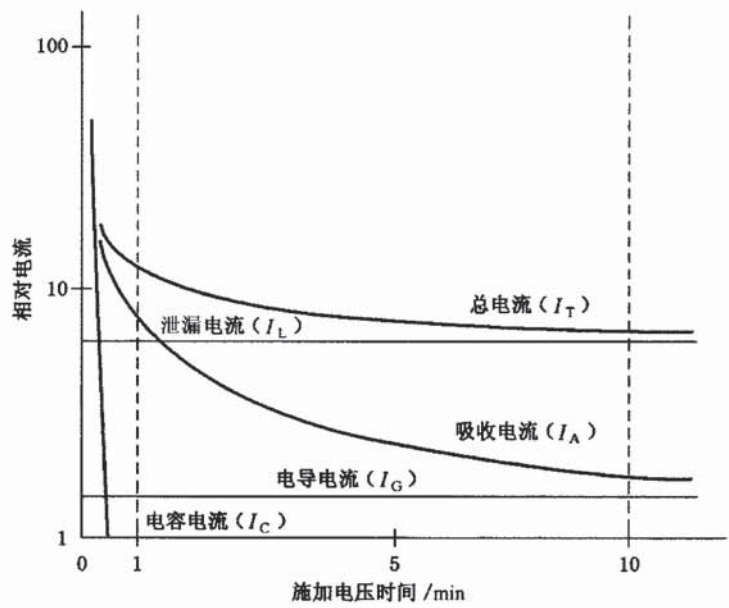


图 2 某种沥青云母绝缘的电流类型

5.3 绝缘电阻读数

绝缘电阻的测量是一个直流电压试验,且必须将试验电压限制至接近于绕组额定电压和绝缘的基本状况。这对于小型低压或绕组受潮的电机是非常重要的。若试验电压太高,施加的电压可能会超过绝缘的承受能力,导致绝缘失效。

绝缘电阻试验通常是在 500 V~10 000 V 负极性的恒定直流电压下进行。为了避免电内渗现象,首选的极性是负极性。试验电压的指导准则列于表 1。绝缘电阻的读数在直流试验电压施加以后 1min 读取。

表 1 绝缘电阻试验期间施加直流电压的指导准则

绕组额定电压/V ^a	绝缘电阻试验的直流电压/V
<1 000	500
1 000~2 500	500~1 000
2 501~5 000	1 000~2 500
5 001~12 000	2 500~5 000
>12 000	5 000~10 000

^a 对于三相交流电机为额定线电压;对于单相电机为线对地电压;对于直流电机或磁场绕组为额定直流电压。

5.4 极化指数读数

当最初施加电压时被测绝缘的电阻通常会迅速增加,尔后随时间的延续逐渐逼近于一个相对恒定的电阻值(见图 4)。处于良好状态的干燥绕组的绝缘电阻读数可能会随施加的恒定试验电压连续增加数小时。对于较老类型的绝缘,合理的稳定值通常在 10 min~15 min 内达到。现代类型的薄膜绕包线以及环氧云母或聚酯云母绝缘的定子绕组的绝缘电阻,可在 4 min 或更少的时间内达到恒定值。如绕组受潮或污染,通常在施加试验电压后的 1 min 或 2 min 内电阻达到一个较低的稳定值。

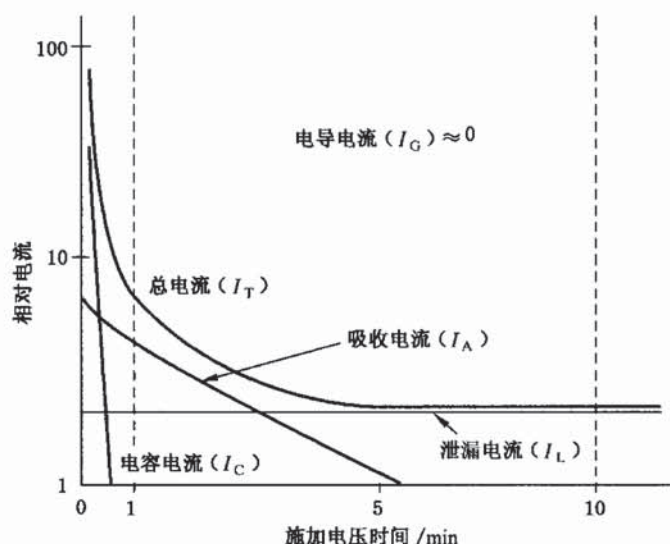


图3 某种(具有相对较低表面泄漏电流且无电导电流的)
环氧云母绝缘电流的类型

极化指数通常定义为 10 min 的电阻值(R_{10})与 1 min 电阻值(R_1)的比值。(其他比值的使用见附录 A)。极化指数表示曲线(见图 4)的倾斜度,同时可用来评价绝缘的状况(见第 11 和第 12 章)。为了提高 1 min 点的精度允许将数据画在对数纸上。通常也在其他时刻读取读数,如:15 s、30 s、45 s、1 min、1.5 min、2 min、3 min、4 min、...和 10 min。

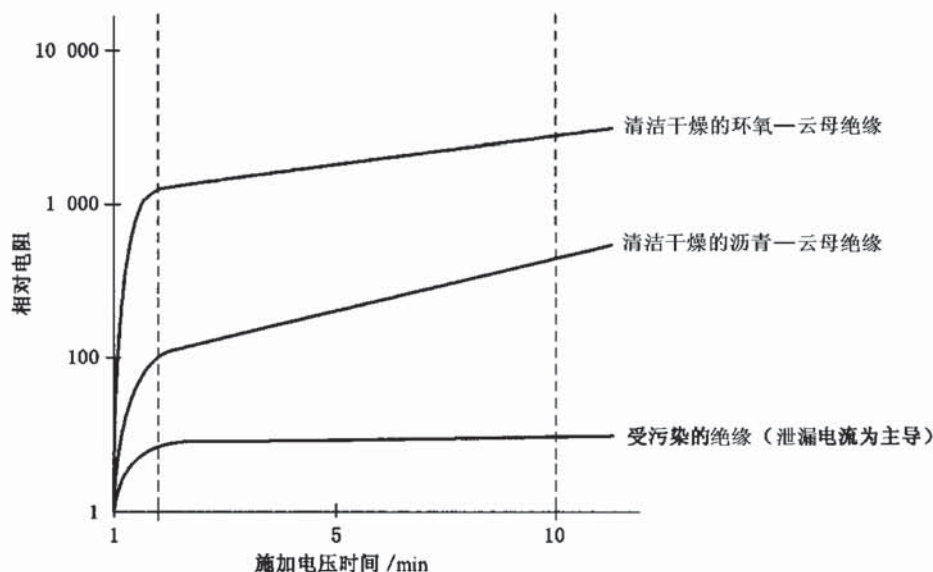


图4 三种不同类型电机典型绝缘电阻的测量

5.5 放电电流

所施加的直流电压卸压后,应提供一个合适的放电回路(见第 4 章)。放电回路包括两部分:

- 容性放电电流部分,它几乎是瞬时衰减,取决于放电电阻。
- 吸收放电电流部分,它从较高的原始值衰减至接近零,与原始充电电流具有相同的特性,但极性相反。这个衰减可能会持续 30 min 以上,取决于被试电机绝缘的类型和被试电机的大小。

6 影响绝缘电阻的因数

6.1 表面状况的影响

表面泄漏电流取决于外来杂质,如槽外绕组表面上的油和/或炭粉。由于大型透平发电机的转子和直流电机具有较大的漏电表面,其表面泄漏电流可能会相当大。对于绕组端部采用防晕层的电机,表面泄漏电流也会增大。

绝缘表面上的粉尘(或盐)在干燥的情况是不导电的。只有暴露于潮气或油中才会部分导电,所以绝缘电阻会降低。如绝缘电阻或极化指数因污染而降低,可通过清理和干燥而达到允许值。

6.2 潮湿的影响

在不考虑绕组表面清洁程度的情况下,当绕组温度在环境空气的露点或露点以下时,绝缘表面就会形成潮气膜,从而降低绝缘电阻或极化指数。如表面被污染或绝缘有裂缝存在,则这种影响会更明显。应注意,无缺陷的绕组在受潮的情况下也可能获得可接受的读数。

某些老式的绕组绝缘系统是吸潮性的(容易吸水),潮气可能从潮湿的环境空气中进入绝缘体内。尤其是沥青云母和虫胶云母绝缘材料以及大型透平发电机转子未绝缘导体之间使用的一些绝缘板。吸潮加大了电导电流(I_G),导致绝缘电阻明显地降低。

电机通常在露点以上的温度运行。若对于已运行过的电机进行试验,应该在电机绕组温度降至露点以下之前进行试验。

对于不运行(没有空间加热器)的电机绕组在露点以下的温度试验,由于潮湿污染(见第 11 章)通常会得到比预期值低的绝缘电阻和极化指数的读数。为能获取可接受的读数使电机能重新投入运行或进行高电压试验,对电机进行干燥处理是必要的。可与制造商协商合适的干燥工艺。由于潮湿污染而导致绝缘电阻和/或极化指数读数偏低,这时,电机的历史、可视检查和其他结果可帮助评估电机投入运行的潜在风险。同时建议,对于 $P.I.$ 和 R_1 读数低的电机不宜做进一步的高电压试验。

6.3 温度的影响

6.3.1 一般理论

对于给定系统在任意给定的时间点的绝缘电阻,随绕组温度呈指数规律相反变化。对于金属和非金属,温度对电阻率的影响是有差异的,特别是好的绝缘体。在金属中有大量的自由电子,较高的温度引发热搅动,随着电子移动能力的减弱致使电子运动的平均自由路径缩短,从而导致电阻率提高。而在绝缘体中,温度的提高提供了热能,这使得额外的电荷载体获得释放从而降低了电阻率。这个温度变化影响着在 5.1 条所述的除几何电容电流以外的所有电流分量。绕组的绝缘电阻值取决于绕组的温度和所施加电压的时间。一般被试电机的热容量足够大,这样在 1min 和 10min 绝缘电阻读数之间绕组的温度差可以忽略,除非在额定电流下干燥期间进行测量。为防止趋势分析时温度的影响,随后试验的温度应与前面试验的温度接近。然而,如果两次试验时的温度不能控制一致,则建议所有绝缘电阻试验值用式(2)校正到一个统一的基础温度 40°C 。尽管校正值是近似的,但是它可以将在不同温度下获得的绝缘电阻值进行更有意义的比较。

校正可以使用式(2)进行。

$$R_C = K_T R_T \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

R_C ——校正到 40°C 的绝缘电阻值,单位为欧(Ω);

K_T ——在温度 $T^\circ\text{C}$ 时绝缘电阻的温度系数(取自 6.3.2 条或 6.3.3 条);

R_T ——在温度 $T^\circ\text{C}$ 时所测量的绝缘电阻值,单位为欧(Ω)。

对于温度在露点以下的绕组,很难预测表面凝结的潮气的影响,因此校正到 40°C 对于趋势分析产生了一个不可接受的误差。在这种情况下,建议将电机在相似条件下试验的历史数据作为投入运行的主要判据。虽然潮气污染降低了绝缘电阻和/或极化指数的读数,但可以校正到 40°C 按标准进行比较(见第 12 章)。

没有有效的方法将在特定湿度下测得的绝缘电阻值转化为其他湿度下的绝缘电阻值。

6.3.2 用于确定 K_T 的现场测量

获取绝缘电阻与绕组温度曲线数据的建议方法是,在绕组的露点以上测量几个温度点并将结果画在半对数坐标上。当绝缘电阻用对数坐标,温度用线性坐标,试验点应近似直线。通过这条直线的外推可获得 40°C 的校正值。

6.3.3 K_T 的近似值

如果试验时不知道温度对绝缘系统的影响,可应用图 5 按温度每提高 $+10^{\circ}\text{C}$ 二等分法获得温度系数 K_T 的近似值。应注意这仅仅是一种近似,而不能用于计算离 40°C 很远点的绝缘电阻,否则将产生较大的误差。

注:温度每增加 10°C 绝缘电阻降低一半的二等分法,是在 20 世纪 50 年代后期的一些绝缘系统上进行试验所建立的,而并非对所有绝缘系统都是完全正确的。更进一步的测量得出一个绝缘电阻在 $5^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 范围内二等分的校正系数。 K_T 系数的变化能够导致由于绕组温度和 40°C 之间的温差而使 R_c 值误差增大。

也可通过应用式(3)近似计算 K_T 值。

例如:如果试验时绕组的温度是 35°C ,绝缘电阻按每升高 10°C 二等分,则校正到 40°C 的 K_T 按如下方式导出:

$$K_T = (0.5)^{(40-T)/10} \dots\dots\dots (3)$$

即
$$K_T = (0.5)^{(40-35)/10} = (0.5)^{5/10} = (0.5)^{1/2} = 0.707$$

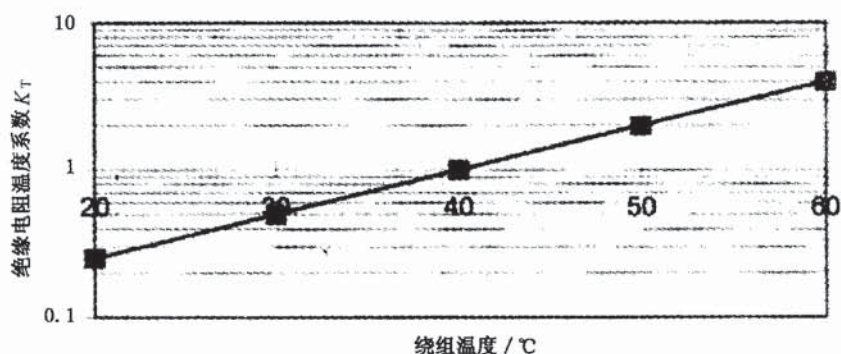


图 5 温度每升高 10°C 绝缘电阻二等分的近似绝缘电阻系数 K_T

6.3.4 极化指数的校正

当极化指数与绝缘电阻一起用来确定绝缘状况时,没有必要对 $P. I.$ 进行温度校正。因为电机温度在 1 min 和 10 min 之间的读数基本不变,所以温度对极化指数的影响是很小的。然而,由于温度的影响导致绕组原始温度比较高时(见 6.3.1),绝缘系统在试验期间温度的降低将导致 1 min 和 10 min 之间电阻读数实质性的增大,所导出的极化指数就会偏高。在这种情况下,建议在 40°C 或以下重复进行测量,以检查极化指数 $P. I.$ 。如 6.2 条所述,不论是 1 min 还是 10 min 测量,只要是绕组温度低于露点,在解释的时候就要考虑潮气污染的影响。

6.4 试验电压幅值的影响

试验电压指导准则列于表 1(见 5.3)。绝缘电阻值可能随着所施电压的升高而稍有降低;然而,对于良好状态和经过干燥的绝缘,在直至额定电压峰值的任何试验电压下所获得的绝缘电阻都应该是相同的。

绝缘电阻随所施电压的升高而大幅度降低说明绝缘有问题。这些问题可以是绝缘不完好或有开裂、存在有严重的脏污或潮气;或者这些问题是由于脏污或潮气单独造成的,或者由其他劣化现象造成的。试验电压超过额定电压时电阻的变化更明显(见 IEEE Std 95-1977)。

6.5 剩余电荷对绕组电阻测量的影响

如剩余电荷存在于绝缘中,绝缘电阻的测量将会产生误差。因此,在测量绝缘电阻之前绕组必须彻底放电。在试验开始时应测量放电电流以确保绕组彻底放电。在接线之后施加电压之前,剩余电荷将使电阻计显示一个反向的偏转。任何反向偏转都不应忽略。

在直流高电压卸压后,绕组接地对于安全和后续试验的准确都是非常重要的。接地时间至少应为充电时间的 4 倍(见 5.5)。

7 测量绝缘电阻的条件

应记录试验时的环境温度、相对湿度、露点、绕组温度、停止运行的时间间隔和试验线路。为与将来

的数据进行比较,将测量结果校正至 40℃也是非常重要的(绝缘电阻校正的方法见 6.3 条)。

进行绝缘电阻试验时电机不必停止运行。在绕组承受与运行时相似的离心力作用的状态下,经常需要进行绝缘电阻测量。某些情况下,为干燥电机而进行短路运行时可做周期性的绝缘电阻测量。在绝缘电阻试验的时候,无论停机与否都应预防设备损坏和人员伤害。

对水冷绕组直接进行绝缘电阻测量,应该排干水并使内部电路完全干燥。对有些使用水冷绕组,可能绕组制造商已经提供不必排出冷却水而进行绝缘电阻测量的方法。一般情况下,如果水不排出则水的电导率应低于 0.25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。更多的信息可从绕组制造商的手册中获取。

8 绝缘电阻试验时的绕组连接

在可能的情况下,建议将相与相之间分开,并单独进行试验。分开试验允许相间进行比较。当一相进行试验时其他两相应与定子铁心、转子本体等同一接地点接地。

当同时对所有相进行试验时,仅是对地绝缘进行试验而未对相间绝缘进行试验。只有一相被试验而其他两相接地时,才能同时测试到对地绝缘和相间绝缘。

连线、电刷装置、电缆、开关、电容器、电涌放电器、变压器和其他外部设备都可能对绝缘电阻读数造成很大的影响。所以建议进行绝缘电阻测量时,所有的外部设备都不与试验回路连接,同时将所有外部设备接地。在所有情况下都应使用一个共同的接地点,以防由于接地电路中杂散损耗对试验结果造成任何不利的影响。

9 测量绝缘电阻的方法

9.1 直接测量

可以应用下面的仪器进行绝缘电阻的直接测量:

- a) 手动或电动的直接显示兆欧表;
- b) 自带电池的直接显示兆欧表;
- c) 自带使用可调线性电源整流器的直接显示兆欧表;
- d) 自带检流计和电池的电阻电桥。

9.2 计算测量

绝缘电阻可使用外部(可调)直流电压源通过电压表和微安表的读数经计算而得到。

注:建议电压线性可调值小于或等于 0.1%。在施加电压期间,来自具有波动的充电电流的损耗是不可预见的,所以由此而导致的偏差也是不确定的(见附录 C)。

通过测量施加于绝缘的电压和通过它的电流来确定绝缘电阻的伏-安法是一种简单的方法。但需要稳定的直流电压源,电压表的选择必须适合所测的最大和最小电压值。电流表通常选用量程满足要求的微安表。

在充电的前几秒钟微安表必须置于最高量程或短路状态,以防被电容充电电流和初期的吸收电流损坏。当微安表处于试验电压状态时,应做好预防以保证操作者的安全。

电阻值可由式(4)计算得到:

$$R_{(t)} = E_{(t)} / I_{(t)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$R_{(t)}$ ——绝缘电阻,单位为兆欧(M Ω);

$E_{(t)}$ ——电压表的读数,单位为伏(V);

$I_{(t)}$ ——施加电压之后(t)S时电流表的读数,单位为微安(μA)。

10 预防

要求在限定的时间内将试验电压加至预期的试验值。试验时应尽快将试验电压加至全值并在试验

期间保持恒定。

由电动机驱动的发电机、电池或整流器提供试验电压的仪器通常用于持续时间为 1 min 的试验。任何电压源的电压都必须是恒定的以防充电电流的波动(见附录 C)。所施电压应是稳定的。由于试验仪器中采用保护电阻,所以应该考虑它们对施加于绝缘的电压幅值的影响。当测量电阻较低时,在电阻器上的电压降是可以估计的,为仪器电压的百分之几。

11 绝缘电阻和极化指数试验结果的解释

绝缘电阻和极化指数试验具有两方面的作用:

- 只要在相关的可控变量一致的条件下,对给定的电机所测得的绝缘电阻的历史资料是判断经过若干年后绝缘状况某些方面趋势一个有用的方法。
- 可在比较目前和以前 $P. I.$ 和/或 R_1 值,对电机进行适当的耐电压试验或投入运行的可行性进行评估。

11.1 监测绝缘状况

如能得到电机绝缘电阻的历史资料,将目前的试验结果与以前的试验结果进行比较将有助于了解绝缘的状况。然而比较试验应具备相似的条件,即绕组温度、电压幅值、电压持续时间和相对湿度(见第 6 章)。对于在不同的绕组温度下的试验结果进行比较,应将结果校正到相同的温度(见 6.3 条)。

如果 $P. I.$ 或 R_1 与从前的读数相比急剧下降则说明表面污染、受潮或严重的绝缘开裂。当在提高的温度(60℃以上)下 $P. I.$ 值较低时,建议在露点以上 40℃以下进行第二次测量对绝缘的真实情况进行检查(见 6.3)。

对于在相似条件下进行的试验, R_1 稳定的增大,即吸收电流随使用年限降低,则说明粘结材料分解,特别是当绝缘材料中含有热塑性的(沥青云母或虫胶云母箔)材料。

11.2 运行或继续试验的可行性

如不能得到绝缘电阻的历史资料,建议使用 $P. I.$ 或 R_1 的最小值评价绕组投入耐电压试验或运行的可行性(见第 12 章)。如 $P. I.$ 或 R_1 因污染或过分受潮而降低,可通过清洗和干燥来达到可接受的值。干燥绝缘时, $P. I.$ 值可显示干燥过程何时可结束,即 $P. I.$ 结果超过推荐值。如 R_1 值因严重的绝缘老化或损坏而降低,则建议电机不投入运行和进行耐电压试验。

额定容量 10 000 kVA 及以下的电机,极化指数或绝缘电阻值(在 40℃时)在推荐值以上时(见第 12 章)才可投入运行或进一步进行耐电压试验。

额定容量为 10 000 kVA 以上的电机,极化指数和绝缘电阻值(在 40℃时)均在推荐值以上时(见第 12 章)才可投入运行或进一步进行耐电压试验。

如 R_1 值(在 40℃时)大于 5 000 MΩ, $P. I.$ 值可不考核且可以不考虑(见 12.2.2 条)。

对于漆布、虫胶云母箔或沥青定子绕组,一个非常高的 $P. I.$ 值(例如,大于 8)可能说明绝缘已经热老化,故障的危险性很大。如物理检查(如,敲击绝缘)证明绝缘干燥且发脆,最好不要尝试对绕组进行清洗或耐电压试验。如电机投入运行,事故随时可能发生。

对于 $P. I.$ 和 R_1 低于推荐值的电机可能也可运行,但本标准并不推荐这一做法。所有试验值低于推荐值的情况下,都必须进行研究以确定读数低的原因。绕组的历史资料、可视检查和其他试验结果都可用于确定电机是否可投入运行。

11.3 绝缘电阻试验的局限性

绝缘电阻试验数据对评估一些绝缘问题存在与否是有用的,如:污染、吸潮或严重开裂;然而也有一些局限性:

- 绕组的绝缘电阻与它的介电强度没有直接的关系。除非缺陷集中,否则就不能通过绝缘电阻的测量来判断绕组绝缘系统是否失效;
- 绕组具有相当大端部表面积的大型或低速电机以及具有换向器的电机的绝缘电阻可能低于

- 推荐值。这种情况, R_1 的历史趋势对于评价绝缘状况是没有意义的;
- c) 在特定电压下仅仅进行绝缘电阻测量不能说明外来异物是集中于绕组还是贯穿分布于绕组;
 - d) 对直流电压测量, 如, R 和 $P. I$ 试验, 检测不到成型线圈由于浸渍不当、热老化或热循环所致的绝缘内部发空(见附录 B);
 - e) 由于绝缘电阻是在电机处于静态时测量的, 所以这些试验检测不到由于电机旋转所产生的问题, 如: 线圈固定不牢或振动导致端部绕组的松动。

12 极化指数和绝缘电阻的最小推荐值

12.1 最小值

所推荐的交流或直流旋转电机绕组最小 $P. I.$ 和 R_1 值是建议绕组进行耐电压试验或投入运行的最小值。

在一些情况下, 特殊的绝缘材料或设计可能造成它的值较低。对于这些设计的最小值应该与历史试验值进行比较。

12.2 极化指数

推荐用于交流和直流旋转电机的最小 $P. I.$ 值列于表 2。表 2 是以绝缘材料的耐热等级为基础的, 除对未绝缘的磁场绕组外, 适合于所有的绝缘材料, 而不考虑它的使用范围。

表 2 所有电机部件* 极化指数的最小推荐值(绝缘等级按 IEC 60085-1:1984)

耐热等级	最小 $P. I.$
A 级	1.5
B 级	2.0
F 级	2.0
H 级	2.0
^a $P. I.$ 试验不适合于未绝缘的磁场绕组(见 12.2.1 条)。	
注: 如 1 min 绝缘电阻值在 5 000 MΩ 以上, 所计算的 $P. I.$ 值就没有意义了。这种情况下, 就不用 $P. I.$ 值来衡量绕组的状况。	

12.2.1 极化指数对磁场绕组的适用性

绝缘电阻和极化指数试验的目的是确定绝缘系统是否适合于投入运行或进行耐电压试验。一些感应电机转子绕组通常与转子本体是不绝缘的, 因此不对这些感应电机转子绕组或磁场绕组进行极化指数的考核。然而, 如果转子绕组与转子本体绝缘, 极化指数试验是适合的, 如, 绕线感应转子和凸极电机。许多大型透平发电机磁场绕组由非包裹式绝缘的裸铜所组成。虽然对地和对其他部件间通过绝缘板来绝缘, 但在进行直流电压试验时, 与泄漏电流(I_L)相比较, 吸收电流(I_A)在未绝缘的铜的很大内表面区域是不明显的。吸收电流的不存在改变了 R 特性曲线(见图 4), 从 1 min 到 10 min 的 R 读数值的改变很小。因此描述 R 曲线倾斜度的 $P. I.$ 不适用于未绝缘的磁场绕组。

另一方面, 许多其他类型的磁场绕组没有明显的裸露导体。这些设计使用的导体全部包裹在绝缘内部并且有一个典型的吸收电流(I_A)。对于这些电机, $P. I.$ 值对评估绝缘系统的状况是有价值的, 此时应参考基于磁场绕组耐温等级的最小推荐值。

12.2.2 R_1 大于 5 000 MΩ 时极化指数的适用性

当施加电压(指直流电压幅值)1 min 以后所得到的绝缘电阻读数(R_1)大于 5 000 MΩ 时, 整体测量的电流(I_T)在亚微安范围内(见图 1)。如试验达到这种水平, 仪器的灵敏度、电源电压微小的变化、环境湿度、试验连线和其他无关的部件都可能极大地影响到 1 min~10 min 内总电流的测量值。因此, 当 R_1 大于 5 000 MΩ 时, $P. I.$ 不一定能反映绝缘的状况, 因此建议不作为评估依据。

12.3 绝缘电阻

用于确定交流电机和直流电机定转子绕组进行耐电压试验或投入运行的 1 min 后最小绝缘电阻 $R_{1\min}$ 值见表 3。

实际用于与 $R_{1\min}$ 进行比较的绕组绝缘电阻,是通过对整个绕组施加一个恒定的直流电压并保持 1 min 而得到的,同时校正到 40℃。

与其他两相接地绕组一起被试的三相电枢绕组中的另一相的最小绝缘电阻应近似为整个绕组的 2 倍。如每相都分别试验并且不试验的两相使用保护电路,检测到的最小绝缘电阻值应为整体绕组的 3 倍。

表 3 40℃ 时推荐绝缘电阻的最小推荐值 单位为兆欧

最小绝缘电阻值	试验对象
$R_{1\min} = kV + 1$	适用于约 1970 年以前制造的大多数绕组、所有磁场绕组以及下面未提及的其他绕组
$R_{1\min} = 100$	适用于约 1970 年以后制造的大多数直流电枢和交流绕组(成型线圈)
$R_{1\min} = 5$	适用于大多数额定电压为 1 kV 以下的具有散下线定子线圈的电机和具有成型线圈的电机
注 1: $R_{1\min}$ 是整个电机绕组在 40℃ 时的推荐最小绝缘电阻,单位为 MΩ。	
注 2: kV 是电机的额定线电压,单位为 kV(rms)。	

附 录 A
(资料性附录)
派生的极化指数

极化指数($P. I.$)传统地定义为 10 min 绝缘电阻(R_{10})与 1 min 绝缘电阻(R_1)的比值,试验在相对恒定的温度下进行。在较老的绝缘材料中,例如沥青-云母,吸收电流经常需要衰减 10min 或更长的时间才能接近零(见图 2)。对于近代的绝缘系统中的成型绕组定子,特别是散下线的电机,吸收电流可在 2 min~3 min 之内衰减至零(见图 3)。因此,一些用户计算由传统极化指数 $P. I.$ 派生的极化指数,见式(A.1)、(A.2)和式(A.3),但并不只这 3 个公式。

$$P. I. = R_1 / R_{30s} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$P. I.$ ——极化指数;

R_1 ——施加电压 1 min 以后的绝缘电阻读数;

R_{30s} ——施加电压 30 s 以后的绝缘电阻读数。

$$P. I. = R_5 / R_1 \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$P. I.$ ——极化指数;

R_5 ——施加电压 5 min 以后的绝缘电阻读数;

R_1 ——施加电压 1 min 以后的绝缘电阻读数。

$$P. I. = R_{60} / R_{15} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$P. I.$ ——极化指数;

R_{60} ——施加电压 60 s 以后的绝缘电阻读数;

R_{15} ——施加电压 15 s 以后的绝缘电阻读数。

它们的特征是施加直流电压的时间比较短,因此绕组必须接地的时间也比较短(见 6.5 条)。在现代绕组中实质上几分钟以后吸收电流就达到零,使用较短的时间即可获得 $P. I.$ 的比值,因此试验时间可极大缩短而并不影响反映所存在污染和吸潮的程度。另外一种派生的形式是记录每一分钟的绝缘电阻,一直到 R 稳定(三个连续的读数)时再停止试验。

使用这些派生极化指数是有局限性的:

- a) 对于什么时间间隔记录 R 值没有标准。不同的机构采用不同的比值。
- b) 没有一致的判断标准,而在传统的 $P. I.$ 中则已经确定。
- c) 鼓励用户收集短时比值的数据,以期将来建立合适统一的标准。

附录 B
(资料性附录)
直流与交流电压试验

直流电压试验通常是在试样导体和地之间施加一直流电压源并用直流安培表测量总电流。试验电压与试验电流的比值是试样和地之间的总电阻。电阻值由式(B.1)确定。

$$R = \rho L / A \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

R ——电阻;

ρ ——材料的电阻率;

L ——路径长度;

A ——截面积。

由于污垢、油和水经常污染旋转电机绕组的端部区域,使得电阻率的值很低。所以被污染的绕组的直流电压试验通常会导致表面泄漏电流高及相应的电阻读数低。这一特点使得直流电压试验成为确定绝缘系统污染程度可行的方法。另外,如果绝缘系统采用棉质补强材料的云母带作为主要的电气绝缘,直流电压试验就会显示棉质是否已经受潮并且电阻率降低。应注意,1970年以后生产的大多数绕组不含这些吸潮的带子,因此直流电压试验检测不到绝缘系统内部的问题,例如热劣化。

由于成型绕线定子绕组设计将云母作为主要的电气绝缘,云母本身具有极高的电阻率(因此是好的绝缘体),仅仅一层云母带就可阻止直流电流。因此,如由于浸渍不当、热劣化或热循环所造成的存在于绝缘内部的气隙,用直流电压试验是检测不到的。然而,如果存在有严重的裂缝贯穿于全部绝缘,就有可能在铜导体和地之间建立一条电气路径,从而显示出低电阻。

当交流高电压施加于试样端部和地之间时,试样的电流由电容支配。电容由式(B.2)确定。

$$C = \epsilon A / d \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

C ——电容;

ϵ ——材料的介电常数;

A ——截面积;

d ——材料厚度。

由于绝缘系统的介电常数在极大程度上受所存在的气隙和/或水的影响,所以对于检测所有类型绝缘系统的内部绝缘问题,交流电压试验比直流电压试验更灵敏。由于试验能力的差异,直流和交流试验都应进行,以便更完全地评价绝缘系统的状况。

附录 C

(资料性附录)

用于直流电阻测量电源的校正

因为电压的变化会导致测量的变化,所以用于绝缘电阻测量设备的电源校正是很重要的。这一点可通过式(C.1)的关系看到:

$$i_{(t)} = Cdv(t)/dt \quad \dots\dots\dots(C.1)$$

式中:

$i_{(t)}$ ——电流响应;

$dv(t)/dt$ ——电压变化;

C ——试品电容。

根据式(C.2),由于电压的波动所引起的电流变化可转换成了绝缘电阻(视在电阻 R_A)的变化:

$$R_A = V_{dc}/[I_{dc} + i(t)] \quad \dots\dots\dots(C.2)$$

式中:

I_{dc} ——由于绝缘电阻影响的电流;

$i(t)$ ——容性电流;

V_{dc} ——施加的直流电压。

综合这些关系可得到视在电阻的变化如式(C.3):

$$R_A = V_{dc}/[I_{dc} + Cdv(t)/dt] \quad \dots\dots\dots(C.3)$$

这一校正可以按施加电压的百分数来确定,并可由实践所产生的值计算得到。由于大多数 R 测量的精确度不超过 2%,因此这一精度可用作视在电阻的校正。

例如,在使用现代材料建立的定子绕组绝缘系统的最低 R 值一般约为 $100\text{ M}\Omega$,试验电压经常使用 5 kV ,并且大电机的典型电容约为 $0.25\text{ }\mu\text{F}$ 。这些数据给出了 $1\text{ }\mu\text{A}$ 的 $i(t)$,其中包括测量精度,这使得 $dv/dt \ll 4\text{ V/s}$ 。因此在 5 kV 下的校正是 4 V/s 或 0.08% 。

大多数的 R 测量是在 1 Hz 以下的频率进行的,所以这些结果适合于低频电源的校正,即与线电压波动的缓慢变化相应的磁化系数。对于 50 或 60 Hz 的电源的脉动可能仅仅有一个较小的冲击作为电源的校正,这是由于测量的带宽限制了在这些频率下对波动的冲击。