

# 发电机转子匝间测试及其实践应用的研究

游哲锐

(中国船级社 上海分社, 上海 200135)

**摘要:** 船用发电机的转子绕组因通过电压低、电流小、结构比定子简单等原因,在日常电机制造及检验过程中,匝间绝缘的监测容易忽视,而且 IEC 60034 以及 IEC 60092 等国际电工委员会颁布的标准中也没有对此提出明确要求。但是,基于对产品质量及性能的可靠性保障,转子匝间耐压测试是有必要的,特别对高压电机产品的转子匝间绝缘监测,以验证匝间绝缘对陡峭前沿的操作过电压的承受能力。以制造厂进行的高压发电机转子匝间试验为例,介绍了测试方法、故障现象及异常分析三部分内容,包含了以脉冲波形判断发电机转子部分的绝缘异常,以及制造过程中接地电阻的问题。

**关键词:** 转子匝间测试;脉冲波形;绝缘监测;接地电阻

**中图分类号:** TM 306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0101-03

## Research on Generator Rotor Inter Turn Test and Its Practical Application

YOU Zherui

(Shanghai Branch, China Classification Society, Shanghai 200135, China)

**Abstract:** In the daily process of manufacturing and testing electric motors, the inter-turn insulation monitoring of marine generator rotor winding is easy to be ignored due to its low voltage and small current, the simpler structure than the stator, also the standards such as IEC60034 and IEC60092 which International Electrotechnical Commission issued have no explicit requirement. However, based on the reliability of product's quality and function, it is necessary to test the rotor inter-turn voltage, especially to the inter-turn insulation monitoring of high-voltage generator rotor winding in order to demonstrate a satisfactory withstand level of the inter-turn insulation to steep fronted switching surges. The article take the high-voltage generator rotor winding inter-turn test as an example, introducing the test methods, the failure phenomenon and abnormal analysis, including the problem of judging the insulation abnormal on generator rotor part by pulse waveform, and earth resistance in the manufacturing process.

**Key words:** rotor inter turn test; pulse waveform; insulation monitoring; earth resistance

## 0 引言

近年来,我国船舶工业持续快速发展,高参数、大容量发电机机组在船舶工业中投产越来越多。在大型发电机高速旋转状态下,转子绕组将承受较大的离心力和热应力。由于转子匝间绝缘薄弱,再加上设计、工艺和制造过程中的问题,以及运行中电磁、机械、热力等的综合作用,使得转子绕组发生移动、摩擦、绝缘下降的情况,从而造成匝间短路。在发电机转子匝间短路初期,故障

表象并不明显,对发电机的正常运行影响较小,故一般较容易忽视发电机转子匝间短路的问题。但随着发电机使用的增加,故障持续发生,匝间短路严重时将造成发电机主轴、轴瓦磁化。若磁化严重需进行退磁处理,则负序磁场可能损伤转子,造成转子一点甚至两点接地、烧毁护环等恶性事故的发生,给机组稳定运行产生较大影响。

## 1 现状分析

发电机在出厂阶段都会进行出厂或型式试

验,并且其测试项目因受到国家标准及客户或第三方机构要求,从而被大家所熟知,但是电机在组装之前的定子和转子的质量同样需要重视,特别是高压发电机。针对定子测试,常见的有线圈匝间测试,线圈对地绝缘测试,定子线圈的电抗测试,对地电容测试,以及浸漆后的定子耐压,局部放电和介质损耗等测试;而针对转子这一部分,因其制造周期没有定子长,工艺也没有定子复杂,相对来说测试项目要少一些,但同样有对地耐压,匝间及电阻测试等常规测试内容。

目前市面上不同的公司和测试机构在测试项目的选择上还是基于自身经验来考虑的,转子的匝间测试没有得到重视,总的来说因为这个测试主要是对电机寿命的影响,出现问题不会马上造成烧毁电机等恶劣后果,并不像绝缘和耐压测试会直接对电机质量产生影响,故未引起重视。

## 2 国内外相关规范标准

IACS-UR E13 第 4.9 条“介电强度试验”中提及“Routine Test”时“对高压电机的线圈应按 UR E11 进行脉冲试验<sup>[1]</sup>。UR E11 中对高压电机附加试验要求规定为:除了满足旋转电机通用的试验要求外,高压电机需按 IEC 60034-15 增加单个线圈高频高压测试,以验证其匝间绝缘的符合性<sup>[2]</sup>。根据 UR E13 及 UR E11,中国船级社《钢质海船入级规范》2015 年第 4 篇第 3 章中对船用发电机的耐压试验引述要求如下:第 3.2.9.13 条,电机耐压试验应符合 IEC 60034-1 出版物的有关规定,对高压电机的线圈还应按 2.14.3.3 进行试验;第 2.14.3.3 条的要求是:除通常对旋转电机要求的试验项目以外,对单个线圈还应按照接受的标准进行高频高压试验,以验证匝间绝缘对陡峭前沿的操作过电压的承受能力。其中,按照接受的标准参见 IEC 60034-15 出版物《旋转电机第 15 篇模绕定子线圈的交流旋转电机的耐压等级》或其他等效标准<sup>[3]</sup>。IACS-UR 及船级社规范中所述的要求主要针对电机定子线圈,而没有对转子部分的匝间绝缘进行考量。

相应的,目前国外大部分船级社也都只是提到发电机的定子绕组或线圈需要在制造过程中进行匝间试验,并且执行的标准也是参见 IEC 60034-15 的内容。

## 3 转子匝间测试方案

因船级社规范及 IEC 等国际标准里均没有提到转子匝间测试的要求及操作方法,各电机制造厂及一些第三方测试机构根据自己的理解和经验发展了不同的测试方法,下面重点介绍比较常见的四种方法:

(1) 空载试验法。通过测量空载状态下发电机转子的励磁电流,将其与历史测量值进行比较,根据励磁电流变化的程度来判断转子绕组是否存在匝间短路故障。存在匝间短路故障的转子绕组,其空载电流将比历史值有所增大。但是,当短路匝数较少时,空载下励磁电流的增长不会很明显,还有该方法受测量精度的限制,一般在转子绕组短路的匝数超过总匝数的 3%~5% 时,才能在空载和短路特性曲线上反映出来。所以,其灵敏度也较低,也只能作为综合判断方法之一。因此空载试验只能作为判断匝间短路故障的参考。

(2) 直流电阻测量法。通过测量转子直流电阻的降低来检测转子匝间短路故障。理论上,出现匝间短路故障时,转子绕组的直流电阻值会变小,因此通过测量其直流电阻值的下降,可判断转子存在匝间短路故障。但是,该方法有一个很大的问题,因为直流电阻测试时,绕组上通过的电压都非常低,如果转子绕组的匝间短路属于虚接的情况,该方法并没有办法测出,而当发电机转子在实际使用时通过较高的电压时可能会击穿该虚接点,而且按照 DL/T 596—1996 规定,发电机每次大修时,应对转子绕组的直流电阻进行测量(冷态下),并与原始数据比较,当换算到同温度时其变化不应超过 2%。由于一般船用发电机转子绕组的总匝数较多,如果其中只有 1 匝~2 匝短路,即使测量很精确,直流电阻值减小也不超过 1%。因此,比较直流电阻法的灵敏度是很低的,不能作为判断匝间短路的主要方法。当发生匝间短路的匝数很少时,此方法就很难准确判断转子绕组是否存在匝间短路故障。

(3) 交流阻抗和损耗试验。通过测量转子在不同转速下的交流阻抗和功率损耗,并与以往同条件下的交流阻抗及功率损耗相比较来判断转子绕组是否存在匝间短路故障。一般情况下,若阻抗下降较多,功率损耗增加较多则可判断为匝间

短路。但根据其试验结果来判断转子有无匝间短路故障的判据比较模糊。相比较而言,功率损耗要比交流阻抗敏感得多,但依然不能准确判定是否存在匝间短路<sup>[4]</sup>。

(4) 重复脉冲波形法。该方法基于行波理论,通过双脉冲信号发生器,对转子两个磁极同时施加前沿陡峭的高频冲击脉冲波,通过比较对称性,验证转子绕组是否存在匝间短路。正常情况下,两条响应曲线应当十分吻合;当两条曲线非吻合度达到一定程度时,即判断转子绕组存在匝间短路故障。此方法操作方式简单,但冲击脉冲需尽量保证不受到外界干扰。

#### 4 测试异常分析

本文以某发电机厂生产的高压同步发电机为例,参照 IEC 60034-15 对定子线圈的绕组耐压试验方法(即重复脉冲波形法),在产品装配过程中,进行转子匝间耐压试验。发电机具体参数如下:5 588 kVA, 11 000 V, 293 A, 60 Hz, 720 r/min。所选测试设备如下:PJ 匝间测试仪 C10-2M, Meggar 绝缘测试仪 MIT-1000, 微欧仪 OM21-4C。该匝间测试仪也同样应用于定子绕组测试,故在工厂里使用也很方便,该仪器可产生高达 10 kV 的脉冲电压,PJ 测试仪的好处在于同时可以测量两个磁极。因为一般同步发电机转子的工作电压低于 250 V,工厂企业标准中对测试电压的标准值定义为冲击电压取值为额定电压的 10 倍,即 2 500 V,测试时间可以选择为 3~30 s,如果两个转子磁极的波形重合度比较高,可以认为绕组匝间没有问题;或者整台电机所有的磁极绕组的匝间测试波形都比较类似,也可以认为绕组匝间没有问题。测试时的注意事项:铁心做好接地,绕组周围 2 m 内不要有电气设备干扰,否则会影响到试验所产生的波形,同时,测试时如果有一排绕组排列待测,需要从两边同时朝里靠近,以保证两个线圈绕组磁极受到的外部干扰效果大体一致。

故障现象:该发电机共有 10 个磁极,分为 5 组,测试连接如图 1 所示,在测试前 3 组时,波形如图 2 所示,在测试第四组时,发现两个回路的波形重合度不是很高,如图 3 所示。检查磁极铁心接地良好,但是前提需要排除外部干扰信号以及保证绕组接地等因素。



图 1 测试接线

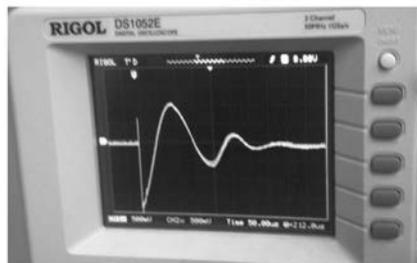


图 2 第一、二、三组测试波形

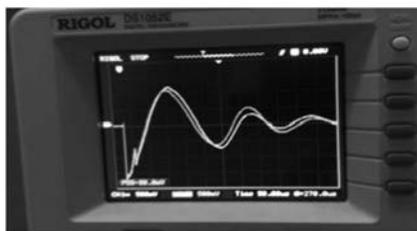


图 3 第四组测试波形

故障分析:发现波形异常后,首先需要用绝缘表测量绕组有没有对铁心击穿,一般选用 500 V 绝缘表进行测量,如绝缘电阻太低,那很可能发生了对地击穿。这时就需要拆开绕组,查找击穿点;如果绝缘电阻没有问题,这时就需要用微欧计分别测量绕组电阻,如果两个绕组电阻出现偏差,则初步可判定有绕组线圈数量不一致,此时就需要进行其他正常绕组的电阻测量,来查找发现被击穿的磁极;如果两个绕组电阻也非常接近,进一步需要确认的是绕制的漆包线里是否含有杂质,导致了层间短路,或者是绕制时外部带刺物体刺穿了漆包线的绝缘,导致层间短路。

根据现场测试后得出的数据,分别记录的三个磁极的电阻和绝缘电阻,如表 1 所示,可以看出是 2 号磁极电阻偏大,进一步查找绕组线圈数量,

(下转第 119 页)