

# 重复脉冲法在汽轮发电机转子匝间短路故障诊断中的应用

针对汽轮发电机转子匝间短路故障诊断,介绍了重复脉冲法测试(RSO)的基本原理,并通过一起660 MW汽轮发电机转子匝间短路故障诊断的案例,分析对比了多种试验方法,认为RSO在汽轮发电机转子匝间短路故障诊断中有较高的应用价值,可以通过RSO模拟短路试验、补偿试验等方法对故障进行准确定位。

王展宏 金 泱 鲁 竞 王 新 吕嘉琛/浙江省浙能技术研究院有限公司

## 0 引言

在目前新的发电形势下,发电机组年起停次数逐年增多,发电机转子故障率呈上升趋势,其中匝间短路占比最大。

引起发电机转子匝间短路故障原因主要有:绕组热膨胀次数增多,匝间位移量增速;转子端部绕组近乎处于裸露状态,油污、异物容易侵入,冷却不均导致绕组形变;端部固定松动,起停过程中受到离心力、热应力的作用导致绝缘破坏。

转子绕组匝间绝缘不良早期症状不明显,随着长时间的运行,匝间绝缘会逐渐劣化,若任其发展,会造成绝缘破坏、机组振动加剧、转子大轴磁化和转子铁心损坏等严重后果。所以,尽早发现匝间绝缘问题对于保证发电机的安全运行并合理安排检修计划非常重要<sup>[1]</sup>。

重复脉冲法(Recurrent Surge Oscillograph, RSO)是近些年来新提出的发电机转子匝间短路故障诊断手段之一,该方法相较其他传统方法具有灵敏度高、定位精确和接线简单等优点<sup>[2]</sup>。本文通过一起660 MW汽轮发电机转子匝间短路案

例的诊断分析,认为与传统试验方法相比,RSO更具推广价值。

## 1 发电机匝间短路诊断技术

针对转子匝间短路故障的诊断,按照电力行业标准DT/L 1512—2016《隐极同步发电机转子匝间短路故障判断导则》推荐的方法有:交流阻抗和功率损耗法、极间电压法、线圈电压法、探测线圈波形法和重复脉冲法等<sup>[3]</sup>。

### 1.1 交流阻抗和功率损耗法

该方法通过对比、分析转子交流阻抗以及功率损耗的变化,判断是否存在转子匝间短路。其原理是基于当转子出现匝间短路时,转子绕组的有效匝数会减小,损耗会增大。其主要缺陷是影响转子绕组的交流阻抗因素过多,操作复杂,如果对测量的操作方法或者测量条件未严格控制,易得出错误的数据和结论。造成不必要的人力、物力浪费,直接影响到安装或检修的工期<sup>[4]</sup>。

### 1.2 极间电压法和线圈电压法

极间电压法和线圈电压法原理基本是在发电机绕组两极施加100~400 V的工频电压并测量极间电压降和对应线圈的电压降,利用其对称性来确定是否存在匝间短路。该方法只能在转子处于发电机膛外进行,测量结果受测量人员的操作影响较大。

### 1.3 探测线圈波形法

探测线圈波形法是利用安装在定子铁心的探测线圈测量发电机气隙中的磁



王展宏/工程师

## 关键词/Keywords

重复脉冲法·  
汽轮发电机转子·  
匝间短路·

场, 然后进行微分处理得到特征波形。由于正常与故障情况下的特征波形有较大差别, 所以通过分析微分波形就可以判断并定位匝间短路故障。该方法可信度较高, 但其更适用于在出厂试验或者交接试验中应用<sup>[5]</sup>。此外, 有较大比例的已投产的机组尚未安装探测线圈。

## 1.4 RSO

### (1) 试验原理

RSO试验的基本原理是在转子绕组的两端同时注入脉冲信号, 即前沿陡峭的低电压脉冲, 通过分析注入点脉冲信号与反射波的叠加波形来判断转子绕组是否存在匝间短路故障。在该类脉冲信号下, 转子绕组可视为一段传输线, 其阻抗分布是由转子绕组的形状所决定的。由于转子绕组结构的对称性, 正常情况下, 两个注入点波形是高度一致的。特征波形, 即两个注入点波形的相减波, 表现为平直的直线。当存在匝间短路或对地短路时, 绕组阻抗分布的变化产生反射波, 只要短路点不是发生在绕组两极的正中点, 反射波到达转子两端的传播时间不同, 则两端呈现不同的合成波, 在特征波形上表现为尖峰突起。特征波形尖峰的幅值、位置与短路的匝数、位置有关。短路的匝数越多, 幅值越大, 尖峰的位置反映短路点在绕组上的相对位置<sup>[6]</sup>。试验接线示意图如图1所示。

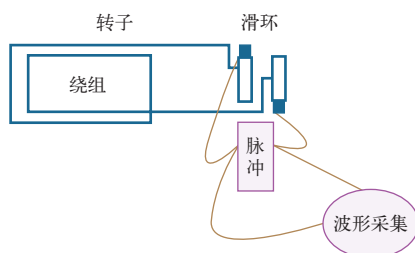


图1 RSO试验接线图

图2为RSO正常波形, 垂直于横轴的标尺线, 分别标识了脉冲信号起点和终点。系统依据指数函数衰减原理在该时间点间绘制了正、负两条判据线, 当特征波形畸变尖峰超过判据线时可以判定存在匝间短路现象。

图3为匝间短路故障的典型波形, 特征波形存

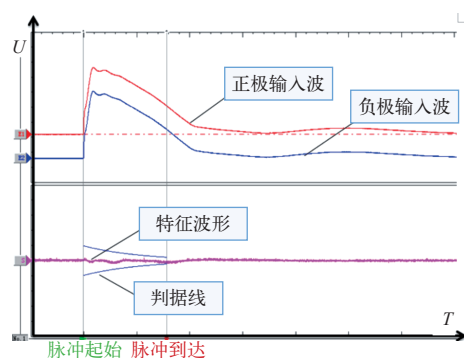


图2 RSO正常波形

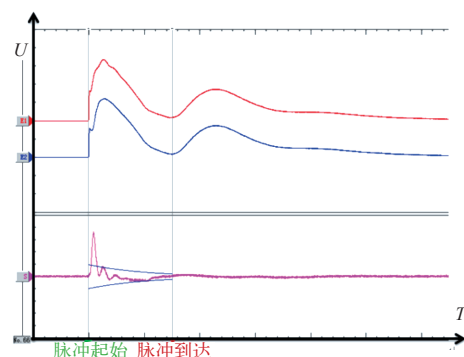


图3 典型匝间短路波形

在明显的畸变尖峰。

### (2) RSO试验的特点

- 1) RSO试验接线简单, 试验设备便携, 操作方便。
- 2) 转子在膛内或膛外均可进行试验, 可利用集电环电刷对转动的转子进行测试。
- 3) 对转子匝间绝缘劣化敏感度高, 能准确判断潜在的匝间短路故障趋势<sup>[7]</sup>。

## 2 转子匝间短路故障诊断案例

某能源集团下属发电厂2<sup>#</sup>发电机为东方电机厂出品的QFSN-660-2-22C型三相、二极及隐极式转子同步发电机, 于2005年出厂。2018年3月在例行维修期间针对发电机转子进行了如下试验。

### 2.1 RSO试验

RSO试验结果如图4所示。特征波形有明显的向上畸变尖峰, 表示该转子外环线圈存在匝间短路故障。激励信号传播时间为 $14.18 \mu\text{s}$ , 尖峰出现的时间为 $11.04 \mu\text{s}$ , 时间比例为 $(14.18/11.04) \times$

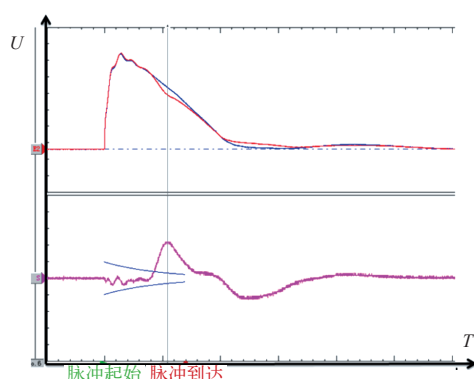


图4 某发电厂2<sup>#</sup>机组RSO试验特征波形

100%=38.9%。试验人员参考同类型机组RSO短路模拟试验数据库,通过估算,38.9%的位置大致为6<sup>#</sup>线圈。

## 2.2 RSO短路补偿试验

短路补偿试验原理如图5所示,假设匝间短路故障点在左侧绕组6<sup>#</sup>线圈某处,基于转子结构的对称性以及RSO试验原理,若在右侧线圈对称位置引入相同阻抗值的模拟短路,则特征曲线的畸变尖峰消失,波形归为平直直线。

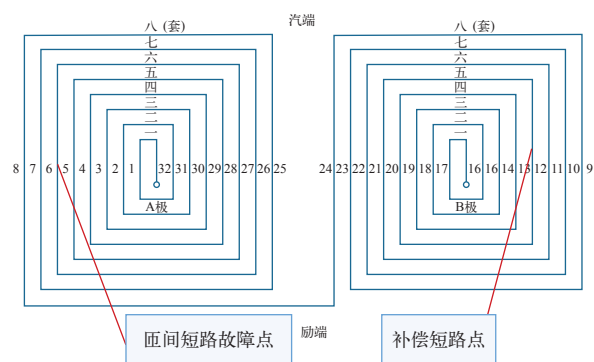


图5 补偿短路试验示意图

试验人员在疑似故障点对称位置,即内环6<sup>#</sup>线圈引入了一个0 Ω的模拟短路,得到以下波形,如图6所示。

原特征波形38.9%处的向上畸变尖峰消失,进一步确认了外环6<sup>#</sup>线圈存在匝间短路故障。

## 2.3 转子交流阻抗试验

通过查询历年转子交流阻抗试验数据,并选取转子处于膛外且外施加电压为200 V时的数据进行对比分析,如表1所示。2018年试验结果为:阻

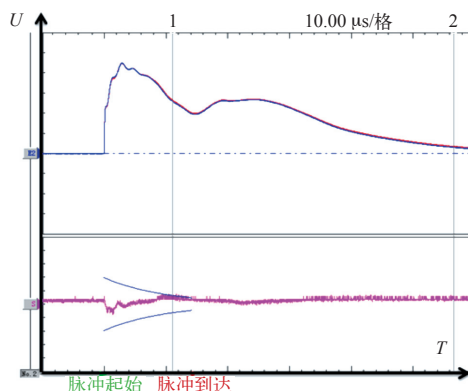


图6 某发电厂2<sup>#</sup>机组RSO补偿短路试验波形

抗Z较2015年、2012年分别减少了1.5%、4.9%;损耗P较2015年增大了0.6%,较2012年减少了0.7%。根据电力行业DT/L 1512—2016标准判断,并无明显异常<sup>[8]</sup>。

表1 交流阻抗试验数据

| 时间       | U/V | I/A   | P/W   | Z/Ω   |
|----------|-----|-------|-------|-------|
| 2012年10月 | 200 | 42.08 | 5 908 | 4.752 |
| 2015年11月 | 200 | 43.72 | 5 827 | 4.586 |
| 2018年3月  | 200 | 44.34 | 5 865 | 4.515 |

## 2.4 极间电压法和线圈电压法

极间电压法和线圈电压法试验判断原则,出现以下情况可判定存在匝间短路。

- 1) 极间电压差超过最大电压3%时。
- 2) 对应位置线圈电压差超过最大电压3%<sup>[9]</sup>。

极间电压法试验结果如表2所示。内、外环电压降存在高达18.18%的偏差,远超标准值。

表2 极间电压试验数据(外施电压AC 200 V)

| 时间       | 位置1(外环) | 电压/V | 位置2(内环) | 电压/V | 电压差(%) |
|----------|---------|------|---------|------|--------|
| 2015年11月 | 正极—极中点  | 98.5 | 负极—极中点  | 98.5 | 0      |
| 2018年3月  | 正极—极中点  | 110  | 负极—极中点  | 90   | 18.18  |

线圈电压法试验结果如表3所示。其1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>和8<sup>#</sup>线圈电压降偏差均超过标准值,其中6<sup>#</sup>线圈电压降偏差超过标准值25.7倍,可以认定6<sup>#</sup>线圈存在严重的匝间短路现象。

表3 线圈电压试验(外施电压AC 100 V, 2018年2月)

| 序号 | 外环                                  | 电压/V | 内环                                  | 电压/V | 电压差(%) |
|----|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|--------|
| 1  | 1 <sup>#</sup> 线圈—2 <sup>#</sup> 线圈 | 5.41 | 1 <sup>#</sup> 线圈—2 <sup>#</sup> 线圈 | 5.6  | 3.39   |
| 2  | 2 <sup>#</sup> 线圈—3 <sup>#</sup> 线圈 | 6.2  | 2 <sup>#</sup> 线圈—3 <sup>#</sup> 线圈 | 6.1  | 1.6    |

(续)

| 序号 | 外环                                  | 电压/V | 内环                                  | 电压/V | 电压差<br>(%) |
|----|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|------------|
| 3  | 3 <sup>#</sup> 线圈-4 <sup>#</sup> 线圈 | 6.16 | 3 <sup>#</sup> 线圈-4 <sup>#</sup> 线圈 | 6.62 | 6.95       |
| 4  | 4 <sup>#</sup> 线圈-5 <sup>#</sup> 线圈 | 6.2  | 4 <sup>#</sup> 线圈-5 <sup>#</sup> 线圈 | 6.6  | 6.06       |
| 5  | 5 <sup>#</sup> 线圈-6 <sup>#</sup> 线圈 | 1.36 | 5 <sup>#</sup> 线圈-6 <sup>#</sup> 线圈 | 6.91 | 80.3       |
| 6  | 6 <sup>#</sup> 线圈-7 <sup>#</sup> 线圈 | 5.92 | 6 <sup>#</sup> 线圈-7 <sup>#</sup> 线圈 | 6.71 | 11.8       |
| 7  | 7 <sup>#</sup> 线圈-8 <sup>#</sup> 线圈 | 7.22 | 7 <sup>#</sup> 线圈-8 <sup>#</sup> 线圈 | 6.68 | 7.48       |

## 2.5 匝间短路故障实际情况

为进一步确定转子存在匝间短路情况,将该转子返厂进行解体检查,发现转子汽侧护环下内环6<sup>#</sup>线圈第三匝表面有明显放电痕迹,放电点匝间绝缘已碳化破坏,位于R角直线处,如图7所示。



图7 内环6<sup>#</sup>线圈第三匝表面放电痕迹

故障点的确认,充分验证了此次试验判断的正确性和准确性。

## 3 结束语

通过本次转子匝间短路故障诊断过程,可以得到:

1) 静态条件下,交流阻抗及损耗法对故障存在的判断并不可靠。若需要准确判断,则需要对不同转速下的试验数据进行跟踪分析,操作较复杂且影响因素较多。

2) 极间电压法和线圈电压法能够有效地对短路点进行定位。但与RSO试验相比操作更复杂,外施电压等级也较高,安全性低。

3) 极间电压法和线圈电压法是RSO试验理想的辅助试验。在故障定位的过程中,若RSO试验、极间电压法和线圈电压法试验结果互相印证,则需要引起足够的重视并进行进一步的解体检查。

4) RSO试验技术发展至今,其在发现和定位故障的准确性、适用性等方面有着独特的优势,与其他方法相比,尤其适合发电机转子状况的跟踪分析,适合推广。

5) 建议每台发电机应建立完整的RSO试验档案,包括正常特征波形、各线圈接地短路模拟波形以及匝间短路模拟波形,并进行长期跟踪。

## 参考文献

- [1] 徐家擎. 1 000 MW汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的诊断研究[J]. 硅谷, 2014 (18): 76-79.
- [2] 敖观佑. 大型发电机转子绕组RSO试验分析[J]. 建材与装饰, 2017 (18): 245-246.
- [3] DL/T 1525—2016 转子匝间短路故障诊断导则[S].
- [4] 刘辉. 检测发电机转子绕组匝间短路缺陷的RSO试验[J]. 山东电力技术, 2016, 43 (8): 64-67.
- [5] 王庚森. 基于重复脉冲法的汽轮发电机转子匝间短路故障的识别[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [6] 张征平. 大型汽轮发电机转子匝间短路故障在线诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32 (8): 148-151.
- [7] 袁振亚. 检测发电机转子匝间短路的RSO实验技术及其应用分析[J]. 电气技术, 2010 (4): 25-27.
- [8] 刘建峰. 某电厂600 MW汽轮发电机转子匝间短路故障诊断和处理[J]. 湖南电力, 2016, 32 (1): 69-71.
- [9] 李永刚. 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断新判据[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 112-116.

(收稿日期: 2018-06-06) EA