

● 陈化钢 主编

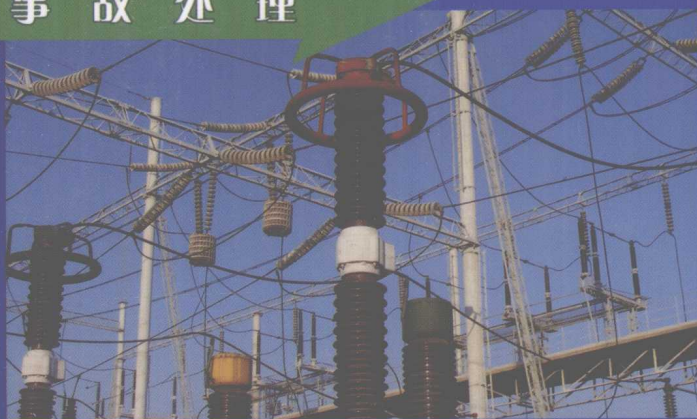
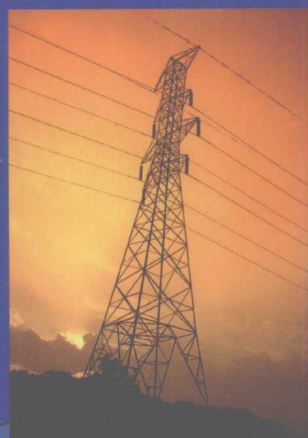
DIANLI SHEBEI YICHANGYUNXING  
JI SHIGU CHULISHOUCE

# 电力设备异常运行 及事故处理手册

◇ 异常运行

◇ 故障诊断

◇ 事故处理



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 电力设备异常运行 及事故处理手册

---

© 陈化钢 主编



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本手册共十二章,主要阐述电力变压器、互感器、避雷器、电力电缆、电力电容器、高压开关设备、高压电动机、发电机等电力设备在运行中出现的异常现象和事故原因,并指出处理方法。手册中还介绍了接地网的安全运行以及架空线路绝缘和变电所外绝缘的事故原因及防止措施,二次回路及其故障处理方法,电力红外诊断技术的应用等。为了满足广大电气运行及检修等方面的技术人员的工作需要,附录中还收录了电力设备异常运行及事故处理相关规程和标准的摘要。

本手册在阐述中列举了较多的实例,异常现象和事故原因及处理方法表格化,内容丰富,突出物理概念,理论联系实际。本手册可供电力系统中的运行、检修、安装、试验及管理等方面的工程技术人员阅读,也可供制造部门、电力用户及大、中专学校有关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力设备异常运行及事故处理手册/陈化钢主编. —北京:中国水利水电出版社, 2009  
ISBN 978-7-5084-6165-6

I. 电… II. 陈… III. 电力装置-电力系统运行-事故分析-技术手册 IV. TM732-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 201231 号

|      |                                                                                                                                                                                                                        |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 电力设备异常运行及事故处理手册                                                                                                                                                                                                        |
| 作 者  | 陈化钢 主编                                                                                                                                                                                                                 |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                                    |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                                                                                                        |
| 印 刷  | 北京市兴怀印刷厂                                                                                                                                                                                                               |
| 规 格  | 184mm×260mm 16 开本 77.75 印张 2747 千字                                                                                                                                                                                     |
| 版 次  | 2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷                                                                                                                                                                                      |
| 印 数  | 0001—5000 册                                                                                                                                                                                                            |
| 定 价  | 197.00 元                                                                                                                                                                                                               |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

电力设备正常运行是发电厂、变电所和电力系统安全、稳定、优质、经济运行的保证。

当前，电力设备在运行中的异常现象时有发生，甚至引发事故，对电网安全运行造成严重威胁。因此，正确分析出现的异常现象和事故并及时处理具有重要意义。本手册就是为适应这一需要而编写的，希望能对现场进行异常现象分析和事故处理有所促进和帮助。

本手册在编写中，是以近些年来发布的国家标准、国家发展和改革委员会和原电力工业部电力行业标准、国家电力公司和国家电网公司标准为依据，结合编者在现场培训和教学中的体会编写的。虽然在编写中查阅了大量的文献、资料，但由于电力设备类型繁多、结构千差万别，引起异常现象及事故的原因也比较复杂，加上编者所掌握资料的局限性，不可能对所有的异常现象和事故都进行很全面的叙述，所以在本手册中仅对电力设备在运行中发生的性质严重、影响较大的异常现象和事故原因进行分析，并根据具体情况指出相应的诊断和处理方法或防止对策。编写时，力求做到突出物理概念、理论联系实际，并能反映现场的新技术、新经验和新动向，供运行、安装、检修和制造部门的工程技术人员参考和借鉴。

本手册共十二章，主要阐述电力变压器、互感器、避雷器、电力电缆、电力电容器、高压开关设备、高压电动机、发电机等电力设备在运行中出现的异常现象和事故原因，并指出处理方法。手册中还介绍了接地网的安全运行以及架空线路绝缘和变电所外绝缘的事故原因及防止措施，二次回路及其故障处理方法，电力红外诊断技术的应用等。为了满足广大电气运行及检修等方面的技术人员的工作需要，附录中还收录了电力设备异常运行及事故处理相关规程和标准的摘要。本手册在阐述中列举了较多的实例，异常现象、事故原因及处理方法表格化，内容丰富，突出物理概念，理论联系实际。本手册可供电力系统中的运行、检修、安装、试验及管理等方面的工程技术人员阅读，也可供制造部门、电力用户及大、中专学校有关专业师生参考。

本手册由陈化钢主编。参加编写的人员有：张开贤、黄书红、程玉兰、应鸿、吴跃华、陈涵林、韩素云、汪永华、彭伟、孔德胜、宫运刚、谈文华、叶常容、汤世平、熊财清、苏津磷、高向前、贾振国。

参加本手册部分编写工作的还有：张强、张方、高水、石峰、王卫东、石威杰、贺和平、任旭印、潘利杰、程宾、张倩、张娜、李俊华、石宝香、成冲、张明星、郭荣立、王峰、李新歌、尹建华、苏跃华、刘海龙、李小方、李爱丽、胡兰、王志玲、李自雄、陈海龙、李亮、韩国民、刘力侨、任翠兰、张洋、吕洋、任华、李翱翔、孙雅欣、李红、王岩、李景、赵振国、任芳、魏红、薛军、吴爽、李勇高、王慧、杜涛涛、李启明、郭会霞、霍胜木、邢烟、李青丽、谢成康、杨虎、马荣花、张贺丽、薛金梅、李荣芳、马良、孙洋洋、胡毫、余小冬、丁爱荣、王文举、冯娇、徐文华、陈东、毛玲、李键、孙运生、尚丽、王敏州、杨国伟、李红、刘红军、白春东、林博、魏健良、周凤春、黄杰、董小玫、郭贞、吕会勤、王爱枝、孙金力、孙建华、孙志红、孙东生、王彬、王惊、李丽丽、吴孟月、闫冬梅、孙金梅、张丹丹、李东利、王奎洵、吕万辉、王忠民、赵建周、刁发良、胡士锋、王桂荣、谢峰、秦喜辰、张继涛、徐信阳、牛志刚、杨景艳、乔可辰、张志秋、史长行、姜东升、宋旭之、田杰、温宁、乔自谦、史乃明、郭春生、高庆东、吉金东、李耀照、吕学彬、马计敏、朱英杰、焦现峰、李立国、刘立强、李炜、郝宗强、王力杰、闫国文、苗存园、权威、蒋松涛、张平、黄锦、田宇鲲、曹宝来、王烈、刘福盈、崔殿启、白侠、陈志伟、李志刚、张柏刚、王志强、史春山、戴晓光、刘德文、隋秋娜等。

本手册在编写中，参考和引用了有关单位和个人公布的现场异常现象和事故实例，统计分析数据和试验研究成果，谨在此向被本手册所引用的参考文献的作者（包括一些在内部刊物上发表论文的作者），表示衷心的感谢。

由于水平所限，不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正，编者将不胜感激。

作者

2009年5月

# 目 录

## 前言

## 第一章 电力变压器..... 1

### 第一节 电力变压器的故障..... 1

#### 一、变压器故障类型..... 1

#### 二、变压器典型故障的演变..... 3

### 第二节 大型电力变压器围屏爬电故障及

#### 处理方法..... 4

#### 一、围屏爬电故障的原因和特点..... 4

#### 二、围屏爬电的发展机理..... 5

#### 三、影响围屏爬电的因素..... 5

#### 四、围屏爬电故障的诊断..... 7

#### 五、预防围屏爬电故障的措施..... 10

### 第三节 大型电力变压器绕组变形及处理

#### 方法..... 10

#### 一、绕组变形的原因..... 11

#### 二、绕组变形的危害..... 12

#### 三、绕组变形的诊断..... 13

#### 四、防止对策..... 17

### 第四节 大型电力变压器渗漏油及处理

#### 方法..... 19

#### 一、变压器渗漏油的原因..... 19

#### 二、变压器渗漏油点的查找..... 21

#### 三、变压器渗漏油的处理措施..... 22

#### 四、制造厂应采取的措施..... 24

### 第五节 电力变压器铁芯多点接地故障及

#### 处理方法..... 25

#### 一、铁芯正常时需要一点接地的原因..... 25

#### 二、铁芯只能一点接地的原因..... 25

#### 三、铁芯正确接地方式..... 25

#### 四、铁芯故障的类型和原因..... 26

#### 五、铁芯多点接地故障的诊断方法..... 26

#### 六、铁芯多点接地故障的处理方法..... 35

#### 七、铁芯可能发生的故障及其处理方法..... 36

### 第六节 气体继电器保护动作原因及处理

#### 方法..... 37

#### 一、动作原因..... 37

#### 二、判断方法..... 40

#### 三、处理方法..... 41

### 第七节 电力变压器进水受潮及处理

#### 方法..... 44

#### 一、变压器进水受潮的原因..... 44

#### 二、变压器进水受潮的危害..... 45

#### 三、变压器进水受潮的诊断..... 46

#### 四、变压器进水受潮的处理方法..... 47

### 第八节 电力变压器绕组直流电阻不平衡率

#### 超标的原因及防止对策..... 51

#### 一、不平衡率的定义及限值..... 51

#### 二、不平衡率超标的原因及其防止措施..... 51

### 第九节 电力变压器油介质损耗因数异常及

#### 处理方法..... 55

#### 一、异常现象..... 55

#### 二、产生异常现象的原因..... 56

#### 三、油介质损耗因数增大的处理方法..... 59

### 第十节 电力变压器过热故障及处理方法..... 59

#### 一、变压器过热的原因..... 59

#### 二、变压器过热性故障的诊断..... 62

#### 三、处理对策..... 64

### 第十一节 大型变压器油流带电现象及处理

#### 方法..... 65

#### 一、油流带电现象..... 65

#### 二、油流带电机理..... 65

#### 三、测量油流带电倾向的方法和仪器..... 66

#### 四、影响油流带电的主要因素..... 67

#### 五、油流带电的抑制方法..... 70

### 第十二节 变压器固体绝缘老化..... 72

#### 一、绝缘纸的老化..... 72

#### 二、绝缘老化诊断..... 72

#### 三、绝缘老化诊断的新动向..... 75

### 第十三节 电力变压器有载分接开关异常

#### 情况及处理方法..... 75

#### 一、有载分接开关的工作原理..... 76

#### 二、故障类型..... 79

#### 三、事故形态..... 79

#### 四、处理方法..... 83

#### 五、实例..... 85

### 第十四节 电力变压器差动保护误动的原因

#### 及处理方法..... 87

#### 一、差动保护误整定..... 87

#### 二、差动保护电流互感器二次接线错误..... 88

#### 三、变压器内部接线错误..... 90

#### 四、差动保护电流回路断线引起误动..... 91

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| 五、自耦变流器升流补偿作用差引起<br>误动 .....                               | 93  |
| 六、差动继电器元件误动引起的差动<br>保护误动 .....                             | 93  |
| 七、电流互感器错误选型导致差动保护<br>误动 .....                              | 94  |
| 八、差动保护所用电流互感器 10%误差<br>曲线不满足实际回路要求引起差动<br>保护误动 .....       | 94  |
| 九、保护屏配线接错引起主变压器差动<br>保护误动 .....                            | 94  |
| 十、主变压器铁芯松动引起差动保护<br>误动 .....                               | 94  |
| 十一、误差累计过大引起差动保护误动 ..                                       | 95  |
| 十二、谐波发生源引起差动保护误动 .....                                     | 95  |
| 第十五节 电力变压器套管电晕放电及<br>处理方法 .....                            | 99  |
| 一、套管表面的电压分布 .....                                          | 99  |
| 二、电晕放电现象 .....                                             | 100 |
| 三、处理方法 .....                                               | 100 |
| 第十六节 大型电力变压器突发性故障及<br>防止措施 .....                           | 100 |
| 一、原因 .....                                                 | 101 |
| 二、防止措施 .....                                               | 101 |
| 第十七节 配电变压器雷击损坏的原因及<br>防雷措施 .....                           | 101 |
| 一、配电变压器防雷接线的特点 .....                                       | 101 |
| 二、雷电波侵入配电变压器的途径 .....                                      | 102 |
| 三、配电变压器中的过电压 .....                                         | 103 |
| 四、配电变压器雷击损坏的其他原因 .....                                     | 105 |
| 五、配电变压器的防雷保护措施 .....                                       | 107 |
| 第十八节 电力变压器着火及处理方法 .....                                    | 116 |
| 一、着火原因 .....                                               | 116 |
| 二、防止措施 .....                                               | 116 |
| 三、扑救方法 .....                                               | 117 |
| 附录 1 电力变压器运行规程<br>(DL/T 572—1995)<br>(摘要) .....            | 117 |
| 附录 2 电力变压器检修导则<br>(DL/T 573—1995)<br>(摘要) .....            | 134 |
| 附录 3 有载分接开关运行维修导则<br>(DL/T 574—1995)<br>(摘要) .....         | 170 |
| 附录 4 预防 110~500kV 变压器事故<br>措施(能源电 [1990] 1083<br>号文) ..... | 245 |

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 第二章 互感器 .....                                 | 249 |
| 第一节 电磁式电压互感器引起的异常现象<br>及其处理方法 .....           | 249 |
| 一、接线错误引起的异常现象 .....                           | 249 |
| 二、电磁式电压互感器励磁特性不同<br>引起的异常现象 .....             | 255 |
| 三、电磁式电压互感器铁芯饱和引起的<br>铁磁谐振现象 .....             | 256 |
| 四、电磁式电压互感器熔丝熔断及烧毁<br>现象 .....                 | 275 |
| 五、虚幻接地现象及虚实接地的判别 .....                        | 277 |
| 六、绝缘监视装置的运行及异常现象 .....                        | 285 |
| 七、小结 .....                                    | 288 |
| 第二节 串级式电压互感器事故原因及预防<br>措施 .....               | 289 |
| 一、事故原因分析 .....                                | 289 |
| 二、诊断方法 .....                                  | 290 |
| 三、预防措施 .....                                  | 290 |
| 第三节 电流互感器事故原因及预防<br>措施 .....                  | 291 |
| 一、事故原因分析 .....                                | 291 |
| 二、诊断方法 .....                                  | 292 |
| 三、预防措施 .....                                  | 294 |
| 第四节 电容式电压互感器故障原因及<br>预防措施 .....               | 295 |
| 一、故障原因分析 .....                                | 295 |
| 二、诊断方法 .....                                  | 298 |
| 三、预防措施 .....                                  | 298 |
| 第五节 互感器油中氢气浓度单项偏高现象<br>及处理方法 .....            | 299 |
| 一、基本规律 .....                                  | 299 |
| 二、油中氢气的来源 .....                               | 300 |
| 三、处理方法 .....                                  | 301 |
| 附录 互感器运行检修导则<br>(DL/T 727—2000)<br>(摘要) ..... | 302 |
| 第三章 避雷器 .....                                 | 334 |
| 第一节 FS 型避雷器爆炸原因及处理<br>方法 .....                | 334 |
| 一、事故情况 .....                                  | 334 |
| 二、抽样试验 .....                                  | 334 |
| 三、避雷器爆炸原因分析 .....                             | 334 |
| 四、处理方法 .....                                  | 335 |
| 第二节 FZ 型避雷器爆炸原因 .....                         | 336 |
| 一、爆炸事故的特点 .....                               | 336 |
| 二、爆炸的原因分析 .....                               | 337 |
| 三、防止避雷器爆炸的对策 .....                            | 338 |

|                                                       |     |                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 四、几种情况的处理                                             | 341 | 二、电缆头的制作方法                                                                | 417 |
| 第三节 FCZ 型磁吹避雷器爆炸原因及防止措施                               | 341 | 三、新作电缆终端头和接头后的试验项目与要求                                                     | 429 |
| 一、事故原因                                                | 341 | 第四节 电缆防火                                                                  | 430 |
| 二、防止对策                                                | 342 | 一、电缆火灾事故原因                                                                | 430 |
| 第四节 金属氧化物避雷器爆炸原因                                      | 344 | 二、电缆的防火措施                                                                 | 431 |
| 一、爆炸事故特点                                              | 344 | 附录 1 电力电缆运行规程 (电力工业部 [79] 电生字 53 号)                                       | 432 |
| 二、爆炸原因分析                                              | 344 | 附录 2 高压电缆选用导则 (DL/T 401—2002)                                             | 450 |
| 三、防止损坏事故的措施                                           | 346 | (摘要)                                                                      | 450 |
| 附录 1 交流电力系统金属氧化物避雷器使用导则 (DL/T 804—2002)               | 349 | 附录 3 额定电压 35kV ( $U_m=40.5\text{kV}$ ) 及以下电力电缆热缩式附件应用技术条件 (DL/T 413—2006) | 456 |
| (摘要)                                                  | 349 | (摘要)                                                                      | 456 |
| 附录 2 交流输电线路用复合外套金属氧化物避雷器 (DL/T 815—2002)              | 363 | 第五章 电力电容器                                                                 | 462 |
| (摘要)                                                  | 363 | 第一节 并联电容器异常现象和故障原因及防止措施                                                   | 462 |
| 附录 3 氧化锌避雷器阻性电流测试仪通用技术条件 (DL/T 987—2005)              | 371 | 一、电容器运行的异常现象及其预防措施                                                        | 462 |
| (摘要)                                                  | 371 | 二、电容器损坏的原因及防止措施                                                           | 484 |
| 附录 4 110(66) kV~750kV 避雷器运行规范 (国家电网生技 [2005] 172 号)   | 375 | 第二节 耦合电容器事故原因及防止措施                                                        | 491 |
| (摘要)                                                  | 375 | 一、事故原因                                                                    | 491 |
| 附录 5 110(66) kV~750kV 避雷器检修规范 (国家电网生技 [2005] 173 号)   | 380 | 二、预防措施                                                                    | 492 |
| (摘要)                                                  | 380 | 附录 1 高压并联电容器使用技术条件 (DL/T 840—2003)                                        | 492 |
| 附录 6 110(66) kV~750kV 避雷器技术监督规定 (国家电网生技 [2005] 174 号) | 384 | (摘要)                                                                      | 492 |
| (摘要)                                                  | 384 | 附录 2 6kV~66kV 并联电容器运行规范 (国家电网生技 [2005] 172 号)                             | 497 |
| 第四章 电力电缆                                              | 394 | (摘要)                                                                      | 497 |
| 第一节 纸绝缘电力电缆故障及防止措施                                    | 394 | 附录 3 6kV~66kV 并联电容器检修规范 (国家电网生技 [2005] 173 号)                             | 502 |
| 一、故障类型                                                | 394 | (摘要)                                                                      | 502 |
| 二、故障原因                                                | 395 | 第六章 高压开关设备                                                                | 509 |
| 三、诊断方法                                                | 396 | 第一节 油断路器的异常现象和事故原因及处理方法                                                   | 509 |
| 四、防止电缆故障的措施                                           | 405 | 一、油断路器事故原因及处理方法                                                           | 509 |
| 第二节 交联聚乙烯电缆事故及防止措施                                    | 408 | 二、DW <sub>8</sub> —35 型多油断路器套管爆炸的原因及处理方法                                  | 513 |
| 一、交联聚乙烯电缆的结构特点                                        | 408 | 三、油断路器的异常现象及处理方法                                                          | 514 |
| 二、事故原因                                                | 408 | 四、预防油断路器事故的技术措施                                                           | 535 |
| 三、诊断方法                                                | 411 | 第二节 SF <sub>6</sub> 断路器故障原因及处理方法                                          | 542 |
| 四、防止故障的对策                                             | 415 | 方法                                                                        | 542 |
| 第三节 电缆头故障及处理方法                                        | 416 | 一、SF <sub>6</sub> 气体中的含水量超标                                               | 542 |
| 一、电缆头常见故障及处理方法                                        | 416 | 二、SF <sub>6</sub> 气体泄漏                                                    | 545 |

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 三、绝缘不良,发生闪络·····                                      | 545 |
| 四、断路器本体内部卡死,某相完全不能动作·····                             | 546 |
| 五、并联电阻故障·····                                         | 546 |
| 六、断路器触头烧损·····                                        | 546 |
| 七、操动机构拒合、拒分和误动·····                                   | 546 |
| 八、无信号自分现象·····                                        | 546 |
| 第三节 SF <sub>6</sub> 全封闭组合电器(GIS)故障原因及处理方法·····        | 547 |
| 一、常见特有故障·····                                         | 548 |
| 二、产生故障的原因分析·····                                      | 549 |
| 三、处理方法·····                                           | 549 |
| 第四节 真空断路器故障原因及处理方法·····                               | 552 |
| 一、真空度不足·····                                          | 552 |
| 二、接触电阻增大·····                                         | 555 |
| 三、操作机构故障·····                                         | 555 |
| 四、拒动现象·····                                           | 556 |
| 五、分闸线圈烧毁·····                                         | 556 |
| 六、合闸弹跳现象·····                                         | 558 |
| 第五节 隔离开关运行中的异常现象及处理方法·····                            | 558 |
| 一、触头发热烧损现象·····                                       | 558 |
| 二、瓷柱电气和机械性能不良·····                                    | 560 |
| 三、锈蚀现象·····                                           | 562 |
| 四、拉合困难·····                                           | 563 |
| 第六节 6~10kV 高压开关柜事故原因及改进措施·····                        | 564 |
| 一、开关柜事故分类·····                                        | 564 |
| 二、开关柜事故原因分析·····                                      | 565 |
| 三、改进措施·····                                           | 567 |
| 附录 1 高压断路器运行规程(电供 [1991] 30 号)·····                   | 569 |
| 附录 2 气体绝缘金属封闭开关设备运行及维护规程(DL/T 603—2006)(摘要)·····      | 578 |
| 附录 3 六氟化硫电气设备运行、试验及检修人员安全防护细则(DL/T 639—1997)(摘要)····· | 588 |
| 附录 4 LW—10 型六氟化硫断路器检修工艺规程(DL/T 739—2000)(摘要)·····     | 591 |
| 附录 5 气体绝缘金属封闭开关设备现场耐压及绝缘试验导则(DL/T 555—2004)(摘要)·····  | 604 |

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| 附录 6 高压开关设备运行规范(国家电网生技 [2005] 172 号)(摘要)·····   | 607 |
| 附录 7 交流高压断路器检修规范(国家电网生技 [2005] 173 号)(摘要)·····  | 617 |
| 附录 8 交流高压隔离开关检修规范(国家电网生技 [2005] 173 号)(摘要)····· | 626 |
| 第七章 高压电动机·····                                  | 630 |
| 第一节 定子故障及处理方法·····                              | 631 |
| 一、故障原因分析·····                                   | 631 |
| 二、定子绕组故障诊断及处理方法·····                            | 632 |
| 三、防止对策·····                                     | 638 |
| 第二节 转子故障及处理方法·····                              | 640 |
| 一、故障的原因分析·····                                  | 640 |
| 二、防止对策·····                                     | 641 |
| 三、转子断条的带电测试·····                                | 644 |
| 四、开展电动机在线监测·····                                | 645 |
| 五、转子断条故障的诊断与处理方法·····                           | 645 |
| 第三节 电动机常见故障及处理方法·····                           | 647 |
| 一、常见故障及处理方法·····                                | 647 |
| 二、绕组绝缘故障及处理方法·····                              | 647 |
| 第四节 电动机的干燥·····                                 | 651 |
| 一、外部干燥法·····                                    | 651 |
| 二、内部干燥法·····                                    | 651 |
| 第八章 发电机·····                                    | 653 |
| 第一节 定子绕组短路故障及防止措施·····                          | 654 |
| 一、定子绕组短路故障原因·····                               | 654 |
| 二、防止定子绕组短路的措施·····                              | 657 |
| 第二节 定子绕组和铁芯常见故障及处理方法·····                       | 661 |
| 一、定子绕组·····                                     | 661 |
| 二、定子铁芯·····                                     | 663 |
| 第三节 转子绕组常见绝缘故障及处理方法·····                        | 664 |
| 一、转子绕组接地故障·····                                 | 664 |
| 二、转子绕组匝间短路故障·····                               | 668 |
| 第四节 发电机常见故障及处理方法·····                           | 669 |
| 一、常见故障及处理方法·····                                | 669 |
| 二、抽转子程序·····                                    | 672 |
| 三、装复程序·····                                     | 673 |
| 第五节 发电机干燥·····                                  | 674 |
| 一、干燥方法·····                                     | 674 |
| 二、注意事项·····                                     | 674 |
| 附录 1 汽轮发电机运行规程(国电发 [1999] 579 号)(摘要)·····       | 675 |

|                                                               |     |                                                                          |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 附录 2 水轮发电机运行规程<br>(DL/T 751—2001)<br>(摘要) .....               | 694 | 附录 1 架空送电线路运行规程<br>(DL/ T 741—2001)<br>(摘要) .....                        | 849 |
| 附录 3 发电企业设备检修导则<br>(DL/T 838—2003)<br>(摘要) .....              | 703 | 附录 2 高压电力设备外绝缘污秽等级<br>(GB/T 5582—1993)<br>(摘要) .....                     | 868 |
| 附录 4 水电站设备检修管理导则<br>(DL/T 1066—2007)<br>(摘要) .....            | 736 | 附录 3 高压交流系统用复合绝缘子人工<br>污秽试验 (DL/ T 859—2004)<br>(摘要) .....               | 870 |
| <b>第九章 接地网的安全运行</b> .....                                     | 758 | 附录 4 标称电压高于 1000V 交流架空<br>线路用复合绝缘子使用导则<br>(DL/ T 864—2004)<br>(摘要) ..... | 877 |
| 第一节 接地网的安全判据 .....                                            | 758 | 附录 5 劣化盘形悬式绝缘子检测规程<br>(DL/ T 626—2005)<br>(摘要) .....                     | 885 |
| 一、安全判据 .....                                                  | 758 | <b>第十一章 二次回路及其故障处理</b> .....                                             | 891 |
| 二、网格电压的计算 .....                                               | 759 | 第一节 二次回路运行 .....                                                         | 891 |
| 三、均压措施 .....                                                  | 760 | 一、综合检查 .....                                                             | 891 |
| 第二节 接地线与导体截面的选择 .....                                         | 763 | 二、交接班检查 .....                                                            | 891 |
| 一、基本思路 .....                                                  | 763 | 三、值班中检查 .....                                                            | 891 |
| 二、按热稳定选择接地线及导体的<br>截面 .....                                   | 763 | 第二节 二次回路运行异常及故障处理 .....                                                  | 893 |
| 第三节 接地网的腐蚀与防腐措施 .....                                         | 765 | 一、异常运行 .....                                                             | 893 |
| 一、接地网腐蚀的主要部位 .....                                            | 765 | 二、故障处理 .....                                                             | 894 |
| 二、接地网的腐蚀机理 .....                                              | 766 | 附录 1 继电保护和电网安全<br>自动装置检验规程<br>(DL/T 995—2006)<br>(摘要) .....              | 899 |
| 三、影响接地网腐蚀的因素 .....                                            | 767 | 附录 2 3kV~110kV 电网继电保护<br>装置运行整定规程<br>(DL/T 584—2007)<br>(摘要) .....       | 918 |
| 四、防止接地网腐蚀的措施 .....                                            | 769 | 附录 3 微机继电保护装置<br>运行管理规程<br>(DL/T 587—1996)<br>(摘要) .....                 | 944 |
| 第四节 接地降阻剂 .....                                               | 770 | 附录 4 继电保护和安全自动<br>装置技术规程<br>(GB/T 14285—2006)<br>(摘要) .....              | 950 |
| 一、降阻剂降阻的机理 .....                                              | 770 | 附录 5 电气装置安装工程 盘、柜及<br>二次回路结线施工及验收规范<br>(GB 50171—1992) .....             | 980 |
| 二、降阻剂的类型 .....                                                | 771 | <b>第十二章 电力红外诊断技术的应用</b> .....                                            | 984 |
| 三、降阻剂的选择与使用 .....                                             | 771 | 第一节 电力红外诊断技术概况 .....                                                     | 984 |
| 四、需要进一步研究的问题 .....                                            | 772 | 一、电力红外诊断技术与维修方式的<br>转变 .....                                             | 984 |
| 附录 1 电气装置安装工程接地装置<br>施工及验收规范<br>(GB 50169—2006)<br>(摘要) ..... | 772 |                                                                          |     |
| 附录 2 接地装置运行维护规程<br>(Q/CSG 10703—2007)<br>(摘要) .....           | 780 |                                                                          |     |
| 附录 3 交流电气装置的接地<br>(DL/T 621—1997)<br>(摘要) .....               | 788 |                                                                          |     |
| <b>第十章 架空线路绝缘和变电所外绝缘</b> .....                                | 803 |                                                                          |     |
| 第一节 瓷绝缘子 .....                                                | 803 |                                                                          |     |
| 一、绝缘子劣化 .....                                                 | 803 |                                                                          |     |
| 二、绝缘子污闪 .....                                                 | 813 |                                                                          |     |
| 三、雷击跳闸 .....                                                  | 842 |                                                                          |     |
| 第二节 合成绝缘子 .....                                               | 844 |                                                                          |     |
| 一、合成绝缘子结构 .....                                               | 844 |                                                                          |     |
| 二、合成绝缘子事故 .....                                               | 845 |                                                                          |     |

|                                  |     |                             |      |
|----------------------------------|-----|-----------------------------|------|
| 二、红外技术特别适用于电力设备故障诊断.....         | 984 | 第五节 国内电力红外诊断技术应用            |      |
| 三、电力红外诊断技术应用概况.....              | 985 | 百例 .....                    | 1002 |
| 四、国外电力红外诊断技术应用实况.....            | 986 | 附录 带电设备红外诊断应用规范             |      |
| 第二节 红外基础知识及红外测温.....             | 987 | (DL/T 664—2008)             |      |
| 一、红外波谱.....                      | 987 | (摘要) .....                  | 1013 |
| 二、红外基本术语.....                    | 987 | 附录一 电力设备预防性试验规程             |      |
| 三、红外辐射特性.....                    | 987 | (DL/T 596—1996) (摘要) .....  | 1031 |
| 四、红外测温 and 辐射系数 $\epsilon$ ..... | 990 | 附录二 输变电设备状态检修试验规程           |      |
| 第三节 红外检测仪器及检测基本方法.....           | 992 | (Q/GDW 168—2008) (摘要) ..... | 1093 |
| 一、红外检测仪器.....                    | 992 | 附录三 农村低压电力技术规程              |      |
| 二、红外检测基本方法.....                  | 996 | (DL/T 499—2001) (摘要) .....  | 1134 |
| 三、红外检测须知.....                    | 996 | 附录四 现场绝缘试验实施导则              |      |
| 四、电力设备红外检测方法.....                | 997 | (DL/T 474.1~474.5—2006)     |      |
| 第四节 电力设备故障的红外诊断技术                |     | (摘要) .....                  | 1169 |
| 原理及方法.....                       | 997 | 附录五 750kV 电气设备预防性试验规程       |      |
| 一、电力设备故障的红外诊断基本                  |     | (Q/GDW 158—2007) (摘要) ..... | 1202 |
| 原理.....                          | 997 | 参考文献 .....                  | 1226 |
| 二、电力红外诊断方法.....                  | 998 |                             |      |

# 第一章 电力变压器

## 第一节 电力变压器的故障

大型电力变压器是电网传输电能的枢纽，是电网运行的主设备，其安全可靠性是保障电力系统可靠运行的必备条件，随着电力系统规模和变压器单台容量的不断增大，其故障对国民经济造成的损失也愈来愈大，因此，研究其故障类型、原因及处理方法是必要的。

### 一、变压器故障类型

变压器故障的类型是多种多样的，可按不同的方法进行分类。

#### (一) 按变压器本体分类

按变压器本体可分为内部故障和外部故障，即

把油箱内发生的各相绕组间的相间短路、绕组的匝间短路、绕组或引线与箱体接地等称为内部故障，而油箱外部发生的套管闪络、引出线间的相间短路等故障称为外部短路。

#### (二) 按故障部位分类

为便于事故分析统计，变压器故障通常按故障部位分类，它可分为绕组故障、铁芯故障、分接开关故障、引线故障、绝缘故障和密封故障等。

统计资料表明，1990～2000年，110kV及以上电压等级电力变压器的故障按部位分类统计结果如表1-1所示。

#### (三) 按故障回路分类

为分析方便，有时也按故障回路分类，它可分为电路故障、磁路故障、油路故障。

表 1-1 故障按部位分类统计表

| 故障部位   | 绕组   | 铁芯   | 分接开关 | 引线  | 套管  | 绝缘 | 密封  | 其他 | 总计  |
|--------|------|------|------|-----|-----|----|-----|----|-----|
| 故障次数   | 112  | 65   | 37   | 25  | 29  | 15 | 7   | 9  | 299 |
| 百分比(%) | 37.5 | 21.7 | 12.4 | 8.4 | 9.7 | 5  | 2.3 | 3  | 100 |

#### (四) 按故障原因分类

对变压器故障的原因，基本上可以做如下分类：

- (1) 制造：制造工艺不良、设计不合理、材料质量不良、异物进入、杂质。
- (2) 维护：维护不当、受潮、操作失误、振动。
- (3) 环境：外部短路、雷电侵袭、自然损坏。
- (4) 其他。

对上述299次变压器故障按故障原因来分类，其统计结果如表1-2所示。

表 1-2 变压器故障按原因分布

| 故障原因   | 制造   | 维护   | 环境   | 其他 | 合计  |
|--------|------|------|------|----|-----|
| 故障次数   | 16.2 | 72   | 50   | 15 | 229 |
| 百分比(%) | 54.2 | 24.1 | 16.7 | 5  | 100 |

由统计数字可以看出，变压器产品质量不良是变压器故障的最主要原因，因而必须加强对变压器出厂、安装及检修验收，严格把关。其次，运行维护不当也是变压器故障的一个重要原因，要努力提

高运行人员的专业水平，以便有效地减小故障率。

#### (五) 按故障严酷程度分类

根据变压器故障程度不同，对不同故障模式进行严酷程度分类如下：

- (1) I类灾难性：变压器爆炸或完全损坏。如变压器爆炸、绕组烧毁、铁芯烧毁等。
- (2) II类致命性：变压器性能严重下降或严重受损，必须立即停运。如变压器绕组断路、短路、绕组相间短路、引线的相间短路、套管爆炸、分接开关筒体爆炸。
- (3) III类临界性：变压器性能轻度下降或轻度受损。如变压器铁芯接地不良、引线接触不良、套管内部局部放电和局部过热、变压器绕组松动变形和位移、引线对地短路等，铁芯多点接地或片间短路，套管位移或开焊、分接开关挡序错乱等。
- (4) IV类轻度性：不甚影响变压器运行但要进行非计划检修。如介质损耗因数超标，绝缘受伤、变压器渗漏油、铁芯动态性接地等。

上述变压器故障按不同严酷程度的分布如表1-3所示。

表 1-3 变压器故障按严酷程度分布

| 故障严酷程度  | 灾难性 | 致命性  | 临界性  | 轻度性  | 合计  |
|---------|-----|------|------|------|-----|
| 故障次数    | 11  | 96   | 140  | 52   | 299 |
| 百分比 (%) | 3.7 | 32.1 | 46.8 | 17.4 | 100 |

从故障严酷程度的统计可以看出，变压器故障以临界性故障出现最多，灾难性故障出现率最低但危害程度最大，致命性故障出现率较高，轻度性故障率不高；严酷程度低的故障进一步发展可能逐级或越级成为严酷度高的故障，因而在变压器运行维护时要坚决杜绝Ⅰ类故障、加强防范Ⅱ类故障，密切注意Ⅲ类故障，时刻提防Ⅳ类故障。对于轻度性故障也不可掉以轻心，若不及时处理，故障将会扩大，如变压器渗漏，长期下去，一旦变压器缺油，绕组露出油面，将会导致相间短路，甚至变压器烧毁；又如密封不严会使变压器绝缘性能下降，可能诱发绕组短路、铁芯多点接地等故障。

(六) 按故障发生的过程分类

按变压器故障发生的过程分类如下：

表 1-4 运行条件引起的变压器故障

| 运行条件 | 条件特性                      | 原 因                                               | 引 起 的 故 障                                                                         |
|------|---------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 负载条件 | 工作过程特性                    | 经常过载；<br>停运时间过长；<br>操作过电压或雷电过电压；<br>系统近区短路        | 绕组过热、绝缘老化、分接烧损；<br>绝缘受潮；<br>主绝缘、纵绝缘损伤或击穿；<br>绕组变形、绝缘损伤、绕组及分接开关过热烧损                |
| 环境条件 | 工作现场特点<br>地理、气象特点<br>污染情况 | 高温；<br>低温；<br>有害气体；<br>高湿度；<br>海拔>1000m；<br>污秽、粉尘 | 过热、绝缘老化；<br>外绝缘及橡胶垫圈劣化；<br>结构件、外绝缘腐蚀；<br>绝缘受潮、击穿；<br>允许温升降低；<br>套管表面绝缘电阻降低，漏泄电流增加 |

表 1-5 2000 年和 2001 年全国 330kV、500kV 变压器事故和障碍的情况分类表

|               |               |                        |                   |                           |                                                                                 |
|---------------|---------------|------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 总数<br>42<br>台 | 事故<br>22<br>台 | 线圈<br>绝缘<br>损坏<br>14 台 | 外部短路时损坏 2 台       | 变压器线圈动热稳定性能差造成事故 2 台      | 阿兰变#1 主变（沈变厂）330kV<br>江门变#1 主变 B 相（三菱）500kV                                     |
|               |               |                        | 过电压下绝缘击穿 1 台      | GIS 操作过电压引起击穿 1 台         | 北仑电厂#1 联变（法国 SCHNEIDER）500kV                                                    |
|               |               |                        | 在正常运行电压下绝缘击穿 11 台 | 结构设计不合理引发事故 3 台           | 张家口发电厂联变（沈变厂）500kV<br>侯村变#1 主变 A 相（沈变厂）500kV<br>天荒坪抽水蓄能电厂#1 主变（英国 PEEBLES）500kV |
|               |               |                        |                   |                           | 陈家桥变#1 主变（日本东芝）500kV                                                            |
|               |               |                        |                   |                           | 黄渡变#3 主变 A、B、C 相（日本三菱）500kV                                                     |
|               |               |                        |                   | 乙炔超标做局部放电试验发现变压器内部有放电 5 台 | 渭南高明变#1 主变（西变厂）330kV                                                            |
|               |               |                        |                   |                           |                                                                                 |
|               |               |                        |                   |                           |                                                                                 |
|               |               |                        |                   |                           |                                                                                 |

1. 突发性事故

(1) 由雷电过电压和内部过电压引起的绝缘击穿。

(2) 外部短路事故引起绕组变形、层间短路。

(3) 地震、火灾、水灾等自然灾害引起变压器损坏。

(4) 辅机的电源停电，如冷却装置、油循环装置电源停电等。

2. 累积效应形成的故障

(1) 铁芯的绝缘不良，铁芯叠片之间绝缘不良，铁芯穿芯螺栓的绝缘不良。

(2) 外界反复短路引起绕组变形。

(3) 由于吸潮、游离引起局部放电导致绝缘材料老化、绝缘油老化。

(4) 由于恶劣的环境和苛刻的运行条件，以及长期超过技术规定所允许的范围运行导致故障。不同运行条件导致的各种故障如表 1-4 所示。

表 1-5 列出了国家电力公司发电运运营部发布的 2000 年和 2001 年全国 330kV、500kV 变压器事故和障碍的情况分类情况。

续表

|           |           |                            |                        |                              |                                 |
|-----------|-----------|----------------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 总数<br>42台 | 事故<br>22台 | 线圈绝缘损坏<br>14台              | 在正常运行电压下绝缘击穿 11台       | 没有其他外部原因，明确归结为制造质量不良 3台      | 沙角 C 厂#2 主变（英国 GECALSTHOM）500kV |
|           |           |                            |                        |                              | 张家口发电厂#8 主变（沈变厂）500kV           |
|           |           |                            |                        |                              | 大亚湾核电站#1 主变 C 相（英国 GEC）500kV    |
|           |           | 套管质量不良<br>7台               | 在正常运行电压下套管爆炸和损坏<br>5台  | 南关岭变 B 相主变（意大利 ABB）500kV     |                                 |
|           |           |                            |                        | 沙角 C 厂#2 主变（沈变厂）500kV        |                                 |
|           |           |                            |                        | 葛洲坝换流站极 I A 相变（瑞士 ABB）500kV  |                                 |
|           |           |                            |                        | 草铺变#1 主变 C 相（西变厂）500kV       |                                 |
|           |           |                            |                        | 商洛柞水变#1 主变（西变厂）330kV         |                                 |
|           |           |                            | 套管结构设计不合理 1台           | 鞍山王石变 C 相主变（沈厂）500kV         |                                 |
|           |           |                            | 套管端部引线烧熔 1台            | 大亚湾核电站#1 主变 C 相（英国 GEC）500kV |                                 |
|           |           | 分接开关机械强度不够引起损坏 1台          |                        | 草铺变#2 主变 B 相（意大利 ABB）500kV   |                                 |
|           | 故障<br>20台 | 事故跳闸变压器内部无损伤<br>11台        | 保护误动或误整定 3台            | 辽阳变#1 主变 A 相（西变厂）500kV       |                                 |
|           |           |                            |                        | 侯村变#1 主变 C 相（沈变厂）500kV       |                                 |
|           |           |                            |                        | 南昌变#1 主变（保变厂）500kV           |                                 |
|           |           |                            | 误操作或施工不良 3台            | 廉州变#2 主变（保变厂）500kV           |                                 |
|           |           |                            |                        | 丰镇发电厂联变（保变厂）500kV            |                                 |
|           |           |                            |                        | 渭南桥陵变#1 主变（西变厂）330kV         |                                 |
|           |           |                            | 压力释放回路接点盒受潮造成短路 2台     | 成都龙王站#2 主变（日本东芝）500kV        |                                 |
|           |           |                            |                        | 济南变#1 主变（日本三菱）500kV          |                                 |
|           |           |                            | 操作过电压引起 1台             | 铜川桃曲变#1 主变（西变厂）330kV         |                                 |
|           |           | 套管比距不足发生雨闪 1台              | 董家变#1 主变 A 相（沈变厂）500kV |                              |                                 |
|           |           | 飞鸟短路引起 1台                  | 漫湾发电厂 7B 联变（沈变厂）500kV  |                              |                                 |
|           |           | 运行中出现异常，未跳闸，但需停运检修恢复<br>9台 | 色谱超标 6台                | 白银景泰石城变#3 主变（保变厂）330kV       |                                 |
|           |           |                            |                        | 辽阳变#1 主变 A 相（西变厂）500kV       |                                 |
|           |           |                            |                        | 董家变#1 主变 C 相（沈变厂）500kV       |                                 |
|           |           |                            |                        | 张家口发电厂#2 主变（沈变厂）500kV        |                                 |
|           |           |                            |                        | 罗洞站#3 主变 B 相（ABB）500kV       |                                 |
|           |           |                            |                        | 南桥站#1 主变（日本三菱）500kV          |                                 |
|           |           |                            | 冷却装置保护故障 1台            | 张家口发电厂#4 主变（保变厂）500kV        |                                 |
|           |           |                            | 检修工艺不良 1台              | 安康水电厂#4 主变（西变厂）330kV         |                                 |
|           |           |                            | 套管下瓷套金属垫圈有裂纹 1台        | 惠州站#2 主变 B 相（ABB）500kV       |                                 |

注 凡设备由检查试验确定为有缺陷尚能运行但需安排检修消缺的，或者虽然在系统中设备本身的原因引起跳闸，但不需修理即能重新投入运行的，均统计为障碍。

二、变压器典型故障的演变

由上述，变压器典型故障与其设计思想、制造工艺、电压等级和运行环境密切相关，由于不同历史时期设计的变压器结构不同，导致变压器典型故障的类型也不同。主要表现如下。

1. 匝间短路事故

20 世纪 70 年代，变压器电压等级提高，其高压绕组结构由连续式改为纠结式，相邻匝间的工作场强由原来的 200～300V/mm 升高到 2000～3000V/mm，开始时的设计仍采用较薄的绝缘结

构,加之铝导线制造质量不佳,导致在正常运行条件下常发生匝间短路事故。1978年原机电部规定220kV电压等变压器的匝绝缘由0.95~1.35mm提高到1.95mm,从而使匝间短路事故大幅度降低。

### 2. 引线应力锥受潮引发事故

20世纪80年代初,由于变压器套管的“将军帽”密封结构不合理,沿穿缆引线进水,使引线应力锥受潮,进而波及到首端线段绝缘,常导致击穿事故。后来制造厂改进了“将军帽”的结构,基本杜绝了这类事故的发生。

### 3. 围屏放电事故

20世纪70年代末至80年代,长垫块引起的围屏放电事故逐渐增加。后来经分析研究,产生这种事故的根本原因是220kV首端支撑围屏纸板的长垫块处电场过于集中。

### 4. 油流带电引发事故

20世纪90年代初,500kV变压器因油流带电引发的事故逐渐增加,据1996年资料统计,在国产500kV电力变压器事故中有58.3%与油流静电有关。

### 5. 抗短路能力不足引起的事故

近年来,系统短路冲击强度随系统容量的增大而不断增强,甚至达到设备难以承受的程度,因此,变压器抗短路能力不足就成为突出的问题。

本章将对某些典型故障的原因进行分析,并指出处理方法。

## 第二节 大型电力变压器围屏爬电故障及处理方法

大型电力变压器的主绝缘主要采用油—屏障(围屏)绝缘。

近些年来,国内220kV电力变压器的围屏爬电故障时有发生。这种放电故障起始于电力变压器相间距离方向上绕组与首端或中部长垫块接触处的油隙中,局部放电一旦造成匝绝缘损伤,放电将向围屏纸板发展,并在纸板表面蔓延形成树枝状碳化放电通道,最终导致匝绝缘击穿或相间短路。因此,这种树枝状放电故障又称为围屏爬电故障。统计资料表明,电力变压器树枝状放电故障给国民经济造成的损失十分严重。例如,某电厂一台220kV、260MVA的主变压器发生围屏爬电故障造成少发电70000MW·h,超过了一台12MW发电机全年发电量(按5000h计)。仅电费损失一项即达350万元[按0.07元/(kW·h)计],而相应的社会产值损失尚未包括在内。因此,电力变压器围屏爬电故障引起了运行部门和制造厂家的极大关注,对电力变压器围屏爬电故障的起因、诊断及预

防措施的研究已成为电力生产中的一个重要课题。

### 一、围屏爬电故障的原因和特点

220kV电力变压器相间线圈表面距离略大于120mm,每相有3层围屏纸板,即相间共有6层纸板。内层围屏靠高出线圈表面的辐射状长垫块支撑,使线圈与围屏保持30mm间隙。安全气道和吸湿器都布置在C相上。

研究表明,220kV电力变压器发生围屏爬电故障的主要原因有:

(1) 垫块尖角场强畸变。支撑围屏的长垫块以及有些撑条和线段间的垫块边棱角很锋利,并处于较高电场之中,特别是长垫块处电场非常集中,局部放电首先在首端线段支撑围屏的长垫块处发生,并沿长垫块向内(相邻匝)和向外(相间)发展,这就是导致相邻匝间短路和沿围屏纸板发生树枝状放电的根本原因。现场在对多次故障的实际观察中确实见到了尖角处烧伤和其相接触的围屏纸板被烧出洞的情形。分析表明,这种故障既可以发生在BC相间,也可以发生在AB相间。

(2) 围屏纸板存在缺陷。围屏纸板有质量差、含杂质、表面不光滑和纸板层间浸油不透、有气隙、弯曲变形等缺陷存在,在固体绝缘上会引起局部电场强度升高和电气绝缘强度降低,使得在某些条件下,在运行中发生局部放电,甚至火花放电。

(3) 绝缘受潮。绝缘受潮是绝缘介质品质和性能劣化的一个主要因素。绝缘受潮与围屏爬电必然存在一定的内在联系。特别是在某些固有绝缘缺陷情况下,绝缘再受潮,就很容易引起放电或击穿。

分析表明,电力变压器围屏爬电故障的特点如下:

(1) 故障大多发生在C相相间最短距离方向上,放电沿长垫块向围屏发展。垫块尖角及围屏与垫块接触处损伤严重,围屏纸板外表面及层间出现大量树枝状放电痕迹,放电形态如图1-1和图1-2所示。

(2) 故障相下铁轭有锈斑,围屏表面有凝结水痕迹,油箱底部有凝结水。

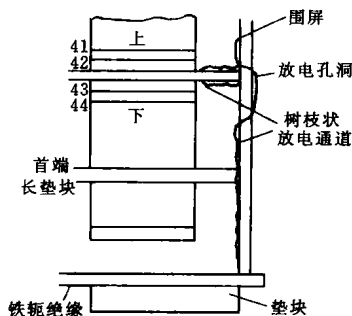


图 1-1 树枝状放电路径

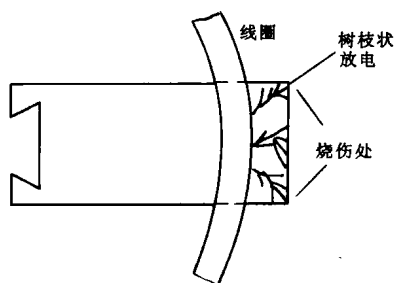


图 1-2 垫块受损状态

(3) 在围屏爬电故障爆发时，大多数情况是轻瓦斯保护动作。有的故障变压器轻、重瓦斯保护和差动保护都动作，甚至出现防爆器爆破喷油、箱壳严重变形，加强筋开裂，油箱沿螺钉拉（切）断，油箱中的油大量外泄。

(4) 在围屏爬电故障爆发前，绝大多数变压器气相色谱分析有先兆反应。

## 二、围屏爬电的发展机理

图 1-3 给出某台 SWDS—180000/220 型围屏爬电途径示意图。

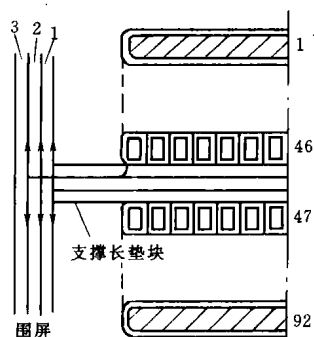


图 1-3 围屏爬电途径示意图

1、2、3—围屏数

这是一台典型的围屏爬电变压器，由图可见，其爬电途径是：导线与相间最短距离的首端支撑长垫块间小油隙放电→长垫块沿表面、夹层树枝状爬电→围屏纸板向上、下铁轭树枝状爬电。

为了得到纸板（长垫块或围屏）树枝状爬电机理，有人选用图 1-4 所示的试验接线进行模拟。通过有机玻璃容器，可以直接观察到纸板沿面树枝状爬电的发展过程。它可分为三个阶段描述：

(1) 电晕放电阶段。纸板表面油的电离和汽化，造成绝缘纸板的局部损伤。表现在沿面的流柱侵蚀和垂直方向的穿孔。流柱向表面延伸时，伴随着纸板分解气体，有白烟产生，使纸板发白，随之就出现了碳化痕迹。

(2) 沿面爬电阶段。纸板碳化后，碳化末端有

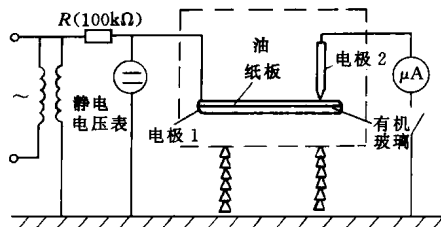


图 1-4 选用的试验接线

（虚线框内为有机玻璃容器，其中盛满油）

较大场强，强电场的场致发射的小亮点向前推进，大量电荷由碳化起始处，通过树枝状碳化通道送到末端，使放电继续向前爬行发展。

(3) 电弧放电阶段。当爬电发展到极间距离的 80% 左右时，两极之间发生弧光闪络，此时纸板绝缘性能完全损坏。在变压器中，若围屏纸板树枝状爬电到一定距离，引起相对地电弧闪络，即形成了变压器事故。

## 三、影响围屏爬电的因素

### 1. 水分的影响

在保持绝缘油品质不变（耐电强度大于 30kV/2.5mm）的情况下，有人研究了纸板含水量与油—纸交界面沿面放电特性的关系。

如图 1-5 所示，将长度为  $29.5 \pm 0.01\text{mm}$  的纸板垫块夹在平行板电极之间。整个电极系统安装在密封电极容室中进行真空浸油处理，然后进行试验研究。

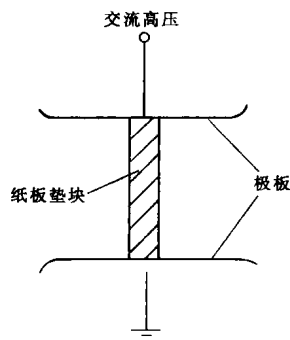


图 1-5 试验电极系统

不同含水量的纸板垫块在交流电压作用下的局部放电特性如图 1-6 所示，纸板含水量越高，局部放电起始电压越低；放电量随试验电压增加的速度就越快。电压再升高，垫块与电极间薄层油隙中的局部放电发展成沿面闪络。

沿面闪络强度与纸板含水量之间的关系如图 1-7 所示。纸板含水量超过 3% 时，沿面闪络强度急剧下降。发生几次沿面闪络后，在纸板表面出现黑色碳化放电痕迹。在纸板含水量超过 5% 时，放

电趋向于在纸板层间发生，造成纸板表面起泡，层间出现黑色碳化放电痕迹，此时击穿强度与外表面状态无关。试验中观察到的纸板垫块损伤情况与故障变压器中支撑围屏长垫块的受损情况极为相似。

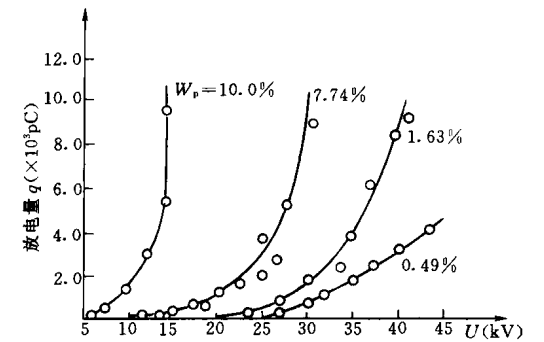


图 1-6 局部放电特性

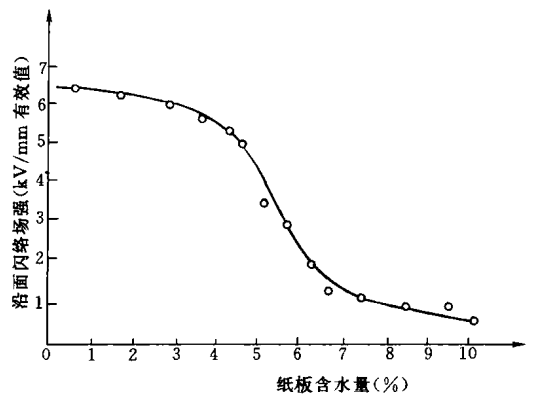


图 1-7 沿面闪络强度与纸板含水量的关系

由数值计算法得到线圈表面的最大场强为 4.0kV/mm。由图 1-7 可知，纸板含水量超过 5% (相当于空气中自然受潮水平)，沿面闪络强度就低于线圈表面场强，必然导致沿长垫块表面的放电。

根据试验结果推断，如果变压器的绝缘受潮严重，线圈与长垫块接触处极易发生局部放电，局部

放电如果发展成沿垫块表面的滑闪放电而向围屏发展，必然导致围屏爬电。

220kV 电力变压器安全气道和吸湿器均布置在 C 相，这些部件不易达到全密封，水分可能在变压器“呼吸”过程中进入变压器。变压器油的循环以 B 相为分界各自进行，因此 C 相绝缘最易受潮，很可能这是 C 相故障较多的原因。在多起围屏爬电故障中发现下铁轭有锈斑，油箱底有凝结水。

根据试验结果，并结合故障情况分析，可以推断变压器绝缘受潮是导致围屏爬电故障的主要原因。为避免围屏爬电，必须严格控制绝缘中的含水量。在《电力设备预防性试验规程》(DL/T596—1966) (以下简称《规程》) 中规定的油和绝缘纸(板)的含水量如表 1-6 和表 1-7 所示。

表 1-6 变压器油中含水量 (mg/L)

| 电压等级 (kV) | 投入运行前的油 | 运行中的油 |
|-----------|---------|-------|
| 66~110    | ≤20     | ≤35   |
| 220       | ≤15     | ≤25   |
| 330~500   | ≤10     | ≤15   |

注 尽量在顶层油温高于 50℃ 时采样，按 GB7600 或 GB7601 进行试验。

表 1-7 绝缘纸(板)含水量不大于的数值 (%)

| 电压等级 (kV) | 含水量 |
|-----------|-----|
| 500       | 1   |
| 330       | 2   |
| 220       | 3   |

有资料认为，从控制围屏爬电角度考虑，运行中的 220kV 电力变压器纸中含水量不宜超过 1.5%。

2. 纸板质量的影响

表 1-8 列出了四种规格纸板的技术参数及其耐沿面爬电时间。

表 1-8 纸板的技术参数及其耐沿面爬电时间

| 纸种 | 厚度 (mm) | 紧度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 实测灰分含量 (%) | 导电率 (μΩ/mm) | 耐沿面爬电时间 (min) |     | 型 号 |
|----|---------|-------------------------|------------|-------------|---------------|-----|-----|
|    |         |                         |            |             | 最 小           | 平 均 |     |
| 1  | 1.54    | 0.963                   | 0.79       | 73          | 11            | 19  | 旧 型 |
| 2  | 1.13    | 1.053                   | 0.40       | 20          | 20            | 34  | 进 口 |
| 3  | 2.17    | 1.048                   | 0.39       | 29          | 20            | 36  | 进 口 |
| 4  | 2.07    | 1.129                   | 0.76       | 61          | 14            | 31  | 新 型 |

注 耐沿面爬电时间是试样放入油中 5min 后，施加工频电压 (2kV/s 速度上升) 平稳升到试验电压 (60±1kV) 开始，到电极间树枝状放电完全闪络为止的秒表记录时间。