

# 电工高新技术丛书

中国电工技术学会 编

- 电气设备状态监测与故障诊断技术
- 柔性交流输电技术
- 电磁兼容
- 硅橡胶与电力系统外绝缘

第5分册



机械工业出版社  
China Machine Press

# 电工高新技术丛书

## 第5分册

- 电气设备状态监测与故障诊断技术
- 柔性交流输电技术
- 电磁兼容
- 硅橡胶与电力系统外绝缘

中国电工技术学会 编



机械工业出版社

电工高新技术丛书共六个分册，本书为第5分册。本分册共分四个专题，其技术内容包括电气设备状态监测与故障诊断技术、柔性交流输电技术、电磁兼容、硅橡胶与电力系统外绝缘。

随着高新技术对传统的电工技术的渗透，电工技术的更新和创造日新月异，读者可从这套书中开阔视野、增长才智、启迪借鉴，并从中汲取营养，以促进事业的发展 and 再创造。

本丛书是一套普及高新技术的读物，其内容新颖，文字深入浅出，适于中级以上的工程技术人员、国家公务员、企事业单位技术管理人员及工科院校的师生阅读和参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电工高新技术丛书/中国电工技术学会编. —北京: 机械工业出版社, 2000.3

ISBN 7-111-07898-5

I. 电… II. 中… III. 电工技术: 高技术—丛书  
IV. TM-51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 03631 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 周娟 刘思源 版式设计: 冉晓华

责任校对: 程俊巧 封面设计: 姚毅 责任印制: 何全君

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 1 月第 1 版·第 2 次印刷

787mm×1092mm<sup>1/32</sup>·12.75 印张·273 千字

2 001—3 500 册

定价: 23.00 元 (全套 6 册, 共 108.00 元)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

## 《电工高新技术丛书》编辑委员会名单

主 任：赵明生

常务副主任：张林昌

副 主 任：赖 坚 严陆光 姚福生 石定寰

周鹤良 冯冠平 陈瑞藻

委 员：汪 耕 梁维燕 万遇良 吴维韩

王赞基 林良真 陈伯时 吴济钧

罗命钧 李方训 胡必权

主 编：张林昌

副 主 编：万遇良 吴维韩 李方训 满慧文

编辑部主任：王玉洁

编辑部副主任：王琳

# 前 言

人类历史的发展证明，科学精神、科学思想和科学方法在物质文明和精神文明建设中发挥着先导和支柱的作用。中国电工技术学会受科学技术部高新技术发展及产业化司委托，组织编写《电工高新技术丛书》，以下简称《丛书》。我会一贯具有面向人民群众宣传普及科学知识的光荣传统，最近几年来，我们以《中共中央、国务院关于加强科学普及工作的若干意见》为指导思想，经过各方面专家、教授的努力，着手编辑出版《电工高新技术丛书》（以下简称《丛书》），面向各级领导干部、技术人员普及科学知识，弘扬科学精神，提倡科学态度，传播科学思想。

本套《丛书》分为六册，内容包括新能源发电技术、超导技术、智能控制技术、电气设备状态监测技术、电力电子技术、电动车技术等，每个分册约25万字，由若干个相近专题组成，内容新颖，通俗易懂，文字精炼，引人入胜。《丛书》的定位为高科技科普读物，包括新理论、新产品、新方法、新技术、新工艺、新材料，主要涉及国际上技术已经成熟，且国内尚未完全掌握或属于世界电工技术的前沿课题，这样，保证了《丛书》普及高新技术的特点。

《丛书》的出版，对宣传电工技术最新发展动态，对加强技术创新，发展高科技，推动生产力跨越式发展，具有十分重要的现实意义和深远影响。《丛书》的出版，为国家公务员、科技人员提供一个了解当今世界先进电工技术的窗

口，使读者开拓视野、增长才智，起到启迪借鉴、触类旁通的作用。

《丛书》的出版，在列选题、写作及编辑过程中得到了清华大学、北京邮电大学、北方交通大学、中国科学院电工研究所、天津电源研究所和文章作者的支持，在《丛书》出版之际，谨向支持的部门、单位和作者致以深切的谢意。

由于时间所限，还有其他一些电工高新技术没有编入本丛书，编写中也难免会出现某些差错，欢迎读者给予批评指正。

中国电工技术学会

2000年3月

# 目 录

## 前言

## I 电气设备状态监测与故障诊断技术

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 概论 .....             | 3  |
| 1.1 状态监测与故障诊断技术的含义 .....   | 3  |
| 1.2 状态监测与故障诊断技术的意义 .....   | 4  |
| 1.3 状态监测与故障诊断技术的发展概况 ..... | 6  |
| 第 2 章 监测与诊断系统的组成 .....     | 8  |
| 2.1 概述 .....               | 8  |
| 2.1.1 系统的功能与组成 .....       | 8  |
| 2.1.2 系统分类 .....           | 8  |
| 2.2 信号检出单元 .....           | 9  |
| 2.2.1 传感器的一般性能要求 .....     | 9  |
| 2.2.2 常用传感器 .....          | 10 |
| 2.2.3 罗戈夫斯基线圈型电流传感器 .....  | 11 |
| 2.3 数据采集单元 .....           | 12 |
| 2.3.1 信号选择 .....           | 12 |
| 2.3.2 信号传送 .....           | 12 |
| 2.3.3 数据采集 .....           | 13 |
| 2.4 数据处理单元 .....           | 14 |
| 2.4.1 时域处理 .....           | 15 |

|              |                          |           |
|--------------|--------------------------|-----------|
| 2.4.2        | 频域处理 .....               | 17        |
| 2.4.3        | 小波变换 .....               | 17        |
| 2.4.4        | 数据的统计分布 .....            | 18        |
| 2.4.5        | 其他图形 .....               | 19        |
| 2.5          | 诊断单元 .....               | 19        |
| 2.5.1        | 阈值诊断 .....               | 19        |
| 2.5.2        | 时域波形诊断 .....             | 20        |
| 2.5.3        | 频率特性诊断 .....             | 20        |
| 2.5.4        | 指纹诊断 .....               | 21        |
| 2.5.5        | 基于人工神经网络的诊断 .....        | 21        |
| 2.5.6        | 专家系统 .....               | 23        |
| <b>第 3 章</b> | <b>电容型设备的监测与诊断 .....</b> | <b>25</b> |
| 3.1          | 概述 .....                 | 25        |
| 3.2          | 介质损耗因数监测 .....           | 25        |
| 3.2.1        | 过零点时差法 .....             | 26        |
| 3.2.2        | 正弦波参数法 .....             | 27        |
| 3.2.3        | 误差及消除措施 .....            | 28        |
| 3.3          | 电容量监测 .....              | 28        |
| 3.4          | 三相不平衡电流监测 .....          | 28        |
| 3.4.1        | 原理 .....                 | 28        |
| 3.4.2        | 误差分析 .....               | 30        |
| <b>第 4 章</b> | <b>变压器的监测与诊断 .....</b>   | <b>33</b> |
| 4.1          | 概述 .....                 | 33        |
| 4.2          | 局部放电的监测与诊断 .....         | 33        |
| 4.2.1        | 基本原理 .....               | 33        |
| 4.2.2        | 局部放电的试验 .....            | 34        |
| 4.2.3        | 变压器局部放电的在线监测与诊断 .....    | 36        |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| 4.3 油中溶解气体的监测与诊断 .....                | 38        |
| 4.3.1 基本原理 .....                      | 38        |
| 4.3.2 油中溶解气体的现场监测 .....               | 39        |
| 4.3.3 故障的诊断 .....                     | 40        |
| <b>第 5 章 交联聚乙烯电缆的监测与诊断 .....</b>      | <b>42</b> |
| 5.1 概述 .....                          | 42        |
| 5.2 直流法 .....                         | 43        |
| 5.2.1 直流成分法 .....                     | 43        |
| 5.2.2 直流叠加法 .....                     | 44        |
| 5.2.3 电桥法 .....                       | 45        |
| 5.3 工频法 .....                         | 46        |
| 5.3.1 介质损耗因数 ( $\tan\delta$ ) 法 ..... | 46        |
| 5.3.2 局部放电法 .....                     | 46        |
| 5.4 低频法 .....                         | 47        |
| 5.4.1 低频成分法 .....                     | 47        |
| 5.4.2 低频叠加法 .....                     | 47        |
| 5.5 复合判断法 .....                       | 48        |
| <b>第 6 章 旋转电机的监测与诊断 .....</b>         | <b>49</b> |
| 6.1 概述 .....                          | 49        |
| 6.2 局部放电监测 .....                      | 50        |
| 6.3 温度监测 .....                        | 51        |
| 6.3.1 局部温度监测 .....                    | 52        |
| 6.3.2 发电机定子绕组平均温度监测 .....             | 52        |
| 6.4 局部过热监测 .....                      | 54        |
| 6.4.1 烟雾监测器 .....                     | 54        |
| 6.4.2 气体红外分析器 .....                   | 55        |
| 6.5 笼型异步电动机断条监测 .....                 | 56        |

## 第7章 断路器与气体绝缘封闭组合

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 电器的监测与诊断 .....           | 57 |
| 7.1 概述 .....             | 57 |
| 7.2 断路器机械故障的监测与诊断 .....  | 57 |
| 7.2.1 合、分闸线圈电流的监测 .....  | 57 |
| 7.2.2 行程、速度的监测 .....     | 60 |
| 7.2.3 振动信号的监测 .....      | 61 |
| 7.3 动态电阻的检测 .....        | 62 |
| 7.4 GIS放电的监测与诊断 .....    | 64 |
| 7.4.1 外复电极法 .....        | 65 |
| 7.4.2 内置电极法 .....        | 65 |
| 7.4.3 局部放电的特高频检测 .....   | 66 |
| 7.4.4 局部放电监测的机械振动法 ..... | 67 |

## 第8章 金属氧化物避雷器的监测与诊断 .....

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 8.1 概述 .....          | 69 |
| 8.2 补偿法监测阻性电流 .....   | 70 |
| 8.2.1 系统构成 .....      | 70 |
| 8.2.2 相间干扰及其抑制 .....  | 71 |
| 8.3 谐波分析法监测阻性电流 ..... | 72 |
| 8.3.1 系统构成 .....      | 72 |
| 8.3.2 阻性电流计算 .....    | 73 |
| 参考文献 .....            | 75 |

# II 柔性交流输电技术

## 第1章 柔性交流输电技术 (FACTS) 的兴起 .....

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1.1 输电技术及电力系统的发展 ..... | 79 |
|------------------------|----|

|                                                  |            |
|--------------------------------------------------|------------|
| 1.1.1 国外情况 .....                                 | 79         |
| 1.1.2 国内情况 .....                                 | 80         |
| 1.1.3 大电网互联带来可观的综合效益 .....                       | 80         |
| 1.2 现代电力系统面临新的挑战 .....                           | 81         |
| 1.3 柔性交流输电新技术的兴起 .....                           | 84         |
| 1.3.1 电力电子技术为 FACTS 的提出创造了条件 .....               | 85         |
| 1.3.2 FACTS 概念的提出 .....                          | 85         |
| 1.4 FACTS 技术的发展 .....                            | 86         |
| 1.5 FACTS 的种类 .....                              | 86         |
| <b>第 2 章 新型静止无功发生器 (STATCOM) .....</b>           | <b>89</b>  |
| 2.1 STATCOM 的基本工作原理 .....                        | 89         |
| 2.1.1 工作原理 .....                                 | 89         |
| 2.1.2 逆变器产生电压的方法 .....                           | 90         |
| 2.2 STATCOM 的特点及作用 .....                         | 93         |
| 2.3 STATCOM 应用实例 .....                           | 94         |
| 2.3.1 TVA 电力系统 Sullivan 变电站的 STATCOM<br>工程 ..... | 94         |
| 2.3.2 日本关西电力系统犬山开关站的 STATCOM<br>工程 .....         | 99         |
| 2.3.3 清华大学 300kVA STATCOM (ASVG) .....           | 103        |
| 2.4 STATCOM 的发展状况及前景 .....                       | 108        |
| <b>第 3 章 可控串联补偿器 (TCSC) .....</b>                | <b>110</b> |
| 3.1 TCSC 基本原理 .....                              | 110        |
| 3.1.1 串联电容补偿器 .....                              | 110        |
| 3.1.2 可控串联电容补偿器 .....                            | 111        |
| 3.1.3 可控串补 (ASC) 的三种运行模式 .....                   | 112        |
| 3.2 TCSC 的特点及作用 .....                            | 113        |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| 3.3 TCSC 应用实例 .....                          | 115        |
| 3.3.1 WAPA 电力系统 Kayenta 变电站的 TCSC 工程 .....   | 115        |
| 3.4 TCSC 的发展状况及前景 .....                      | 122        |
| <b>第 4 章 综合潮流控制器 (UPFC) .....</b>            | <b>124</b> |
| 4.1 UPFC 的基本原理和功能 .....                      | 124        |
| 4.2 UPFC 的特点和作用 .....                        | 125        |
| 4.3 UPFC 的应用实例——AEP 电力系统的 UPFC<br>示范工程 ..... | 126        |
| <b>第 5 章 其他 FACTS 装置的介绍 .....</b>            | <b>128</b> |
| 5.1 静止无功补偿器 (SVC) .....                      | 128        |
| 5.1.1 SVC 的基本型式 .....                        | 128        |
| 5.1.2 SVC 的功能 .....                          | 128        |
| 5.1.3 SVC 的发展状况 .....                        | 130        |
| 5.2 可控移相器 (TCPR) .....                       | 131        |
| 5.2.1 基本工作原理 .....                           | 131        |
| 5.2.2 TCPR 的功能 .....                         | 132        |
| 5.2.3 应用实例 .....                             | 132        |
| 5.3 固态断路器 (SSCB) .....                       | 134        |
| 5.3.1 SSCB 基本工作原理及功能 .....                   | 134        |
| 5.3.2 SSCB 的示范产品 .....                       | 136        |
| 5.4 串联潮流控制器 (SPFC) .....                     | 137        |
| 5.5 变压器抽头有载可控调节器 (TCTC) .....                | 137        |
| 5.6 次同步振荡阻尼器 (NGH-SSR D) .....               | 138        |
| 5.6.1 NGH-SSR Damper 的基本原理 .....             | 138        |
| 5.6.2 NGH-SSR Damper 主要功能 .....              | 139        |
| 5.7 可控并联电容器 (TSC) .....                      | 139        |
| 5.8 可控串联电抗器 (TCR) .....                      | 140        |

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| 5.9 动态过电压限制器 (DVL) .....                   | 140        |
| 5.10 故障电流限制器 (FCL) .....                   | 140        |
| 5.10.1 FCL 基本工作原理 .....                    | 141        |
| 5.10.2 配电系统的电流限制器 (DCLD) 应有功能 .....        | 143        |
| 5.10.3 FCL 的应用及进展 .....                    | 143        |
| 5.11 有源电力滤波器 (APF) .....                   | 144        |
| 5.11.1 APF 的基本工作原理及功能 .....                | 144        |
| 5.11.2 APF 的进展 .....                       | 145        |
| 5.11.3 亟待解决的几个问题 .....                     | 146        |
| 5.11.4 GAPF .....                          | 147        |
| <b>第 6 章 FACTS 需要解决的技术难题 .....</b>         | <b>148</b> |
| 6.1 控制器的设计 .....                           | 148        |
| 6.1.1 控制器的外环设计 .....                       | 149        |
| 6.1.2 控制器内环设计 .....                        | 153        |
| 6.2 保护装置的设计 .....                          | 155        |
| 6.3 主电路方案设计 .....                          | 159        |
| 6.3.1 主电路设计中应注意的几个问题 .....                 | 159        |
| 6.3.2 ASVG 主电路的设计应遵循的原则 .....              | 162        |
| <b>第 7 章 FACTS 的技术经济分析 .....</b>           | <b>163</b> |
| 7.1 FACTS 技术的优势所在 .....                    | 163        |
| 7.2 FACTS 优越性的两个实例 .....                   | 163        |
| 7.3 几种 FACTS 控制器技术与经济性比较 .....             | 165        |
| 7.3.1 STATCOM 与 SVC 及同步调相机的比较<br>与分析 ..... | 165        |
| 7.3.2 STATCON、SPFC 及 UPFC 的功能比较 .....      | 166        |
| 7.3.3 几种常用的无功功率补偿设备的性能比较 .....             | 168        |
| 7.3.4 几种 FACTS 控制器单位容量造价比较 .....           | 170        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| <b>第 8 章 FACTS 的发展状况及前景展望 .....</b> | <b>172</b> |
| 8.1 FACTS 技术的发展状况 .....             | 172        |
| 8.1.1 FACTS 技术的发展 .....             | 172        |
| 8.1.2 FACTS 在输电系统中的作用 .....         | 174        |
| 8.1.3 FACTS 技术还有待进一步发展 .....        | 176        |
| 8.2 FACTS 技术的发展前景 .....             | 180        |
| 8.2.1 即将诞生的 FACTS 设备 .....          | 180        |
| 8.2.2 FACTS 技术前景展望 .....            | 180        |

## III 电磁兼容

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>第 1 章 概论 .....</b>           | <b>185</b> |
| 1.1 电磁兼容学科及其重要性 .....           | 185        |
| 1.2 重要术语及定义 .....               | 189        |
| 1.3 电磁兼容的历史与现状 .....            | 193        |
| 1.4 电磁兼容标准 .....                | 198        |
| 1.4.1 国际上有关标准 .....             | 198        |
| 1.4.2 国际电磁兼容标准体系 .....          | 199        |
| 1.4.3 我国的国家标准 .....             | 201        |
| <b>第 2 章 电磁干扰对无线设备的影响 .....</b> | <b>203</b> |
| 2.1 电磁骚扰源 .....                 | 203        |
| 2.1.1 电磁骚扰的表现形式 .....           | 203        |
| 2.1.2 自然电磁骚扰源 .....             | 209        |
| 2.1.3 人为电磁骚扰源 .....             | 211        |
| 2.2 电磁噪声的传播 .....               | 219        |
| 2.2.1 电磁噪声的耦合途径 .....           | 219        |
| 2.2.2 传导耦合 .....                | 220        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 2.2.3 辐射耦合 .....               | 222        |
| 2.3 减小电磁干扰的主要措施 .....          | 224        |
| 2.3.1 屏蔽 .....                 | 224        |
| 2.3.2 滤波 .....                 | 229        |
| 2.3.3 接地 .....                 | 233        |
| 2.4 电磁兼容测量 .....               | 235        |
| 2.4.1 电磁发射测量与抗扰度测量 .....       | 235        |
| 2.4.2 测量接收机 .....              | 240        |
| 2.4.3 测量天线 .....               | 246        |
| 2.4.4 测量场地 .....               | 248        |
| <b>第3章 电磁干扰对有线设备的影响 .....</b>  | <b>250</b> |
| 3.1 常见的电磁干扰源特性 .....           | 251        |
| 3.1.1 自然存在的电磁干扰源 .....         | 251        |
| 3.1.2 人为的电磁干扰源 .....           | 251        |
| 3.1.3 噪声的描述 .....              | 254        |
| 3.2 电磁干扰入侵的途径 .....            | 255        |
| 3.2.1 电磁干扰传播的途径 .....          | 256        |
| 3.2.2 静电感应机制 .....             | 256        |
| 3.2.3 电磁感应机制 .....             | 257        |
| 3.2.4 以地电流方式传播的电磁噪声的机制 .....   | 259        |
| 3.3 高压线对通信架空明线和电缆线路的干扰影响 ..... | 261        |
| 3.3.1 概述 .....                 | 261        |
| 3.3.2 高压线对电话通路的电磁干扰影响 .....    | 262        |
| 3.3.3 几个重要的噪声干扰参量 .....        | 263        |
| 3.4 高压线对通信线干扰影响的计算 .....       | 267        |
| 3.4.1 高压线对通信明线单线回路的干扰影响 .....  | 267        |
| 3.4.2 噪声电流和噪声电压的计算 .....       | 271        |
| 3.4.3 电路干扰防护设计方法 .....         | 274        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 3.5 电气化铁道对通信线的干扰影响 .....          | 280        |
| 3.5.1 接触网的工作电流 .....              | 280        |
| 3.5.2 地电流影响 .....                 | 282        |
| 3.6 辐射电磁波对有线通信设备的影响 .....         | 285        |
| 3.6.1 电磁波入射到电力线和通信线 .....         | 285        |
| 3.6.2 无线电波对有线通信线路的干扰 .....        | 286        |
| 3.6.3 核爆电磁脉冲对有线通信设备的影响 .....      | 288        |
| 3.6.4 磁暴对有线设备的影响 .....            | 291        |
| 3.7 减小外界电磁场对有线通信设备产生干扰影响的措施 ..... | 293        |
| 3.7.1 减小干扰实现电磁兼容的措施 .....         | 293        |
| 3.7.2 干扰电流和干扰电压的容许值 .....         | 294        |
| 3.7.3 减小有线通信设备上干扰影响的措施 .....      | 295        |
| 3.8 有线设备固有干扰参数的测量 .....           | 302        |
| 3.8.1 有线回路敏感系数的测量 .....           | 302        |
| 3.8.2 电缆屏蔽体的转移阻抗和转移导纳测量 .....     | 303        |
| <b>第4章 电力线路对通信线路的危险影响 .....</b>   | <b>306</b> |
| 4.1 危险影响的来源 .....                 | 306        |
| 4.2 电力线路与通信线路间的阻性耦合 .....         | 307        |
| 4.2.1 入地短路故障电流引起的地电位分布 .....      | 307        |
| 4.2.2 土壤的导电性能 .....               | 310        |
| 4.2.3 接地网的计算机模拟与优化 .....          | 311        |
| 4.2.4 电力线路架空地线的回流 .....           | 314        |
| 4.2.5 电力电缆金属护套外皮的回流 .....         | 316        |
| 4.3 电力线路与通信线路间的感性耦合 .....         | 318        |
| 4.3.1 大地中的感应电流与可观的透入深度 .....      | 319        |
| 4.3.2 奇异的镜像电流 .....               | 322        |
| 4.3.3 地下金属管线的屏蔽作用 .....           | 323        |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 4.3.4 通信线路上感应纵电动势引起的横向电压 ..... | 326 |
| 4.4 电力线路与通信线路间的容性耦合 .....      | 329 |
| 4.4.1 容性耦合途径 .....             | 329 |
| 4.4.2 大地的作用与巧妙的镜像电荷 .....      | 330 |
| 4.4.3 容性耦合感应电流的计算 .....        | 331 |
| 4.5 危险影响允许值与保安措施 .....         | 333 |
| 4.5.1 人身安全 .....               | 333 |
| 4.5.2 设备安全 .....               | 334 |
| 4.5.3 我国和国际标准容许值 .....         | 335 |
| 4.5.4 防护措施 .....               | 336 |
| 4.6 直流输电线路对通信线路的危险影响 .....     | 337 |
| 4.6.1 感性耦合影响 .....             | 337 |
| 4.6.2 静电场和离子流影响 .....          | 338 |
| 4.6.3 直流系统接地电极的影响 .....        | 338 |
| 参考文献 .....                     | 339 |

## IV 硅橡胶与电力系统外缘绝

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第1章 概论 .....               | 345 |
| 第2章 硅橡胶材料的基本特性 .....       | 348 |
| 2.1 硅橡胶材料的一般性能 .....       | 348 |
| 2.1.1 硅橡胶材料分子结构的主要特征 ..... | 348 |
| 2.1.2 耐大气老化性能 .....        | 349 |
| 2.1.3 耐臭氧老化性能 .....        | 350 |
| 2.1.4 耐高低温性能 .....         | 351 |
| 2.1.5 力学性能 .....           | 351 |
| 2.1.6 电气性能 .....           | 352 |
| 2.2 硅橡胶材料的憎水性 .....        | 352 |