

HDS电气设备

带电状态**诊断**技术及应用

● 赵世纯 凌标灿 朱希安 高博 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

HDS 电气设备 带电状态诊断技术及应用

赵世纯 凌标灿 朱希安 高博 著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是在引进、吸收和消化国外 HDS 技术的基础上,完成电气设备制造的全部国产化后,为推广 HDS 技术而编著的。全书共 7 章,主要内容包括:典型电气设备故障类型及诊断方法、电气设备老化及电流谐波产生机理、HDS 电气设备智能诊断算法、HDS 电气设备谐波故障诊断系统、LK 系列产品操作指南、LK 系列产品管理软件操作指南及电气设备高次谐波诊断验证案例。

本书适合电气工程及自动化专业、测控技术与仪器专业学生及电气设备故障检测工程师、电气设备维修工程师参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

HDS 电气设备带电状态诊断技术及应用 / 赵世纯等著. —北京:电子工业出版社, 2017.3
ISBN 978-7-121-30986-1

I. ①H… II. ①赵… III. ①电气设备—谐波检测 IV. ①TM732

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 036705 号

策划编辑:董亚峰

责任编辑:董亚峰

特约编辑:彭 瑛 罗树利等

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱

邮编:100036

开 本:720×1000 1/16 印张:15 字数:288 千字

版 次:2017 年 3 月第 1 版

印 次:2017 年 3 月第 1 次印刷

定 价:45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:QQ3502629。

前 言

HDS (Harmonic Diagnosis System, 谐波诊断系统) 电气设备带电状态诊断技术源于发明专利“用于电气设备的谐波诊断方法”(中国专利号 ZL200480003728.4 和中国香港专利号 HK1087778)。专利发明人高博先生 1967 年在京都大学攻读博士学位期间一直从事谐波检测技术的研究和数据积累, 形成了完整的谐波诊断理论体系和专家数据库。2015 年 5 月 27 日, 上述专利的权利正式从日本阿泰克株式会社转移到中矿龙科能源科技(北京)股份有限公司名下。

为了使更多从事电气设备故障诊断技术研究的专家和学者更深入地了解和研究该项技术, 并将其广泛应用于工业生产领域、楼宇、水电系统等各种电气设备中, 包含各种电动机、发电机、变频器、变压器、工业电容、UPS、大功率电池组及工业输电电缆等, 中矿龙科能源科技(北京)股份有限公司组织了部分领导和专家, 将 HDS 电气设备带电状态诊断技术的相关技术原理、技术规范及操作规程、注意事项整理成书, 以求将该项技术发扬光大。依据谐波诊断技术所给出的检修时间, 可实现针对性的检修维护, 大幅降低各生产环节设备的非正常停机时间, 减少不必要的工时浪费和配件损耗。

中矿龙科能源科技(北京)股份有限公司经过近 3 年的研发, 已完成 YGX1-12 矿用本安型故障谐波检测仪(安标证书编号 MFA130251) 和 YGX-127 矿用隔爆兼本安型故障谐波检测仪(安标证书编号 MFA130252) 两款产品, 已开始批量生产的非安标产品有 LK8000 便携式 HDS 设备故障诊断仪、LK8000L 便携式 HDS 电缆故障诊断仪、LK9000 在线式 HDS 电力拖动系统故障诊断仪等。2015 年, YGX1-12 矿用本安型故障谐波检测仪获得北京市新技术新产品证书。

与淮北矿业集团共同承担的“基于谐波分析技术的煤矿电气设备管理系统”科研项目获国家安监总局 2015 年安全生产科技成果奖。2015 年 6 月与北京信息科技大学共同成立“北京谐波诊断技术研究院”，共同申报的“电气设备故障谐波采集与处理系统”项目获得北京市教委市属高校创新能力提升计划资助 300 万元（2016—2018 年）。

本书主要章节内容如下：

第 1 章典型电气设备故障类型及诊断方法，介绍了电力电缆、变压器、三相异步电动机、永磁同步电动机及直流电动机的常见故障类型及诊断方法。

第 2 章电气设备老化及电流谐波产生机理，介绍了电流谐波的概念、应力老化的类型、涡电流与谐波的关系、电气设备的异常/老化与谐波的关系、电气设备的高次谐波共振、电动机及变频器的感应电压、电气设备振动与谐波的关系、电动机效率特性与谐波的关系及高次谐波的电路理论。

第 3 章 HDS 电气设备智能诊断算法，介绍了模糊理论、神经网络、小波分析理论、贝叶斯网络、支持向量机及专家系统。

第 4 章 HDS 电气设备谐波故障诊断系统，介绍了谐波诊断系统的构成、高次谐波诊断数据样本、劣化诊断的判定算法、设备异常/劣化判断基准、LK 系列诊断仪技术优势及电力平衡和负载模式。

第 5 章 LK 系列产品操作指南，介绍了专利及安全声明、LK 系列产品安全检测规范、设备检测前置参数说明、低压三相异步交流电动机的检测方法、高压异步交流电动机的检测方法、带变频器的异步交流电动机检测方法、直流电动机的检测方法、发电机的检测方法、电力变压器的检测方法、电力电容器的检测方法、UPS 不间断电源的检测方法、设备使用过程中的不当检测方法和常见问题及解决方法。

第 6 章 LK 系列产品管理软件操作指南，介绍了管理软件使用说明、管理软件的端口设置、修改企业名称、修改登录设备参数、趋势管理、趋势管理要点、报告解读说明和报告部分名词解释。

第7章电气设备高次谐波诊断验证案例,介绍了低压电气设备诊断验证案例、高压电气设备诊断验证案例及电力电缆诊断验证案例。

本书适合电气工程及自动化专业、测控技术与仪器专业学生及电气设备故障检测工程师、电气设备维修工程师参考。

由于作者水平有限,时间仓促,虽几易其稿,书中错误、不妥及疏漏之处在所难免,恳请专家学者和读者不吝指教。

编著者

2016年10月

目 录

第 1 章 典型电气设备故障类型及诊断方法	1
1.1 电力电缆故障类型及诊断方法	1
1.1.1 电力电缆故障性质	1
1.1.2 电力电缆故障性质诊断方法	2
1.1.3 电力电缆故障测距的主要方法	4
1.1.4 自动测距原理	6
1.2 变压器故障类型及诊断方法	8
1.2.1 变压器故障类型	8
1.2.2 变压器故障诊断方法	11
1.3 三相异步电动机故障类型及诊断方法	17
1.3.1 鼠笼式三相异步电动机故障分类	17
1.3.2 鼠笼式三相异步电动机故障诊断方法	22
1.3.3 绕线式三相异步电动机故障分类及其诊断方法	31
1.3.4 单相异步电动机故障分类及其诊断方法	32
1.4 永磁同步电动机故障类型及诊断方法	34
1.4.1 常见故障及维修方法	34
1.4.2 其他常见故障	38
1.5 直流电动机故障类型及诊断方法	38
1.5.1 直流电动机常见故障	38
1.5.2 直流电动机故障检测方法	39
第 2 章 电气设备老化及电流谐波产生机理	43
2.1 电流谐波的概念	43

2.2 应力老化的类型	47
2.2.1 热老化	47
2.2.2 电压应力老化	48
2.2.3 机械应力老化	52
2.2.4 环境应力老化	54
2.2.5 复合应力老化	55
2.2.6 应力特征与谐波的关系	56
2.3 涡电流与谐波的关系	57
2.4 电气设备的异常/老化与谐波的关系	59
2.5 电气设备的高次谐波共振	61
2.6 电动机及变频器的感应电压	63
2.7 电气设备振动与谐波的关系	64
2.8 电动机效率特性与谐波的关系	65
2.9 高次谐波的电路理论	66
2.9.1 负载模式与电力平衡	66
2.9.2 电气驱动系统各部位与高次谐波的关系	68
第 3 章 HDS 电气设备智能诊断算法	71
3.1 模糊理论	71
3.1.1 引言	71
3.1.2 模糊集	72
3.1.3 模糊关系	72
3.1.4 模糊推理	73
3.1.5 模糊故障诊断原理	73
3.1.6 故障诊断的模糊模型	74
3.1.7 故障诊断算法及故障原因确定	75
3.2 神经网络	76
3.2.1 人工神经网络概述	76
3.2.2 人工神经网络发展史	77
3.2.3 人工神经元模型	78

3.2.4	BP 神经网络	81
3.2.5	神经网络在故障诊断中的应用	82
3.2.6	神经网络与其他故障诊断技术的结合	84
3.3	小波分析理论	85
3.3.1	小波变换基本理论的研究	85
3.3.2	小波基函数	86
3.3.3	连续小波变换	88
3.3.4	离散小波变换	88
3.3.5	多分辨率分析	89
3.3.6	小波分析与电动机故障诊断	90
3.3.7	小波分析的具体应用	91
3.4	贝叶斯网络	92
3.4.1	贝叶斯网络简介	92
3.4.2	贝叶斯网络学习	93
3.4.3	贝叶斯网络推理	96
3.5	支持向量机	99
3.5.1	统计学习基本理论	99
3.5.2	支持向量分类机	102
3.5.3	支持向量回归机	106
3.6	专家系统	110
3.6.1	何谓专家系统	110
3.6.2	专家系统的结构	110
3.6.3	知识库的作用	112
3.6.4	推理机的作用及分类	115
3.6.5	专家系统与故障诊断	115
3.6.6	故障诊断专家系统分类	116
第 4 章	HDS 电气设备谐波故障诊断系统	118
4.1	谐波故障诊断系统的构成	118
4.1.1	诊断装置硬件模块	118

4.1.2	高次谐波电流分析	120
4.1.3	诊断计算步骤	125
4.2	高次谐波诊断数据样本	128
4.3	劣化诊断的判定算法	130
4.3.1	电动机本体诊断	130
4.3.2	电动机负载诊断	132
4.3.3	变频器诊断	132
4.4	设备异常/劣化的判定基准	134
4.4.1	交流电动机	134
4.4.2	直流电动机	136
4.4.3	电力用电容器	137
4.4.4	电力用变压器	137
4.4.5	发电机	137
4.4.6	UPS	138
4.5	LK 系列诊断仪技术优势	138
4.6	电力平衡和负载模式	140
第 5 章	LK 系列产品操作指南	143
5.1	专利及安全声明	143
5.1.1	专利声明	143
5.1.2	安全声明	143
5.2	LK 系列产品安全检测规范	144
5.2.1	检测现场的基本条件	144
5.2.2	检测人员的基本条件	144
5.2.3	高处检测	144
5.2.4	设备检测与操作基本要求	145
5.3	设备检测前置参数说明	145
5.3.1	检测目标类型划分	145
5.3.2	检测前需要明确待检设备的参数	146

5.4 低压三相异步交流电动机的检测方法	146
5.4.1 检测注意事项	147
5.4.2 检测操作步骤	147
5.5 高压异步交流电动机的检测方法	149
5.5.1 检测位置	149
5.5.2 检测操作步骤	149
5.6 带变频器的异步交流电动机检测方法	151
5.6.1 检测位置	151
5.6.2 检测操作步骤	152
5.7 直流电动机的检测方法	154
5.7.1 检测位置	154
5.7.2 检测操作步骤	155
5.8 发电机的检测方法	156
5.8.1 检测位置	156
5.8.2 检测操作步骤	157
5.9 电力变压器的检测方法	159
5.9.1 检测位置	159
5.9.2 检测操作步骤	159
5.10 电力电容器的检测方法	162
5.10.1 检测位置	162
5.10.2 检测操作步骤	162
5.11 UPS 不间断电源的检测方法	164
5.11.1 检测位置	164
5.11.2 检测操作步骤	165
5.12 设备使用过程中的不当检测方法	167
5.13 常见问题及解决方法	168
第 6 章 LK 系列产品管理软件操作指南	170
6.1 管理软件使用说明	170

6.2	管理软件的端口设置	174
6.3	修改企业名称	175
6.4	修改登录设备参数	177
6.5	趋势管理	177
6.6	趋势管理要点	180
6.7	报告解读说明	181
6.8	报告部分名词解释	183
第 7 章	电气设备高次谐波诊断验证案例	186
7.1	低压电气设备诊断验证案例	186
7.2	高压电气设备诊断验证案例	204
7.3	电力电缆诊断验证案例	209
	参考文献	219

第 1 章

典型电气设备故障类型及诊断方法

1.1 电力电缆故障类型及诊断方法

1.1.1 电力电缆故障性质

按故障性质区分，电力电缆故障分为开路故障和接地故障两类。

(1) 开路故障：电缆缆芯的连续性受到破坏，形成断线或者不完全断线。电缆相间或相对地的绝缘电阻值达到所要求的规定值，但工作电压不能传输到终端，或者虽然终端有电压，但是承载负载的能力不足，此类故障被称作开路故障。

(2) 接地故障：电缆缆芯之间或者缆芯和外皮之间的绝缘层遭到破坏，出现短路接地现象或者闪络性击穿现象。一般来讲，短路接地故障可以分为低阻故障和高阻故障两种。

①低阻故障：电缆缆芯之间或者相对地的绝缘受损，导致绝缘电阻减小，但是仍然可以用低压脉冲法来进行测量的故障。

②高阻故障：与低阻故障相比，故障电阻很大，以至于不能采用低压脉冲法进行测量的故障。高阻故障又分为泄漏性高阻故障和闪络性高阻故障两种。

1.1.2 电力电缆故障性质诊断方法

电力电缆故障性质的诊断过程其实就是对电缆的绝缘电阻情况和线芯情况进行测试的过程。可以根据电力电缆绝缘电阻的不同或者线芯的多少来诊断其故障性质类型，然后选择合适的测试方法测距。

(1) 低阻故障。一般情况下是指电缆单相或多相对地绝缘电阻或者不同线芯之间的绝缘电阻低于几百欧姆的故障，常见的有单相低阻接地、两相短路接地和三相短路接地等。与高阻故障的区别就是识别起来比较方便，用低压脉冲法即可检测出低阻反射波。如图 1.1 所示，当 C 相对地电阻 $R_G = 0$ 时为短路故障，即低阻故障。依据电阻电桥法或低压脉冲法可检测电缆低阻故障。

①电阻电桥法。用万用表测试电缆相间和相对地（或金属屏蔽层）的电阻值。若电阻值小于 $10\text{k}\Omega$ ，则可认为是低阻故障。

②低压脉冲法。用低压脉冲法测试相间或相对地的波形。若波形中产生与仪器发射脉冲反极性的反射波形，则可判断存在低阻故障。一般低阻故障的电阻值小于几千欧姆。

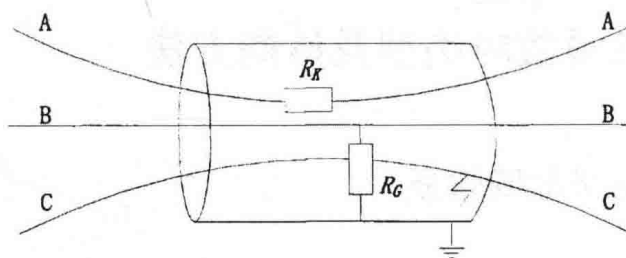


图 1.1 电缆故障示意图

(2) 开路故障。是指在电缆各相绝缘良好的情况下，电缆单相或多相导体开路或者金属护层断裂的故障，即终端无正常的工作电压，或者即使有电压，但承载负载的能力也会很差。常见的现象如电缆被烧断或者施工挖断而导致电缆缆芯和电缆金属屏蔽层断开。开路故障一般都伴随着电阻接地现象而存在，发生的概率较低。如图 1.1 所示，当 A 相 $R_K = \infty$ 时为开路故障。似断非断故障是指电缆的电阻不正常，其值大于电缆缆芯的正常电阻值，但又小于 ∞ ，常见的现象是电缆缆芯或者其金属屏蔽层的某一段似连非连，又或者电缆生产过程中接头部分的缆芯和金属屏蔽层工艺粗糙导致接触不良。其中断线故障是开路故障的一个特例，具体检测方法如下。

①万用表法。在测量单芯电缆时,在终端将其金属屏蔽层与缆芯短接,在始端用万用表欧姆挡测量缆芯到屏蔽层之间的电阻。若测试电阻为 ∞ ,则为开路故障;若测试电阻小于 ∞ ,但大于2倍缆芯的正常电阻,则为似断非断故障。

在测量三芯电缆时,若电缆有金属屏蔽层,则在终端将三相与金属屏蔽层短接,用万用表欧姆挡在始端分别测试三相对绝缘层及三相间的电阻值。三相电阻基本平衡,且三相对屏蔽层的电阻满足小于电缆缆芯的正常电阻2倍的条件。若电缆缆芯任意两组数据与三相 R_U 、 R_V 、 R_W 任意一组数据中的电阻值为无穷大或大于2倍电缆缆芯的正常电阻,则可判断为开路故障;若电缆无金属屏蔽层,则可不测试相对地电阻,而应测试相间电阻,并且测试时尽量不用绝缘电阻表。

②低压脉冲法。通过用脉冲法测试电缆的相对长度及脉冲反射波形来判断电缆是否存在开路故障,此时无须将电缆另一端短接。此种方法对于缆芯及金属屏蔽层都有非常好的监测效果。

(3)高阻故障。相对于低阻故障,高阻故障发生的概率相对较高,占全部电缆故障的80%左右。一般情况下是指电缆单相或多相对地绝缘电阻或者不同线芯之间的绝缘电阻低于正常值但高于几百欧姆的故障。针对这类故障,一般采用脉冲电流法或脉冲电压法进行检测。有时会因故障点受潮或进水使其绝缘电阻高于几百欧姆,这时可以采用低压脉冲比较法测距。

(4)闪络性故障。相对于高阻故障,电缆绝缘电阻阻值非常高,当进行电缆耐压试验时,若电压超过某一数值,就会造成绝缘击穿,称之为闪络性故障。这类故障是高阻故障的极端形式,并不常见,偶尔会出现在预防性试验中,常用脉冲电流法或脉冲电压法中的冲闪方式进行测距。但由于这类故障常常是封闭性的,因而查找起来会有一些困难。

(5)电缆主绝缘的特殊故障。这类故障常常发生在大范围进水而受潮的电缆、中接头较多的低压电缆和因加工不良或被烧焦而导致铜屏蔽层或电缆护层发生故障的电缆上。由于采用脉冲法测试故障时会碰到没有反射脉冲波的故障,所以常采用电桥法测距。

(6)单芯高压电缆护层故障。这类故障是由于电缆金属护层与大地间没用很好的绝缘引起的,二者之间除金属相外,就只有大地,而且大地的衰减系数非常大,如果采用脉冲法来测距,则只会影响测距效果,不会达到预期的标准,因而选用电桥法来测试这类故障。

综上所述,不同的故障性质类型所采用的测试方法也不尽相同,如表1.1所示。

表 1.1 不同故障性质所采用的测试方法

故障性质类型	发生频率	测试方法	最佳定位方法
短路（低阻）故障	低压电缆发生较多	脉冲电流法/低压脉冲法	声磁同步法/金属性短路故障音频信号感应定位
开路故障	几乎不发生	闪络性故障测试法/ 低压脉冲法	闪络性故障试定位
高阻故障	80%左右	脉冲电流法/二次脉冲法	声磁同步法定位
闪络性故障	很少发生	脉冲电流法/二次脉冲法	声磁同步法定位
电缆主绝缘的特殊故障和单芯高压电缆护层故障	很少发生	电桥法	声磁同步法/ 跨步电压法定位

1.1.3 电力电缆故障测距的主要方法

电力电缆故障测距又叫粗测，是在电缆的一端使用对应的测试仪器初步确定故障距离，有利于缩短故障点的范围，便于更快地找到故障点。

（1）“S”信号注入法。“S”信号注入法就是向故障电缆注入一个信号，通过检测此信号的电压或电流在故障电缆中的传播时间来计算测量点到故障点的故障阻抗，以故障距离和其故障阻抗成正比作为故障点位置的判断依据。信号注入法因为受信号强度的影响，所以定位效果必须依照现场实际运行为准。该方法除主要用于故障区段判断外，也可以用于故障测距。

（2）微分方程法。微分方程法又称暂态阻抗法，其是通过列写故障线路的暂态微分方程，利用测量的暂态故障电流和故障电压信号来计算测量点到故障点之间线路的电感，从而实现故障测距的。该方法由于不受中性点运行方式的影响，因而故障测距的灵敏度大大提高，并且克服了故障信号微弱难以用于定位的缺点。但由于所使用的模型并没有考虑到故障线路的分布电容，因而故障测距的误差比较大，不能满足实用化的要求。

（3）行波法。当电缆发生故障时，线路的参数会发生突变，根据行波理论，线路上发生的任何扰动，线路上的电气量均以行波形式沿着线路向系统的其他部分传播，在突变点处发生信号的反射和折射，因此，在理论上可以利用测量点的暂态行波信号来实现各种类型的故障测距。行波法可以分为单端法和双端法，单端法通过测量行波在故障点与母线之间往返一次的时间来进行测距；双端法则利用故障行波到达两端的时间差来计算一端到故障点之间的距离。由于双端法需要

利用 GPS 时钟同步装置,经济成本高,当输电线路输电距离较长或配电网结构复杂时,信号在传输过程中难免会出现杂波,导致测量结果不准确,因此单端法更适用。行波测距需要解决的问题是故障波头的识别和混合线路的波阻抗的变化。通过检测故障点的返回信号量来确定行波波头到达测量端的时间点。行波法又可具体分为以下几种类型。

①直流闪络法。该方法的基本原理是在故障电缆上施加一个直流冲击电压,使没有完全短路的故障点击穿放电,即发生闪络。在发生闪络的时间内,故障点呈短路状态或者接地状态。一般直流闪络法对测寻闪络性故障最为有效。

②冲击闪络法。该方法的基本原理是向故障点处发射一个高压脉冲使故障点发生闪络,和直流闪络法一样形成短路状态。直流闪络法只能检测闪络性高阻故障,而冲击闪络法能检测泄漏性高阻故障。冲击闪络法是适用范围最广的一种故障测试方法,它对高阻故障和闪络性故障都很有效。

③低压脉冲法。低压脉冲法一般用于监测绝缘电阻在 40Ω 以下的低阻故障,其基本原理是向故障电缆发射一个低压脉冲信号,当脉冲遇到故障点、电缆接头或电缆终端时,由于该点的阻抗发生改变,因而会产生一个反方向的反射脉冲,利用仪器记录下发射脉冲和反射脉冲之间的时间差,通过计算,从而找到故障点。

④参数辨识法。首先建立其等效数学模型,构建系统结构,然后通过检测线路首端的电流值和电压值来求取模型内各个元件的参数,从而实现故障测距。在时域和频域的参数识别中,最常用的工具是最小二乘法。由于输电线路参数较均匀、结构较简单,在求解过程中只需少量参数,所以参数辨识法用在故障测距中比较准确。对于中性点不接地系统,可以利用零序电流信号和零序电压信号来求出对地电容,然后与之前建立的模型进行对比选出故障线路,再通过辨识故障线路电感参数来计算出故障距离。由于小电流接地系统的零序电流和零序电压较小,所以只能保证一定程度的判断。如果用于电缆的故障测距,则其计算精度会大大降低,实际应用效果有待进一步验证。

电力电缆故障定位技术不仅包含阻抗法、行波法等粗测技术,在实际应用中还需要声磁同步法、音频感应法、跨步电压法等精确定位方法的配合,才能最终找到故障点。由于每种故障类型对应的方法是不一样的,这就使得对电力电缆故障诊断定位技术的研究必须有针对性并逐个进行,这样才能达到提高测量精度的目的。

电力电缆测长技术的研究离不开对电力电缆故障诊断技术的全面掌握,它是