

配电线路 雷害对策

[日] 财团法人 电力中央研究所 编

[日] 横山 茂 著 吴国良 译



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

中国电力科学研究院专著出版基金资助

配电线路雷害对策

[日] 财团法人 电力中央研究所 编
[日] 横山 茂 著 吴国良 译 刘新 校



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是专门针对配电线路雷害进行研究的论著,作者通过近40年的研究,分析了各种雷害的特性,给出了配电线路各种防雷措施效果的大量统计分析数据,出示了许多配电线路雷击的监测照片以及最新的研究成果,提出了较为全面的防雷对策,特别是防范直击雷和向山顶负荷供电防雷以及防止逆流雷(反击)的对策,同时还进一步提出了在保证防雷效果的前提下如何简化设施、降低成本。

全书共分十一章及附录,主要内容包括:与配电线路有关的雷现象,配电线路上产生的雷电过电压,配电设备的绝缘特性,配电线路的雷害情况,避雷器的效果,架空地线的效果,避雷器和架空地线同时使用的效果,柱上变压器的雷害对策,绝缘导线的雷击响应特性,配电线路雷害对策方法的选定法,冬季雷的特性和防止向山顶负荷供电配电线路的雷害。

本书可作为电力企业相关应用人员、防雷产品制造商、施工单位有关配电技术人员、大专院校电力系统有关专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

配电线路雷害对策 / 日本电力中央研究所编; (日) 横山茂著; 吴国良译.
北京: 中国电力出版社, 2008. 6

ISBN 978-7-5083-7018-7

I. 配… II. ①日…②横…③吴… III. 配电线路-防雷 IV. TU895

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 052909 号

图字: 01-2007-5627 号

Original Japanese edition

Edited by Zaidan Houjin Denryoku Chuou Kenkyusho

Written by Shigeru Yokoyama

Copyright © 2005 by Zaidan Houjin Denryoku Chuou Kenkyusho

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese Language edition published by China Electric Power Press

Copyright © 2009.

All rights reserved.

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年6月第一版 2008年6月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 5.625印张 134千字 4彩页

印数0001—3000册 定价28.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

高压配电线路设备和材料的变化,对雷害对策产生了很大的影响。关于高压配电线路雷害对策,经过40多年来切实的调查、研究,所得到的成果转化为各个时期的防雷设计指南。随着研究的深入,雷害事故逐渐稳步减少,虽然排位有变化,但雷害占高压配电线路事故的比例还较高,每年居所有事故原因的第1、2位。

与输电线路相比,由于高压配电线路绝缘较弱,雷害的原因不但有直击雷,而且还有附近落雷时的感应雷。绝缘部位因过电压放电而引发的损坏,以及因冬季雷常见的长时间持续的雷电电流烧损正常动作的避雷器等,不同地区发生的不同雷害也不可忽视。即配电线路雷害原因多种多样,在确定对策方法时需要考虑诸多相关因素。

本书以电力公司、大用户以及工程公司与配电线路有关的技术人员为对象,全面且通俗易懂地对有关配电线路雷害对策事项进行解说,作者还对近几年的配电线路感应雷现象的研究新成果进行了介绍。并且,还对降低雷害对策成本的最佳设计方法的基础事项进行了综合说明。

作者

2005年9月

本书由日本电力中央研究所电力技术研究所首席研究员横山茂教授所著，2005年9月出版。作者对配电线路雷害进行了近40年的研究，分析了各种雷害的特性，给出了配电线路各种防雷措施效果的大量统计分析数据，出示了许多配电线路雷击的监测照片以及最新的研究成果，提出了较为全面的防雷对策，特别是防范直击雷和向山顶负荷供电防雷以及防止逆流雷（反击）的对策，还进一步提出了在保证防雷效果的前提下如何简化设施、降低成本，具有很大实用参考价值。

近年来我国实施了大规模的配电网改造，特别是中压架空配电线路绝缘化后，配电线路的健康水平有了很大的提高，但同时也出现了绝缘线雷击断线等问题。迄今为止，国内电力系统雷害研究大多针对输电线路、变电站和发电厂等，十分缺乏系统研究配电线路防雷方面的内容，特别是配电线路防范直击雷的内容。为此我们特翻译了本书，供从事配电线路科研、设计、施工和运行人员以及大专院校有关专业师生参考。

读者在阅读本书时，应注意日本配电线路与中国的不同之处，如日本中压架空配电线路的电压等级基本为6.6kV，在20世纪70年代均实施了绝缘化，并大多设有架空地线，柱上配电变压器设置较为密集，低压架空配电线路供电半径较小等。

北京电力公司陈光华高工对本书译稿的内容及用词进行了细致、严谨的审核，提出了许多极为宝贵的意见，在此向陈光华高工表示衷心的感谢。在本书的翻译过程中，还得到了中国电力科学研究院张祖平教授、杜澍春先生，北京电力公司张文军工程师，日本高压电气公司郑为群、中根正喜先生等专家的大力支持

与帮助，在此一并感谢。

由于译者水平有限，错误和疏漏在所难免，恳请读者和各方面专家批评指正。

译 者

2008 年 3 月

目 录



前言

译者的话

第 1 章 与配电线路有关的雷现象 (1)

1.1 雷云的产生和落雷频度 (1)

1.2 雷放电过程 (6)

1.3 雷电流的特性 (8)

1.4 雷击距离 (11)

议题 雷电流波形的测量方法 (13)

第 2 章 配电线路上产生的雷电过电压 (14)

2.1 威胁配电线路的雷电过电压的种类 (14)

2.2 直击雷 (16)

2.3 感应雷 (18)

2.4 逆流雷 (22)

议题 使用照相机观测雷击情况 (23)

第 3 章 配电设备的绝缘特性 (25)

3.1 6.6kV 配电线路的绝缘设计和防雷设计的
考虑方法 (25)

3.2 绝缘特性的定义 (26)

3.3 绝缘子和设备的绝缘特性 (27)

3.4 绝缘子和设备的电压-时间 ($U-t$) 特性 (27)

3.5 绝缘子等串联连接时的绝缘强度 (29)

3.6 木横担的绝缘强度 (30)

3.7 短尾波的产生和绝缘子的闪络特性 (31)

第4章 配电线路的雷害情况..... (33)

4.1 雷电事故率的变迁 (33)

4.2 各类设备的雷害状况 (35)

4.3 防雷设备的应用效果 (36)

4.4 雷电事故的发生机理 (38)

议题 查找多个遭受雷害的设备 (42)

第5章 避雷器的效果..... (43)

5.1 避雷器的效果 (43)

5.2 避雷器的性能 (44)

5.3 避雷器的种类和特性 (47)

5.4 避雷器的保护范围 (50)

5.5 避雷器的接地 (51)

5.6 避雷器抑制感应雷电压效果 (51)

5.7 避雷器对直击雷的效果 (55)

议题 直击雷对策兼感应雷对策 (59)

第6章 架空地线的效果..... (60)

6.1 架空地线抑制感应雷电压效果 (61)

6.2 防止雷直击相导体和配电线路的直击雷频度 (72)

6.3 利用架空地线防止逆闪络 (76)

6.4 防止避雷器烧损 (80)

第7章 避雷器和架空地线同时使用的效果..... (82)

7.1 避雷器和架空地线同时使用的发展情况 (82)

7.2 避雷器和架空地线同时使用时抑制感应
雷电压效果 (84)

7.3 防直击雷闪络效果 (93)

7.4 架空地线对防止避雷器烧损的作用 (98)

议题	架空地线对感应雷、直击雷、逆流雷的效果	··· (100)
第 8 章	柱上变压器的雷害对策	····· (101)
8.1	柱上变压器的雷害情况	····· (101)
8.2	急剧雷电冲击引起线圈层间击穿破坏	····· (102)
8.3	避雷器接地线长度的影响	····· (103)
8.4	避雷器间隙的影响	····· (105)
8.5	柱上变压器的雷电冲击响应特性	····· (105)
8.6	柱上变压器防雷保护对策归纳和今后的课题	····· (107)
8.7	高压熔丝熔断的对策	····· (108)
第 9 章	绝缘导线的雷击响应特性	····· (109)
9.1	绝缘导线的断线机理和熔断特性	····· (109)
9.2	绝缘导线和绝缘子组合的绝缘特性	····· (110)
9.3	雷对绝缘导线和架空地线的放电特性	····· (112)
第 10 章	配电线路雷害对策方法的选定法	····· (117)
10.1	雷害对策方法概述	····· (117)
10.2	应用避雷器和架空地线的基本方法	····· (118)
10.3	配电线路雷电闪络发生率预测计算方法	····· (122)
10.4	雷电闪络发生率的评价	····· (124)
10.5	配电线路雷电闪络发生率预测 计算方法的特殊性	····· (127)
10.6	雷电波形和周围构筑物的影响	····· (128)
10.7	配电线路雷害综合对策效果计算程序方案	····· (131)
10.8	有关降低配电线路雷害对策成本的方法	····· (133)
议题	雷害对策对象的雷电冲击	····· (136)
第 11 章	冬季雷的特性和防止向山顶负荷供电配 电线路的雷害	····· (137)
11.1	向山顶负荷供电配电线路雷害的 雷现象和环境	····· (137)

11.2	向山顶负荷供电配电线路的雷害情况·····	(139)
11.3	向山顶负荷供电的配电线路有效的 雷害对策方案·····	(145)
11.4	雷害对策归纳·····	(150)
附录	行波·····	(152)
后记	·····	(155)
参考文献	·····	(157)



与配电线路有关的雷现象



1.1 雷云的产生和落雷频度

1.1.1 雷云的产生

雷云为雷放电的起源，其产生需要有大规模、强烈的上升气流。在教科书上多见雷仅以强日照、高湿度为产生条件的描述。而实际上，在周围大气比上升气团温度低的情况下，可产生上升气流并持续；在周围大气比上升气团温度高的情况下，上升气流不能稳定并继续发展。

这样，大气不稳定成为雷云产生的条件。在日本，作为形成这种对流圈不稳定层的代表，有北川先生所举出的以下两种情况：

(1) 夏季高温多湿的小笠原气团（夏季在西太平洋中高气压的中心）占据大气下层，同时寒冷的干燥大气涌入大气下层时；

(2) 冬季，西伯利亚气团平流到相对高温的日本海上，接近本州沿岸时。

积乱云在云层厚度达到 8000m 以上时，在该云中有强烈的上升气流。对于雷云是如何带电的一种具有代表性的说法是：在上升气流中，由于大的霰和小的冰粒冲突，分别产生正电和负电。大的霰中带负电，落到下方，正电随小冰粒由上升气流运送到上方。

在夏天通常的雷云中，上部存储正电荷，下部存储负电荷。



下部的负电荷向大地放电的现象就是落雷，即对地放电。

1.1.2 年雷电日

为了大致掌握落雷频度，一般采用各地区年雷电日。

图 1-1 是根据以纬度、经度间隔分别为 $15'$ （日本大致为 $25 \times 27.5\text{km}$ ）划分的区域内年雷电日分布图作成的等雷电日线图^[1.2]。该年雷电日分布图（IKL 图，Isokeraunic Level Map）是 1954 ~ 1963 年 10 年间平均的观测结果。由此可知，自关东北部、岐阜县、琵琶湖周围、北陆，到东北日本海沿岸、九州南部等地域雷电频繁发生，有的地方还达到了 35 日以上。

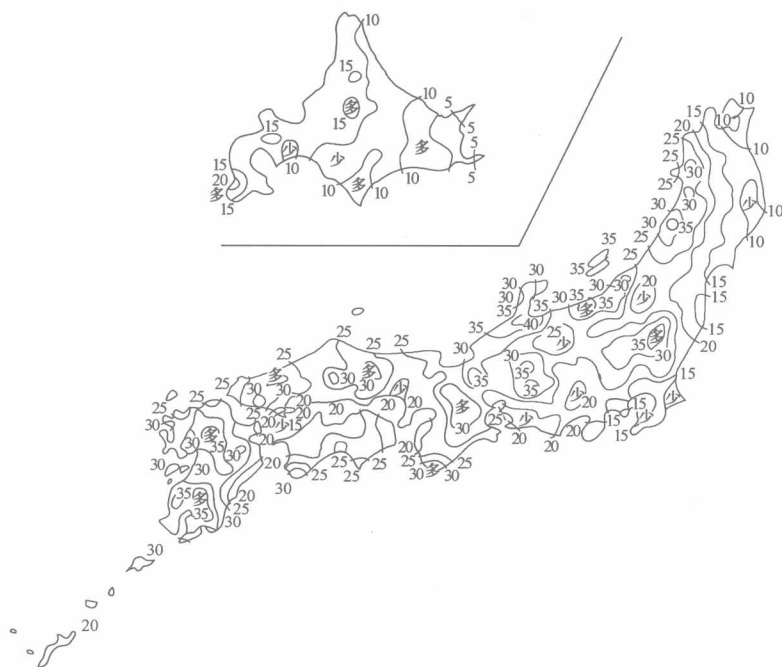


图 1-1 年雷电日分布图（1954 ~ 1963 年，10 年平均）

日本海沿岸从秋田县到福井县, 当年 10 月 ~ 次年 2 月, 雷电多发生。

1.1.3 雷电日和大地雷击密度

在某地建设配电线路时, 通常要考虑遭受何种程度雷的威胁与该地区落雷频度。在日本, 设年雷电日为 T_d , 多采用式 (1-1) 计算大地雷击密度。

大地雷击密度为

$$N_g = 0.1 \times T_d (\text{次}/\text{km}^2 \cdot \text{年}) \quad (1-1)$$

1.1.4 雷电定位系统

1970 年末, 美国开发了通过检测电磁波、从远处进行落雷位置定位的装置, 得到了广泛的应用。现在使用的定位系统, 有以检测磁场方向为原理的系统, 还有以测量到达的电磁波的时间差为原理的系统。

1. 落雷定位测量装置的动作原理^[1.3]

在第 1 章第 1.2 节中所示的雷放电过程中, 由于回击自地面向雷云流动所产生的磁场在地表面与大地平行的成分占大部分, 故可通过具有与大地垂直面的环形天线, 检测由雷放电产生的电磁波的磁场成分。

由于环形天线的输出依赖于水平磁场的方向, 故可使用呈正交的 1 组环形天线, 可从其输出测出由落雷产生的电磁波到来的方向。将可测出落雷到来方位和到来时间的 1 组正交环形天线等构成的检测装置称为 DF (落雷方位测量装置)。由各 DF 通过专用通信线路, 向落雷点分析装置传送信息。

通过参照相距 100 ~ 200km 的 DF 接收到的信号时间, 组合判定来自同一雷放射源的两个以上信号, 求出落雷位置。

2. 测量范围

由于落雷定位测量装置是以雷放电产生的电磁波的地面波为测量对象, 因相距数百千米, 从电离层反射过来的空间波的影响



变大,故实际应用的可定位距离为 500km 左右。而对于过大的输入,由于放大器饱和,有时不能处理近距离的落雷数据。但是,若增加形成网络的 DF,该问题即可解决。

3. 定位误差

在仅将电磁波的到达方位用于定位的旧型系统中,由于 DF 周围的地形和附近的金属物体的存在,电磁波散乱,会产生磁场方位的测量误差。因此,天线设置点必须设置在地形平坦、附近障碍物少的地方。

4. 到达时间差法的定位原理^[1.4]

在雷电定位系统中,存在到达时间差法这一与测量落雷方位方法原理不同的系统。在该系统中,观测 3 点以上因雷放电引起的电磁波,根据其到达时间进行雷放电位置的定位。

5. 雷电定位系统的设置情况

雷电定位系统存在价格高、因需要通信线路而使运行成本高的缺点。但是,由于用 1 个系统可了解大范围的雷雨活动情况,故若能在尽可能广的范围统一运行系统,在成本和精度方面将更为有利。在日本,各电力公司在每个地区均运行着雷电定位装置。此外,民间的气象服务公司也自 1997 年在全日本开展应用本系统。而在美国,已经构筑了 NLDN (National Lightning Detection Network) 这一覆盖全国的系统^[1.5,1.6]。在该系统中,用同一分析装置处理来自所有传感器的信号。

6. 通过雷电定位系统测得的日本落雷频度图

由日本主要电力公司参加的、(财)电力中央研究所主办的防雷设计委员会,汇总了由各电力公司获得的 1992 ~ 2001 年的落雷数据^[1.7]。

图 1-2 所示为各地区年平均落雷频度图。由图 1-2 可知,在夏季(4~10 月)和冬季(11 月~次年 3 月),雷多的地区完全不同。尤其是冬季,北陆地区和东北地区的日本海侧落雷多。

此外，在图 1-3 中，示出了每年日本落雷数的变化，即使日本全国的落雷值，多的年份和少的年份之间也有 5 倍左右的差。如果以地区来对比，该差值将更大。

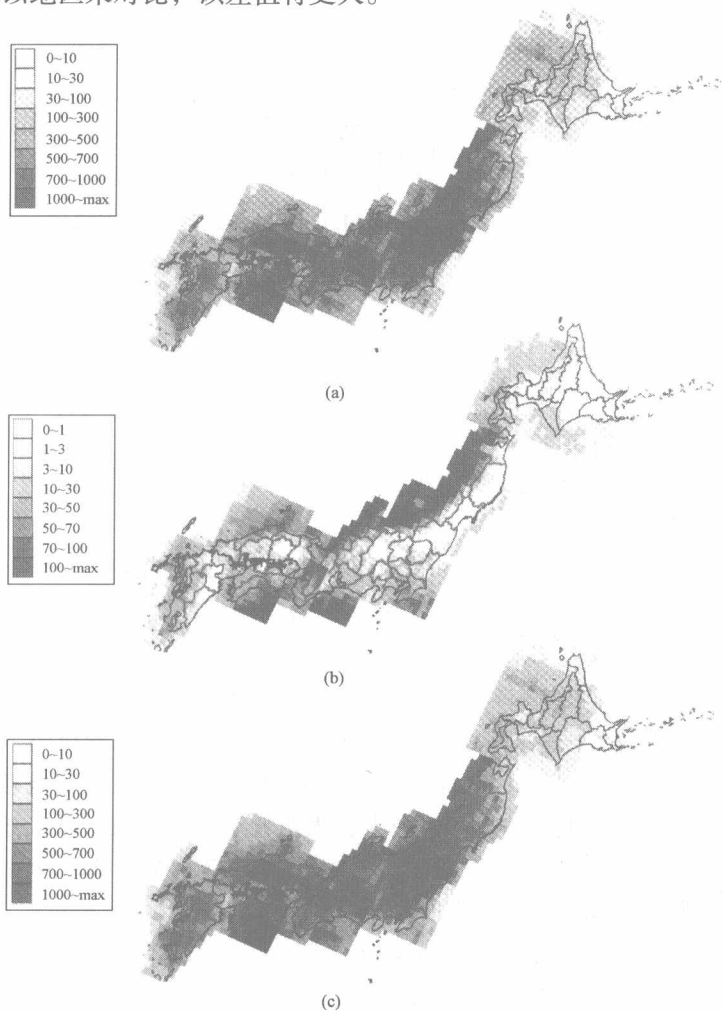


图 1-2 从 1992 年到 2001 年落雷频度图
(a) 夏季; (b) 冬季; (c) 全年

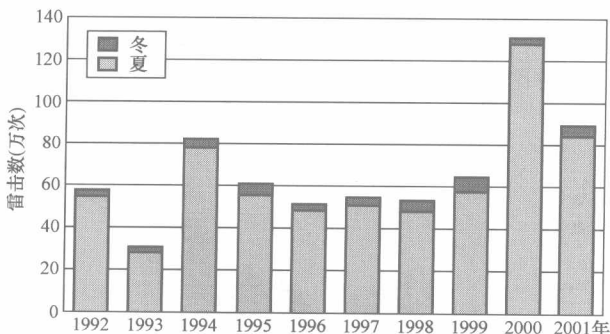


图 1-3 年落雷数的变化情况 (日本)



1.2 雷放电过程

1.2.1 负极性对地雷放电的过程

雷放电大致分为:

- (1) 在一片云中或两片雷云之间发生的云间放电;
- (2) 在雷云下部的电荷和由此感应到地面的电荷之间发生的对地雷放电, 即落雷。

雷放电如图 1-4 (a) 所示, 1 条闪电光形如奔跑, 若按时间顺序来看负极性对地雷放电, 首先从雷云阶梯状先导放电 (梯式先导: stepped leader) 出发, 反复跃进与间歇, 当其前端接近大地时, 从大地侧向上回闪放电, 当两者刚一结合时, 从大地大量电荷经先导放电路径向雷云行进, 将其称之为回击。闪电光强、辉度大的雷鸣在回击时产生。

以下, 对梯式先导和回击的发展过程进行说明。

(1) 梯式先导跃进 50m 左右就间歇 30 ~ 90 μ s, 接着又反复跃进和间歇。这样, 一边反复阶梯状跃进, 一边逐渐接近大地, 其平均跃进速度为 1.5×10^5 m/s 左右, 若假设雷云电荷的高度为

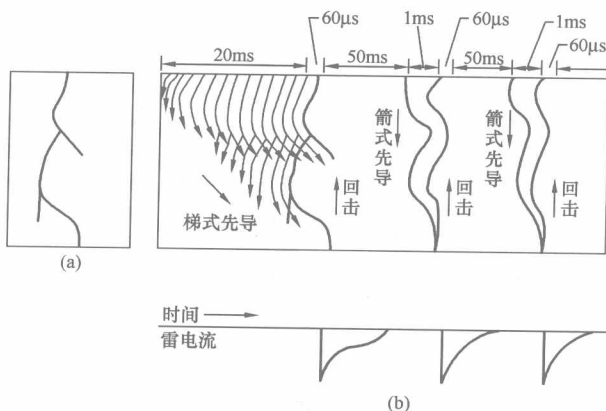


图 1-4 多重雷放电的时间过程

(a) 雷放电闪电光形图；(b) 雷放电的发展过程及雷电波形

3km, 则到先导放电的前端接近大地时, 如图 1-4 (b) 所示, 约需 20ms。

(2) 梯式先导的前端一接近大地, 其垂直下方大地周围的电场强度就变大, 从地面物体 (构筑物、树木、输配电线路等) 向梯式先导前端产生向上的放电, 若其中之一与梯式先导的前端结合, 则变成实际连接大地电位, 转为回击。该梯式先导最终阶段的跃进距离, 因接近先导路径前端的电荷量及对地电压而异。

(3) 回击一开始, 梯式先导和反极性的电荷就从大地向雷云沿梯式先导开拓的放电路径行进, 中和先导上的电荷及雷云电荷的一部分。该回击所需要的时间为数十至上百微秒。

(4) 至此, 一次雷放电结束, 由于雷云的导电率比较小, 一次回击往往不能中和雷云的全部电荷, 若干时间 (数十至数百毫秒) 后, 大多继续通过同样路径产生第 2、第 3 次放电, 将此称为多重雷。雷放电中, 伴随两次以上放电的有 60% ~ 70% 左右, 多重雷的持续时间也有超过 1s 的。另外, 将梯式先导的最