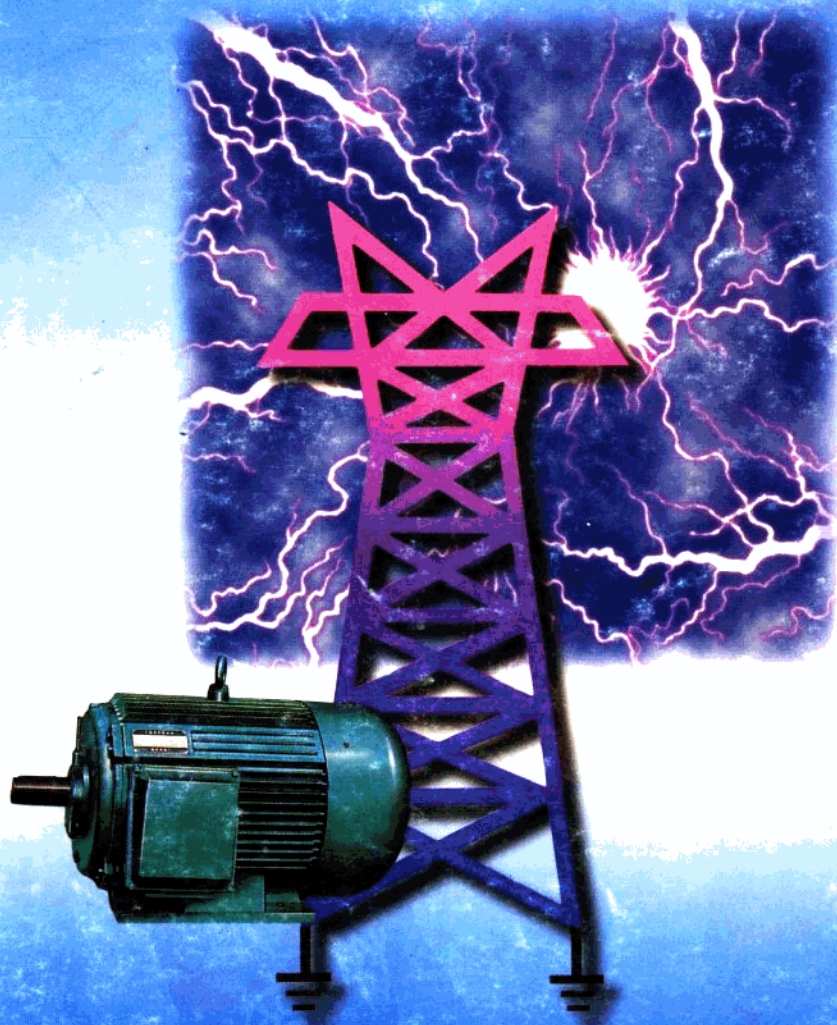


防雷接地及 电机技术文集

王洪泽 等著



广西民族出版社

防雷接地及电机技术文集

王洪泽 等著

广西民族出版社

防雷接地及电机技术文集 王洪泽 等著

责任编辑 黄玉群

封面设计 玉荣奖

技术设计 蓝剑风

出 版 广西民族出版社

经 销 广西新华书店

印 刷 广西地质印刷厂

开 本 787×1092 1/16

印 张 22.25

字 数 450千字

版 次 1997年5月第1版 1997年5月第1次印刷

印 数 1~2000册

ISBN 7-5363-3281-5/I·868 定价:35.00元

前 言

本书汇集的文章都是在国内出版的《高电压技术》、《电力技术》、《中国电力》、《电工技术》、《电力建设》、《低压电器》、《大电机技术》、《华东电力》、《湖南电力技术》、《广西电力技术》和《广西电力工程》等专业期刊上发表过的。其中,有些论文曾获得了国家级、省级科研论文奖,如:《复合接地网接地电阻的简化计算》获中国华城信息网络科技成果二等奖,《计算水平地网接地电阻的新公式》、《同步发电机转子励磁电流的解析算法》、《计算接地网均压带总长度的新方法》获广西电机工程科研论文一等奖,《关于接地短路电流持续时间选择问题》、《关于山区输电线路雷击跳闸率的计算问题》、《设计均压接地网的新方法》等七篇获广西电机工程科研论文二等奖,还有十多篇获三等奖。有些在国内产生了良好的影响。例如:《实用节电技术》(中国科学技术大学出版社1990年出版)和《现代电力工程师技术手册》(天津大学出版社1994年出版)等书先后介绍了作者的一些研究成果。《计算水平地网接地电阻的新公式》这篇论文中所提出的新公式,得到了我国著名学者武汉水利电力大学解广润教授和陈慈萱教授的充分肯定。在他们编写的高等学校教材《电力系统接地技术》一书中(水利电力出版社1991年出版),还详细地介绍了新公式的推导思路。

1996年,电力部组织制订的国家技术标准《交流电气装置接地设计规范》也收录了上述新公式。

《最新科技成果信息评价》专刊把《复合接地网接地电阻的简化算法》和《复合接地网最大接触电势的解析算法》等列为最新科技成果并摘要地介绍和传播。

广西大学电气工程系梁弘毅教授对《同步发电机转子励磁电流的解析算法》给予充分肯定,他在讲授用经典的保梯作图法求发电机的转子励磁电流时,也向学生介绍我们提出的解析算法。

在此,我们真诚地向解广润、陈慈萱等上述教授、专家及有关期刊、出版社的编辑们表示衷心的感谢。

现在出版这本文集,一方面是为了对过去三十多年来的探索性研究工作做一个阶段性的总结;另一方面是为了促进科技成果信息的传播和交流,便于海内从事防雷接地及电机技术工作的科技人员、教学和研究参考。

本书在汇集和出版过程中,得到了广西电力基建科技信息中心站杨水陆主任、广西钢铁设计院卢仕政院长、广西电力勘察设计研究院送变电室熊维邦主任、广西大学自动化研究所肖仁山所长、广西社会科学院东南亚研究所罗桂友副所长、广西电机工程学会叶涟远秘书长、广西电力工业局中心调度所唐能敏总工程师、广西电力开发公司蒋昌民总工程师、柳州供电局伍蔚繁局长、河池电业局王天林局长、南宁发电设备总厂戴渝厂长和广西电力发展总公司工程部王耀光高级工程师的大力支持;广西电力勘察设计研究院王桂林收集和整理了全部书稿,在此,一并致谢。

由于水平所限,书中难免会出现差错或欠妥之处,深盼广大读者发现后不吝赐教。

作 者

1996年12月于南宁

目 录

第一篇 防雷技术

关于山区输电线路雷击跳闸率的计算问题	王洪泽(1)
关于山区输电线路雷电绕击的两个问题	王洪泽(8)
导线和地面临界电场强度不相同雷电最大击距的计算公式	王洪泽(14)
对西南线的一次雷击事故的调查分析	谭济滨 王洪泽(19)
100kA 大雷电流绕击西南线可能性问题的论证	王洪泽(26)
对经升压变压器送电的发电机防雷问题的探讨	王洪泽(33)

第二篇 接地网接地电阻计算及降低接地电阻的方法

计算接地网接地电阻的一种公式	王洪泽(39)
计算水平地网接地电阻的新公式	王洪泽(49)
再论计算接地网接地电阻的一种公式	王洪泽(55)
矩形地网接地电阻的简化计算公式	王洪泽(62)
计算任意形接地网接地电阻的新公式	王洪泽(69)
计算复合接地体接地电阻的新公式	王洪泽(76)
计算复合接地网接地电阻的简易公式	王洪泽(80)
复合接地网接地电阻的简化计算	王洪泽(86)
论规程中接地网接地电阻简易计算公式的误差及其应用条件	王洪泽(91)
从程控用户交换机的接地设计看利用系数法的局限性	王洪泽(97)
关于等间距与不等间距均压接地网的接地电阻问题	王洪泽(105)
两层结构的土壤中接地网电阻的简化算法	王洪泽(110)
用磷石膏降低输电线路杆塔接地电阻的工程	齐名德(120)
多石地区深孔接地降低变电站地网接地电阻的研究
.....	王洪泽 黄家焕 韦巍 李明贵 杨明志 陆伟兴(125)

第三篇 接地网接触电势与跨步电势的计算方法

论变电站接触电势的计算问题	王洪泽(135)
计算水平地网接触电势的新公式	王洪泽(141)
计算复合接地网接触电势的新公式	王洪泽(149)

论美国 IEEE 标准 80 中的地网接地电阻、接触电势和跨步电势的新公式·····	王洪泽(157)
GROUND 接地系统数值分析软件包开发研究·····	
·····	李世作 梁小冰 肖仁山 王洪泽 黄家焕(166)
复合接地网最大接触电势的解析算法·····	王洪泽(175)

第四篇 接地网设计及其接地电阻的测量

关于接地短路电流持续时间选择问题·····	王洪泽(181)
计算接地网均压带总长度的新方法·····	王洪泽(184)
设计均压接地网的新方法·····	王洪泽(190)
对一个变电站不等间距接地网设计经济效益的重新估价·····	王洪泽(200)
接地电阻测量方法研究·····	王洪泽(206)
复杂接地系统接地电阻测量方法的简化·····	王洪泽(223)
发电厂和变电站接地网电阻的测量问题·····	王洪泽 顾南峰(231)

第五篇 电机技术

发电机三相电流不平衡时负序电流近似计算的研究·····	王洪泽(238)
同步发电机转子励磁电流的解析算法·····	王洪泽(254)
发电厂可用无功功率的预计·····	王洪泽(263)
同步发电机调整特性的解析算法·····	王洪泽(272)
同步发电机运行特性的解析计算问题·····	王洪泽(276)
关于按负载特性计算同步电机励磁电流及其损耗的研究·····	王洪泽(283)
再谈按产品目录的数据计算异步电动机的工作特性·····	王洪泽(293)
三相异步电动机空载电流的经验公式·····	王洪泽(297)
异步电动机有功功率损耗和无功功率的分析计算·····	王洪泽(300)
三相异步电动机断相运行临界中性点位移电压的分析计算·····	王洪泽(307)
关于电动机零序电压保护装置整定计算方法的研究·····	王洪泽(313)
稀土永磁无刷直流电动机的设计研究·····	周元芳 肖仁山 梁京章 李世作(320)

第六篇 防雷接地专题综述

输电线路避雷线防雷保护特性的计算·····	王洪泽(326)
计算机系统的接地及抗干扰问题·····	王洪泽(335)

第一篇 防雷技术

关于山区输电线路雷击跳闸率的计算问题

王洪泽

提要 此文对山区输电线路雷击跳闸率的计算问题进行了分析,指出现行《电力设备过电压保护设计规程》(以下简称《规程》)推荐的参数计算值在某些情况下比实际运行值偏低的原因是由于所推荐的山区线路雷击次数的计算值偏低所致,并不是由于绕击率计算值偏低所造成。此文还根据 E·R·Whitehead 等人所提出的关于避雷线屏蔽分析的“电气几何模型”理论,给出了山区线路雷击次数的修正计算公式及验证计算实例。

1 引言

运行经验表明:我国南方多雷区单避雷线输电线路的雷击跳闸率普遍比现行《规程》所推荐的参考计算值高^[1]。例如,统计了广西 100kV 单避雷线输电线路 7513km·a,其雷击跳闸次数为 405,雷击跳闸率为 5.42 次/100km·a,折合到标准雷电日,则为 2.70 次/100km·40 雷日,统计了福建省 110kV 单避雷线输电线路 2080km·a,其雷击跳闸次数为 158,雷击跳闸率为 7.5 次/100km·a,折合到标准雷电日为 4.4 次/100km·40 雷日^[2],其中,有的线路的雷击跳闸率竟高达 5.85 次/100km·40 雷日。

关于山区输电线路雷击跳闸率比《规程》参考计算值偏高的原因,目前还没有统一的认识。一种观点认为,由于山区土壤电阻率高,杆塔工频接地电阻比平原的高,因而冲击接地电阻偏高。当线路绝缘水平相同时,山区线路的反击跳闸率将增大。另一种观点认为,由于山区坡度大,降低了避雷线的有效屏蔽作用,即相当于避雷线对导线的保护角增大,从而使雷电绕过避雷线直击于导线的可能性增大。

从某种意义上说,上述观点是正确的。但还不足以说明雷击跳闸率参考计算值偏低的主要原因。本文的分析和计算表明,《规程》推荐的线路雷击次数值偏低的主要原因可能是雷击跳闸率参考计算值偏低。

2 关于线路雷击次数的分析

对年平均雷电日为40的地区,每100km 线路遭受的雷击次数,《规程》推荐按下式计算^[1]:

$$N = \frac{W}{1000} \times 100 \times 40\gamma = 4\gamma W = 40\gamma h_b \quad (1)$$

式中 N ——线路雷击次数(次/100km·40雷日);

$W=10h_b$ ——线路等值受雷宽度(m);

$h_b=h-\frac{2}{3}f_s$ ——避雷线平均高度(m);

h ——杆塔高度或避雷线在杆塔上的高度(m);

f_s ——避雷线弧垂(m);

γ ——地面落雷密度,即每一雷日每 km^2 对地落雷次数。

一般情况下,《规程》推荐取 $\gamma=0.015$,于是,公式(1)可变为:

$$N=0.6h_b(\text{次}/100\text{km}\cdot 40\text{雷日}) \quad (2)$$

前苏联学者推荐按下式计算^[3]:

$$N=4h_b(\text{次}/100\text{km}\cdot 100\text{雷日})=1.6h_b(\text{次}/100\text{km}\cdot 40\text{雷日}) \quad (3)$$

美国学者推荐按下式计算^[4]:

$$N=0.63h+1.26h_g+0.47D \quad (4)$$

式中 N ——线路雷击次数(次/100英里·100雷日);

h ——杆塔或避雷线在杆塔上的高度(英尺);

h_g ——避雷线档距中央对地高度(英尺);

D ——两根避雷线的间距(英尺),当单避雷线时, $D=0$ 。

为了和公式(2)、(3)比较,我们把公式(4)变成下列形式(式中, h_b 和 D 的单位为m,推导从略):

$$N=1.55h_b+0.38D(\text{次}/100\text{km}\cdot 40\text{雷日}) \quad (5)$$

对单避雷线而论,美国、前苏联所采用的线路等值宽度($4h_b$)比我国的($10h_b$)小60%,但比较公式(2)、(3)和(5)可见,前苏联估算的雷击次数比我国的大1.7倍,美国的比我国的大1.58倍以上。从定性上看,这结果是不符合实际的,因为前苏联的雷电日比我国少,而美国的纬度和雷电日与我国的接近。从公式(2)来看,《规程》 N 值偏低的原因,可能是《规程》推荐的地面落雷密度值偏低所致。

3 关于地面落雷密度的分析

比较一下《规程》的地面落雷密度和国外的落雷密度是有意义的。因为国外采用的线路等值宽度(或引雷宽度)为 $W=4h_b$ (对单避雷线而言),为便于比较,可将公式(1)变成下列形式:

$$N=40\gamma h_b=\frac{10\gamma}{4}\cdot 40(4h_b)\cdot 10^{-1}=\gamma'T_dW\cdot 10^{-1}=N_gW\cdot 10^{-1} \quad (6)$$

式中 $N_g=\gamma'T_d$ ——地面落雷次数(次/ $\text{km}^2\cdot\text{a}$);

T_d ——年平均雷电日(取40雷日/年);

$\gamma'=2.5\gamma=0.0375$ ——地面落雷密度(次/ $\text{km}^2\cdot\text{雷日}$)。

同样,可把公式(3)变成下列形式:

$$N = 1.6h_b = 0.1T_d W \cdot 10^{-1} = N_g W \cdot 10^{-1} \quad (7)$$

其中 $N_g = \gamma' T_d = 0.1T_d$, $\gamma' = 0.1$ 。

公式(5)如不计 0.38D,则可变成下列形式:

$$N = 1.55h_b = 0.097T_d W \cdot 10^{-1} = N_g W \cdot 10^{-1} \quad (8)$$

其中 $N_g = 0.097T_d$, $\gamma' = 0.097$ 。

E·R·怀特黑德推荐 Maxwell 等的研究成果并经 Cianos 和 Pierce(1972 年)加以说明的关系式^[5](注意,文献 5 的公式(56)排版有误):

$$N_g = 0.04T_d^{1.35} = 0.04T_d^{0.35} T_d = \gamma' T_d \quad (9)$$

其中 $\gamma' = 0.04T_d^{0.35}$, 当 $T_d = 40$ 雷日时, $\gamma' = 0.145$ 。

分析结果表明:《规程》推荐的地面落雷密度比国外的低 62.5%~74%。

《规程》所采用的地面落雷密度值偏低的可能性是存在的。因为在统计落雷密度时,雷击总次数是根据线路杆塔上安装的磁钢棒实测记录按 km·a 比例并折算到 40 雷日,再考虑到避雷线或杆塔的平均高度求得的。由于磁钢棒安装得不够及时,数量也不够充分,雷击总次数就可能偏小^[6]。此外,由于磁钢棒安装后拆卸不及时,一个磁钢棒可能多次受雷,而在检测时有可能只检测出其中的一个雷电流值,这也可能使统计的线路雷击总次数减少,导致换算出的地面落雷密度偏小。反之,由公式(1)算出的线路雷击次数就可能偏小,从而导致计算的线路雷击跳闸率偏低。

4 雷击跳闸次数修正算法初探

在山区,由于地形变化,线路杆塔或避雷线的平均高度实际上比平原的增大了。在计算山区线路雷击次数或雷击跳闸率时,仍用计算平原地区避雷线的平均高度的方法,就有可能造成雷击次数或雷击跳闸率的计算值偏低。

E·R·怀特黑德等人提出的避雷线屏蔽的“电气几何模型”,对山区线路避雷线平均高度和导线平均高度受到的地形影响,给予了充分的考虑。

本文试图应用怀特黑德的几何模型理论的某些结果来修正我国山区线路雷击跳闸次数的计算公式。

按照怀特黑德的几何模型理论,导线的平均高度可由地形图计算得到,或者按下面的关系式来估算^[5]:

$$\text{平原} \quad Y_l = h_c - \frac{2}{3} f_c \quad (10)$$

式中 h_c ——杆塔上导线悬挂点的高度(m);

f_c ——导线弧垂(m);

Y_l ——平原线路导线的平均高度(m)。

$$\text{丘陵} \quad Y_r = h_c \quad (11)$$

式中 Y_r ——丘陵地带线路导线的平均高度(m)。

$$\text{山区} \quad Y_m = 2h_c \quad (12)$$

式中 Y_m ——山区线路导线的平均高度(m)。

当一条线路有平地、丘陵和山区时,则混合线路导线的平均高度 Y (m)可按下式计算:

$$Y = \delta_1 Y_1 + \delta_r Y_r + \delta_m Y_m \quad (13)$$

式中 δ_1, δ_r 和 δ_m ——分别为平原、丘陵和山区段占全线路的百分比(%); $\delta_1 + \delta_r + \delta_m = 1$ 。

显然,公式(10)、(11)和(12)是公式(13)的特殊情况。

在各种地形情况下,混合线路避雷线的平均高度 H (参见图1)可按下式计算:

$$H = Y + b \quad (14)$$

而

$$b = h - h_c + \frac{2}{3}(f_c - f_s)$$

式中 h ——杆塔上避雷线悬挂点的高度(m);

f_s ——避雷线弧垂(m)。

对平原线路而论, $\delta_1 = 100\%$, $\delta_r = \delta_m = 0$,由公式(13)和(14)可得避雷线的平均高度为:

$$H = h - \frac{2}{3}f_s = h_0 \quad (15)$$

式中 h_0 ——按我国《规程》推荐的计算方法计算的避雷线平均高度(m)。

对山区线路而论, $\delta_1 = \delta_r = 0$, $\delta_m = 100\%$,由公式(13)和(14)可得避雷线的平均高度为:

$$H = h + h_c + \frac{2}{3}(f_c - f_s) \quad (16)$$

考虑到 $\frac{2}{3}(f_c - f_s) \ll h + h_c$,为了简化计算,我们忽略上式右边的第三项,这样一来,山区线路避雷线的平均高度可用下列近似公式估算:

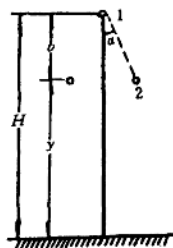
$$H \approx h + h_c \quad (17)$$

《规程》所推荐的线路雷击次数计算公式,对平原线路来说还是可以接受的。但对山区线路来说,由于地形的变化,线路杆塔或避雷线的平均高度实际上比平原的增大了,因而它所遭受的雷击次数也增大了。如果仍应用公式(2)来计算山区线路的雷击次数,就可能偏低。这有可能是《规程》推荐计算法得出的雷击跳闸率比一些山区线路的运行数值偏低的原因之一。

E·R·怀特黑德等人提出的几何模型,虽然是用来分析避雷线的有效屏蔽作用的,但是本文认为,把避雷线的平均高度随地形变化而变化的这一原则用于线路雷击跳闸次数的分析应当是可以尝试的。这样,我们就可以用 H 来代替公式(2)中的 h_0 ,从而得出修正的雷击次数公式为:

$$N = 0.6H(\text{次}/100\text{km} \cdot 40 \text{雷日}) \quad (18)$$

$$\text{对平原} \quad H = h - \frac{2}{3}f_s = h_0 \quad (19)$$



1—避雷线 2—导线

图1

$$\text{对山区} \quad H = h + h_c + \frac{2}{3}(f_c - f_s) \approx h + h_c \quad (20)$$

对于平原、丘陵和山区混合线路，避雷线的等效平均高度由下式计算：

$$H = h + (\delta_1 + \delta_i + 2\delta_m - 1)h_c + \frac{2}{3}[(1 - \delta_1)f_c - f_s] \quad (21)$$

5 修正计算公式的验证

由于雷击线路次数具有随机性，且取决于一系列其他因素，目前国外的参考计算公式种类繁多，很难找到一个大家所公认的“标准”作为比较的依据。因此，本文取美国、前苏联最流行的实用计算公式(3)和(5)作为参考计算的依据。

如110kV山区双杆线路，取典型参数 $h = 16\text{m}$ ， $f_c = 5.3\text{m}$ ， $h_c = 12.2\text{m}$ ， $f_s = 4\text{m}$ ， $D = 3.75\text{m}$ 。其线路的雷击次数为：

由公式(20)得(考虑到 $h_b = 16 - \frac{2}{3} \times 4 = 13.3(\text{m})$ ：

$$H = 16 + 12.2 + \frac{2}{3} \times (5.3 - 4) = 30(\text{m}) = 2.27h_b$$

由公式(18)得线路雷击次数为：

$$N = 0.6 \times 2.27h_b = 1.36h_b$$

由公式(5)得(考虑到 $D = 3.75\text{m} = 0.28h_b$)：

$$N = 1.55h_b + 0.38 \times 0.28h_b = 1.65h_b$$

前者的计算值比后者(美国)的低17.5%，比前苏联的公式(3)的低15%。

对220kV单杆线路，由公式(18)算出 $N = 1.34h_b$ ，比美国的低13.5%，比前苏联的低16.2%。对220kV双杆线路，算出的 $N = 1.37h_b$ ，比美国的低20.6%，比前苏联的低15%；对110kV单杆线路，算出的 $N = 1.25h_b$ ，比美国的低19.3%，比前苏联的低21.8%。对330kV双避雷线线路(铁塔高30m)的雷击次数用公式(18)计算表明，与前苏联的基本上相同，比美国的低12.2%；对330kV单杆线路(铁塔高37m)，计算的 N 值比前苏联的低16%，比美国的低11.9%。

以上的验算表明：用公式(18)计算山区线路的雷击次数还是可以接受的，因为它与美国、前苏联现行的实用算法相差不大。

为了进一步检验公式(18)的适用性，我们再用 H 代替 h_b 计算雷击跳闸率。首先将线路雷击跳闸率公式改写成下列形式：

$$n = 0.6H\eta(gP_1 + P_2) \quad (22)$$

式中 n ——雷击跳闸率(次/100km·40雷日)；

η ——建弧率；

g ——击杆率；

P_1 ——绕击率；

P_1 ——超过雷击杆塔顶部时耐雷水平的雷电流概率；

P_2 ——超过雷绕击导线时耐雷水平的雷电流概率。

如220kV双杆线路， $h = 16\text{m}$ ， $h_c = 12.2\text{m}$ ， $\alpha = 22^\circ$ (避雷线保护角)， $U_{50\%} = 700\text{kV}$ ，冲击接地电阻 $R_{ch} = 15\Omega$ ，其他参数均是《规程》推荐的典型参数。则山区段的雷击跳闸率为：

等效高度用简化公式计算得 $H=16+12.2=28.2(\text{m})$ 。雷击跳闸率为 ($g=1/4, P_1=32\%, P_2=86\%$ 及 $P_3=0.474\%$):

$$n=0.6 \times 28.2 \times 0.85 \times \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{32}{100} + \frac{0.474}{100} \cdot \frac{86}{100} \right) = 1.21 \text{ 次}/100\text{km} \cdot 40 \text{ 雷日}。$$

现行计算求法得 $n=0.57 \text{ 次}/100\text{km} \cdot 40 \text{ 雷日}$; 1972 年修订《规程》时, 调查的运行数据为 $0.94 \text{ 次}/100\text{km} \cdot 40 \text{ 雷日}$ [7], 估计的工频接地电阻为 20Ω , 这与 $R_{ch}=15\Omega$ (通常认为工频接地电阻为 25Ω) 接地电阻值相当。与《规程》推荐的参考计算值比较偏低很多。设计值取负的误差也是不符合实际的, 没有设计余度。考虑到现场统计时, 通常是以一条线路为单元的, 山丘占 60% 以上就列为山区线路, 在计算雷击跳闸率时又无法扣除平原段, 统计值往往有可能偏低。考虑到这种情况, 修正计算值 $1.21 \text{ 次}/100\text{km} \cdot 40 \text{ 雷日}$ 还是可以接受的。

美国爱迪生电气学会 E·R·怀特黑德等人利用寻迹器对 5 条 220kV~345kV 高压和超高压线路进行了实测, 得出这 5 条线路的雷击跳闸率 (统计 $16.930\text{km} \cdot \text{a}$), 如表 1 所示。

各线路的参数见文献 5, 按公式 (18) 和 (20) 计算得出的雷击跳闸率亦列入表 1, 为了比较, 表 1 中也列入用《规程》方法计算的雷击跳闸率 (按山区考虑)。

表 1 美国 5 条高压和超高压线路的实测雷击跳闸率 (统计 $16.930\text{km} \cdot \text{a}$)

线路编号	32 ^a	31 ^b	39 ^c	30 ^e	40 ^f		
额定电压 U_n (kV)	345	345	345	230	220		
铁塔高度 h (m)	43	43	29	28	27		
计算用导线高度 h_c (m)	27	25	16	16	19		
避雷线根数	1	2	2	2	2		
保护角 α (°)	31	22	-15	15	14		
冲击放电电压 $U_{50\%}$ (kV)	1600	1600	1600	1500	1580		
接地电阻 R_g (Ω)	5	5	5	5	5		
铁塔耐雷水平 I (kV)	110	106	168	158	167		
统计 $\text{km} \cdot \text{a}$	1760	1570	5900	3140	4460		
n (次/100km·40 雷日)		5.70	3.44	0.19	0.24	0.09	
计算值	规程	n (次/100km·40 雷日)	2.33	1.11	0.11	0.13	0.10
	本文方法	n (次/100km·40 雷日)	4.42	2.04	0.21	0.24	0.20
		n (次/100km·40 雷日)	3.08	0.61	0	0.057	0.047

注: ①单杆单避雷线垂直排列的双回线路。

②双杆双避雷线垂直排列的双回线路, 跳闸事故中有 67% 发生在中间的一相 (即保护角最大的一相)。

③双杆双避雷线水平排列的单回线路。

从表 1 可见:

- 1) 对于 30 号和 39 号线路, 修正算法所得出的结果与实测值是接近的。
- 2) 对于 31 号和 32 号共杆的双回线路, 公式 (18) 的计算值比实测值偏低。这是符合逻辑的, 因为公式是按单回线考虑的。
- 3) 对于 40 号和 30 号线路, 它们的电压等级, 线路参数和自然环境条件均相当 [5], 用公式

(18)计算的结果,只与30号线路的实测值接近,而比40号线路偏高。这说明雷电闪击具有一定的随机性或分散性。

4)现行《规程》推荐的计算方法的计算值则偏低很多。

美国爱迪生电气学会对这些线路安装寻迹器,进行了八年的观测,寻迹器累计动作167次,共遭受111次雷击。按寻迹器的动作指示统计,有51次为绕击,52次为反击,8次未定。如果排除这8次未定性的雷击跳闸次数,则总的雷击跳闸次数为反击和绕击跳闸次数之和,即103次。绕击跳闸次数占雷击跳闸次数的百分比为 $\frac{51}{103} \approx 50\%$,显然 $\frac{n_2}{n} \approx 50\%$ 。

由本文修正计算值(见表1)可得出 $\sum n = 7.11$, $\sum n_2 = 3.79$,故绕击跳闸率占雷击跳闸率的百分比为 $\frac{\sum n_2}{\sum n} = \frac{3.79}{7.11} = 53\%$,与实测值接近。

怀特黑德的研究结果表明:当杆塔高、保护角大、杆塔接地电阻低时,绕击占主导地位,反击就退居次要地位。

本文计算表明:32号杆塔高(43m)、保护角大(31°)、接地电阻低(5Ω),绕击跳闸率占69.7%,反击跳闸率占29.3%,绕击占主导地位。这反应了怀特黑德的研究结论。也表明《规程》推荐的绕击率 P_1 的计算值是可以接受的。

6 结论

(1)本文给出的雷击跳闸次数修正公式(18)与国外的实用计算公式比较,在山区条件下的计算值是接近的。

(2)《规程》所推荐的线路雷击跳闸率计算值,与国外的实测值比较多数偏低;与国内山区线路的运行数据比较也有偏低的情况。偏低的原因,可能是由于线路雷击次数计算值偏低所致。

参考文献

- 1 电力设备过电压保护设计规程. 水利电力出版社,1979年版
- 2 福建省中试所. 福建省山区110kV线路防雷接地分析与选择.
- 3 H·A·米里尼科夫等著. 330kV~500kV架空输电线路电气部分的设计. 水利电力出版社,1977年11月
- 4 J·G·安德生等著. 超高压输电线路. 西南电力设计院等译. 水利电力出版社,1979年4月
- 5 E·R·Whithead. 输电线路的保护. 王璋译. 高电压技术,1981年第1期
- 6 冯宝亿. 输电线路避雷线屏蔽效果的计算. 高电压技术,1980年第2期
- 7 解广润主编. 过电压及保护. 水利电力出版社

原载《高电压技术》1982年第2期

关于山区输电线路雷电绕击的两个问题

王洪泽

目前,我国 220kV 及 220kV 以上输电线路多采用双避雷线,有些地区也采用单避雷线。但为了节约建设投资,110kV 线路基本上采用单杆单避雷线。多年的运行经验表明,采用单避雷线的山区线路,其雷击跳闸率比较高。为了减少跳闸率,以往多偏重于改善杆塔的接地电阻,架设耦合地线等措施,以提高线路的耐雷水平,即主要是偏重于减少反击的措施,对雷电绕击导线引起的跳闸考虑较少。近十多年来,国外对高压和超高压线路的雷击跳闸率展开了比较系统的现场观测、统计分析和研究,发现雷电绕击导线的跳闸事故占有一定的比例。于是英国的 R·Davis (戴维斯)于 1963 年提出了关于线路屏蔽分析的电气几何模型^[1],即所谓“击距法”。此后,经过各国学者如 D·W·Gilman (吉尔曼)、E·R·Whitehead (怀特黑德)、H·Linck (赖克)和 G·W·Brown (布朗)等人的研究补充,目前已形成一套比较系统的所谓雷电绕击理论。近年来,我国对山区线路的雷电绕击问题也引起了重视,但对一些问题的看法则不尽相同。例如,对山区,尤其是多雷山区单避雷线线路的雷击跳闸率比规程法^[2]计算值偏高的原因,就存在着不同的看法。一些人认为是由于《电力设备过电压保护设计规程》(以下简称《规程》)推荐的方法计算的绕击率值偏低^[3],为此,有人提出了修正意见^[4];另一些人主张用击距法来计算绕击跳闸率^[5],也有人对击距法持慎重的保留意见^[6]。本文提出两点粗浅的看法,供讨论。

1 关于术语“绕击率”的正名问题

关于绕击率,我国的物理意义是:每年雷电绕过避雷线直击于导线的次数对(总的)线路雷击次数(均按单位长度)的比值,可表示为:

$$P_1 = \frac{N_2}{N} \quad (1)$$

式中 N_2 ——每年每单位长度线路的雷绕击次数(次/100km·a 或次/100km·40 雷日);

N ——线路雷击次数(次/100km·a 或次/100km·40 雷日)。

模拟试验及现场实验证明,绕击率与外侧导线保护角 α 有关。《规程》规定绕击率 P_1 (%) 按下列公式计算:

$$\text{对山地} \quad \lg P_1 = \frac{\alpha\sqrt{h}}{86} - 3.9 \quad (2)$$

$$\text{对平地} \quad \lg P_1 = \frac{\alpha\sqrt{h}}{86} - 3.35 \quad (3)$$

式中 h ——避雷线在杆塔上的悬挂高度(m);

α ——避雷线对边导线的保护角(°)。

关于“绕击率”,在美国其缩写词为“SFR”,其物理意义是:每年每单位长度线路上遭受的雷绕击导线的次数,其单位为次/100km·a 或次/100km·40 雷日。

从物理意义上看,美国的“SFR”——“绕击率”显然相当于我国的线路绕击次数 N_2 。

但是,文献 3.5 在论述了我国《规程》的绕击率 P_s ,即本文公式(2)和(3)的不合理之后,介绍美国 G·W·Brown 和 E·R·Whitehead 的击距法时,却把相当于我国线路绕击次数 N_2 的参数“SFR”也叫做“绕击率”。其他某些译文资料也有类似的情况。从技术术语的准确性的观点来看,这是不严格的,不应把“SFR”译作“绕击率”,而应按其物理意义将它译为“线路绕击次数”。这样,就不会与我国《规程》所定义的绕击率 P_s 相混淆。

还有另外一种情况是误将线路绕击跳闸次数(或绕击跳闸率)对(总的)线路雷击跳闸次数(或雷击跳闸率)的比值叫做“绕击率”。

如文献4第三节指出:“按《规程》推荐的方法算出的110kV 山区线路绕击率为0.82%,……但从南方各省运行情况来看,绕击率远大于《规程》附录中推荐的数值。”该文中所论述的南方浙江、广东、广西和福建诸地区的绕击率数值48%、32.1%、30%及40%就是按线路绕击跳闸次数对雷击跳闸(总)次数的比值(%)计算的,而忽略了每100km 线路每年40雷日这一因素。

按《规程》规定,100km 线路每年(40 雷日)的落雷次数为:

$$N=0.6h_b \quad (4)$$

(1)100km 线路每年雷击杆塔(或避雷线)的跳闸次数(反击跳闸率)为:

$$n_1=0.6h_b g \eta P_1 \quad (5)$$

式中 h_b ——避雷线对地平均高度(m);

g ——击杆率;

η ——建弧率;

P_1 ——雷电流超过铁塔耐雷水平的概率(%)。

(2)100km 线路每年雷绕击导线的跳闸次数(绕击跳闸率)为:

$$n_2=0.6h_b P_s \eta P_2 \quad (6)$$

式中 P_2 ——雷电流超过导线耐雷水平的概率(%)。

(3)如果档距中央导、地线间空气距离 s 能满足下述公式,则一般不会出现击穿事故:

$$s=0.012l+1 \quad (7)$$

式中 l ——档距长度(m)。

若符合公式(7)的要求,则100km 线路每年(40雷日)的雷击跳闸总次数(雷击跳闸率)将为:

$$n=n_1+n_2=0.6h_b \eta (gP_1+P_s P_2) \quad (8)$$

由公式(6)和(8)可得:

$$\frac{n_2}{n} = \frac{P_s P_2}{gP_1 + P_s P_2} \neq P_s$$

由上式可知:文献 4 用下式计算绕击率

$$P_s = \frac{\text{绕击跳闸次数}}{\text{雷击跳闸次数}}$$

显然是不正确的。

这样一来,文献 4 按其修正公式计算出的 100m 山顶上的 110kV“上”字形杆单避雷线路的绕击率 $P_s = 20.2\%$ 就不能与上述几条线路的运行数据(48%、32.1%、30%及 40%)作比较,更不能得出与上述几条线路的“运行情况较接近”的结论。

2 关于绕击率的计算问题

文献 4 中指出:公式(3)只反映一般山区。对南方大山区来说,沿线地势起伏大,特别是从一个山顶到另一个山顶架设杆塔的线路,计算 h 时,除考虑杆塔的平均高度外,还应加上山的平均高度。从某种意义上说,这种意见是可取的。

在这种情况下,文献 4 给出绕击率的修正计算公式:

$$\lg P_s = \frac{\alpha\sqrt{H}}{86} - 3.35 \quad (9)$$

$$\text{而} \quad H = h + \frac{2}{3}(h_m - f_s) \quad (9-1)$$

式中 h_m ——山本身的高度(m);
 f_s ——避雷线的弧垂(m)。

从物理意义上说,修正公式(9)存在着下列缺点:

1. 当山高 $h_m = 0$ 时,公式(9-1)成为平地线路的绕击率公式,这时 $H = h - f_s = h_b$, 公式(9)可变为:

$$\lg P_s = \frac{\alpha\sqrt{h_b}}{86} - 3.35 \quad (10)$$

验证结果表明,对 110kV~220kV 线路的典型杆塔而言,由公式(10)计算得的 P_s 值约为平原公式(2)计算值的 2.44 倍~3.11 倍,见表 1。这就表明:公式(10)不适用于平地线路绕击率的计算,或者说修正公式(9)不能反映出从平地($h_m = 0$)到山地($h_m \neq 0$)的变化情况。

表 1 绕击率计算值(平地情况)

项 目		110		220	
		单避雷线	双避雷线	单避雷线	双避雷线
塔高(m)		19.5	16	34.5	29.1
保护角(°)		25	22	25.5	16.5
h_b (m)		17.6	13.3	28.5	24.5
P_s (%)	公式(10)	0.740	0.383	1.71	0.398
	公式(2)	0.238	0.133	0.7	0.144
	公式(10)/公式(2)	3.11	2.88	2.44	2.76

2. 公式(9)没有扣除公式(3)中已经考虑了的比平原公式(2)增高了的高度。由《规程》附图3可知,山地线路绕击率公式(3)的计算值约为平地线路绕击率公式(2)的3倍,或相当于保护角增大了 8° 。

现在我们假定公式(3)对公式(2)不是角度增加了 8° ,而是高度增加了 Δh ,即公式(2)中的 h 变为 $h+\Delta h=H$ 。显然,当用 H 代替公式(2)中的 h 时,则公式(2)和(3)两式的右侧应当相等,即

$$\frac{\alpha\sqrt{H}}{86} - 3.9 = \frac{\alpha\sqrt{h}}{86} - 3.35$$

解上述方程,可得:

$$H = \left(\sqrt{h} + \frac{47.3}{\alpha} \right)^2 \quad (11)$$

换句话说,公式(3)的计算值约为公式(2)的3倍,或相当于保护角增大了 8° ,也即相当于高度增加了 $\Delta h=H-h$ 。

例如,110kV单杆线路,若 $h=19.5\text{m}$, $\alpha=25^\circ$,对山区来说由公式(11)得:

$$H = \left(\sqrt{19.5} + \frac{47.3}{25} \right)^2 = 39.8\text{m}$$

即相当于比平原线路的避雷线增加了 $\Delta h=39.8-19.5=20.3(\text{m})$,约为杆塔本身高度的1.04倍。

设避雷线的弧垂为 $f_s=2.8\text{m}$,则由公式(9-1)得:

$$h_m = 1.5(H-h) + f_s = 1.5 \times (39.8 - 19.5) + 2.8 = 33.3(\text{m})$$

换句话说,相当于把 $h=19.5\text{m}$ 的杆从平地移到了 $h_m=33.3\text{m}$ 的山顶上。这就表明:110kV线路杆塔从一个山头移到另一个山头安装时,只有当山高 $h_m > 33.3\text{m}$ 时,由公式(3)计算的 P_s 值才会偏小。然而,公式(9)并没有注意到这点,因而从物理意义上说是不合理的。

如果要考虑山的高度的影响(从一个山顶到另一个山顶的档距),则山地绕击率的计算公式按下式修正较为妥当:

$$\lg P_s = \frac{\alpha\sqrt{H}}{86} - 3.9 \quad (12)$$

式中
$$H = h + \frac{2}{3}(h_m - f_s)$$

当 $h_m=0$,即平时地时,公式(12)变为:

$$\lg P_s = \frac{\alpha\sqrt{h_s}}{86} - 3.9 \quad (13)$$

公式(13)与公式(2)大致相当。所不同的是公式(13)用避雷线的平均高度 h_s 代替了公式(2)中的避雷线的悬挂高度 h 。由于 h_s 稍小于 h ,因而公式(13)的计算值将比公式(2)的稍微