

浙南地区 10 kV 配电线路综合防雷措施仿真研究

陈小波¹, 叶铁丰¹, 郑明¹, 潘锡杰¹, 吴烈^{2,3}

(1. 国网浙江瑞安市供电有限责任公司, 浙江 瑞安 325000; 2. 浙江九宏电力工程有限公司, 浙江 苍南 325802; 3. 温州大学电气数字化设计技术国家地方联合工程实验室, 浙江 温州 325035)

摘要:以浙南地区某条 10 kV 配电线路为研究对象, 该 10 kV 配电线路全线绝大部分位于山区, 土壤电阻率较高, 沿线杆塔接地电阻大多未能达到设计要求, 由雷击引起的线路跳闸及断线率很高; 结合 ATP-EMTP 和 CDEGS 软件等计算机仿真与辅助设计技术, 从安装线路避雷器、架设耦合地线、降低杆塔接地电阻和采用不平衡绝缘装置等方面对线路防雷效果的影响进行了仿真研究; 仿真研究表明: 综合使用前 3 中防雷措施能够明显提升 10 kV 配电线路预防直击雷和感应雷的防雷水平; 基于该仿真研究方案对该线路进行了防雷改造工程, 改造后尚未发现因雷击而造成的线路故障, 防雷效果显著。

关键词: 10 kV 配电线路; 综合防雷措施; 仿真技术; 计算机辅助设计

Simulation Research on Comprehensive Lightning Protection Strategies of 10 kV Power Distribution Lines in South Area of Zhejiang

Cheng Xiaobo¹, Ye Tiefeng¹, Zheng Ming¹, Pan Xijie¹, Wu Lie^{2,3}

(1. Smart Grid Zhejiang Ruian Electric Power Supply Co., Ltd., Ruian 325000, China;

2. Zhejiang Jiuhong Electric Engineering Co., Ltd., Cangnan 325802, China;

3. National-Local Joint Engineering Laboratory of Digitalize Electrical Design Technology, Wenzhou 325000, China)

Abstract: This paper focuses on one 10 kV power distribution line in the south area of Zhejiang. Most of this 10 kV power distribution line is located in the mountains, where have soil resistivity. The ground resistance of the towers mostly failed to meet the design requirements, and the overhead power distribution line are in high back flash rate and line disconnection rate. By adopting the computer simulation and aided design techniques such as ATP-EMTP and CDEGS software, the influences of installing line lightning arresters, erecting coupling ground wire, reducing the tower grounding resistance and adopting unbalanced insulation device on the lightning protection level are analyzed from the perspective of simulation studies. The simulation results have shown that combination of the first three kinds of lightning protection strategies could greatly improve the protection level of 10 kV power distribution line against both direct and induced lightning. After this line is reconstructed by the lightning protection strategies based on the above mentioned simulation results, the faults caused by lightning have never occurred so far, which demonstrates the lightning protection effect is remarkable.

Keywords: 10 kV power distribution line; comprehensive lightning protection strategies; simulation technique; computer aided design

0 引言

10 kV 配电线路分布广、绝缘水平低, 连接着变电站和众多用户, 在雷雨季节, 经常发生雷害事故, 造成大面积停电, 有时甚至造成人身伤亡, 给人们的生活和工业生产带来不便, 因此需要通过设计防雷措施提高 10 kV 配电线路的防雷水平, 降低其雷击跳闸率, 提高线路供电可靠性, 确保其安全运行^[1]。

在实际工程中, 很多地区仍然采用粗放式的防雷改造管理方式, 即不考虑线路和防雷措施特点, 无差异的选择单一防雷措施进行治理, 使得治理效果不显著, 改造过的杆塔需要进行二次改造, 大大浪费了人力、物力。实际上, 不同的线路防雷措施可能不同, 就是同一条线路不同的部分, 采用的措施可能也是不一样的。如何对多种防雷措施进行有效的综合利用, 是电力系统防雷改造工程能否取得好的防雷效果的关键。因此, 在实施电力系统防雷工程前, 首先采用计算机仿真技术进行综合防雷措施仿真评估, 再根据评估结果选择技术经济性较高的综合防雷措施是提高电力系统防雷改造效果的关键技术之一^[2]。

浙南地区某 10 kV 配电线路总长达 38.882 km, 绝大部分位于山区, 通道较差, 受台风和雷电影响严重。原线路杆塔所在土质以花岗岩、松砂石为主, 电阻率很高, 接地

收稿日期: 2017-10-24; 修回日期: 2017-11-16。

基金项目: 国家自然科学基金(51207112); 浙江省自然科学基金(LY16F030011); 国网浙江省电力公司群众性创新项目(5211W617000M)。

作者简介: 陈小波(1980-), 男, 浙江瑞安人, 工程师, 主要从事配网工程管理、配网运维检修管理工作方向的研究。

电阻大多未能达到设计要求, 避雷效果不理想。据现有资料统计, 2015 年该地区线路因雷击而造成跳闸、断线的次数多达 19 次, 线路可靠性很差, 因此深入分析输电线路的耐雷性能并提出合理的防雷措施对电力系统的安全可靠运行具有重要的工程意义。

输电线路的耐雷水平作为反映输电线路抵抗雷击能力的重要技术特性之一, 其性能通常采用雷电流的大小来评估, 也即在线路遭受雷击时, 不使线路绝缘子发生闪络的最大雷电流值^[1]。本文应用电磁暂态软件 ATP-EMTP 和 CDEGS 软件等电力系统优化设计仿真软件^[2-3], 结合浙南地区 10 kV 架空线路的工程实际, 对架设耦合地线、安装线路避雷器、降低杆塔接地电阻和采用不平衡绝缘装置等多种防雷措施对线路防雷效果的影响进行仿真分析, 然后针对综合防雷措施预防直击雷和感应雷的防雷效果进行综合仿真分析, 从而为实际防雷工程实施提供技术支撑。

1 防雷改造前某 10 kV 线路简介

从防雷改造前某 10 kV 线路选取其中的一段支线对线路基本情况介绍。该支线线路共有杆塔 17 基, 线路采用单回路架设, 导线排列方式采用三角形排列, 杆塔以普通钢筋混凝土杆为主, 杆高 12 m。计算机仿真时选取其中一段典型线路 (1#杆塔至 6#杆塔)。

线路的钢筋棍凝土杆塔大多为自然接地, 其接地电阻不宜超过 30 Ω 。有地线的线路杆塔的工频接地电阻不宜超过表 1 的具体规定。

表 1 有地线的线路杆塔的接地电阻

土壤电阻率/ $\Omega \cdot m$	接地电阻/ Ω
≤ 100	≤ 10
100~500	≤ 15
500~1000	≤ 20
1000~2000	≤ 25
> 2000	≤ 30

通过对杆塔所在的土壤进行测量可以得到土壤电阻率和杆塔接地电阻, 如表 2 和表 3 所示的数据。

土壤电阻率直接影响接地电阻的大小, 由于线路杆塔大多位于花岗岩、松砂石的土质中, 所以土壤的电阻率很高, 导致接地电阻随之增大。综合表 1~3 可知, 现有大部分杆塔接地电阻不满足表 1 所规定的要求。

表 2 杆塔土壤电阻率测量值

杆塔号	土壤电阻率/ $\Omega \cdot m$
1#	496
2#	924
3#	701
4#	843
5#	620
6#	297
平均土壤电阻率/ $\Omega \cdot m$	647

表 3 杆塔处接地电阻测量结果

杆塔号	接地电阻阻值/ Ω
1#	22.5
2#	30.8
3#	23.4
4#	28.1
5#	19.5
6#	13.5
平均接地电阻/ Ω	23

2 线路直击雷过电压仿真模型

为了研究 10 kV 架空线路的防雷性能, 本文利用 ATP-EMTP 软件, 建立线路杆塔遭受雷击时的数字仿真模型, 包括雷电流模型、架空线路模型、杆塔模型和绝缘子闪络模型。

2.1 雷电流模型

雷电流模型采用 ATP-EMTP 中的 Heidler 指数模型来模拟, 雷电流设置为 2.6/50 μs , 幅值可随 10 kV 架空线路防雷仿真的需要进行动态调整。

2.2 架空线路模型

导线模型选用能反映线路频率特性的 JMARTI 模型。本文中, 线路导线选用的型号为 JKLYJ-10-70^[4], 线路档距为 60 m, 导线的参数如下: 导体截面为 70 mm², 导线参考外径为 10.0 mm, 20°时导体电阻不大于 0.443 Ω/km , 导体拉断力不小于 10354 N。

2.3 杆塔模型

高度在 40 m 以下的杆塔, 仿真研究时可以采用集中参数电感模型^[5]。规程 DL/T 620-1997 对此类杆塔电感的参考值作出规定^[6], 对于无拉线和有拉线的钢筋混凝土单杆, 杆塔电感分别为 0.84 $\mu H/m$ 和 0.42 $\mu H/m$ 。

在 ATP-EMTP 中, 本文采用常用线性元件来模拟杆塔接地电阻, 仿真的接地电阻数值取表 3 接地电阻的平均值。

2.4 绝缘子闪络模型

在 ATP-EMTP 仿真中, 通常采用压控开关来模拟杆塔绝缘子闪络模型。线路绝缘子采用针式 P-15 型, 其冲击击穿电压为 200 kV。

3 10 kV 线路防雷措施仿真分析

通常, 10 kV 架空线路常用的防雷措施主要包括: 架设避雷线、降低接地电阻、安装耦合地线、安装避雷器和采用不平衡绝缘装置等^[7]。加装避雷线的改造, 在浙南地区的防雷改造工程应用上难度较大, 不予采用。

10 kV 架空线路仿真模型如图 1 所示, 该模型模拟杆塔在无任何防雷措施时, 雷击 3#杆塔塔顶的动态性能。

雷电流的幅值设为 2.4 kA, 仿真得到 3 号杆塔绝缘子两端电压波形如图 2 所示。由图 2 可知, B 相绝缘子发生闪

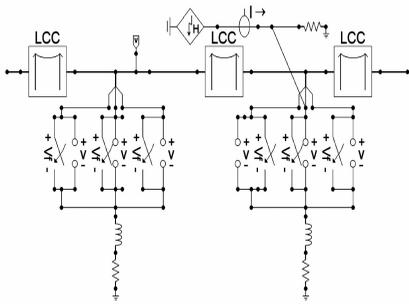


图 1 无防雷措施时雷击塔顶线路的部分仿真模型

络, A 相绝缘子两端电压最大值约为 109.21 kV, C 相绝缘子两端电压最大值约为 136.85 kV。

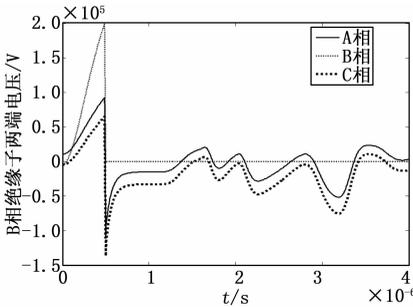


图 2 无防雷措施时 3# 杆塔绝缘子两端波形图

3.1 安装线路避雷器

用能表示分段线性函数的 MOV 模型来模拟线路避雷器^[8], 避雷器型号为 YH5WS3-17/50, 动作电压设置为 15 kV。图 3 给出了加装避雷器的线路仿真模型。

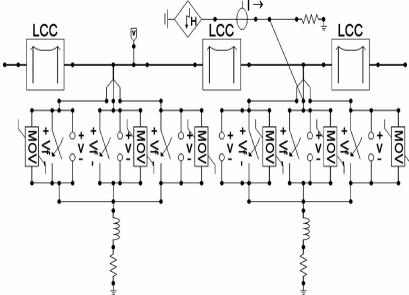


图 3 加装避雷器的 3# 杆塔仿真模型

当 3# 杆塔安装避雷器后, 其 B 相绝缘子两端电压波形如图 4 所示。由图 4 可见, 在 2.4 kA 雷电流作用下, 3# 杆塔的 B 相绝缘子未发生闪络, 绝缘子两端电压最大值约为 37.38 kV。

改变雷电流幅值后, 仿真结果显示, 雷击 3# 杆塔塔顶(未安装避雷器)时线路耐雷水平约为 1.4 kA; 安装避雷器时耐雷水平约为 8.2 kA。可见, 线路安装避雷器后, 线路耐雷水平比未安装避雷器时提高了约 4.9 倍, 防雷效果显著。

3.2 安装耦合地线

雷击杆塔塔顶时, 耦合地线能对雷电流进行分流, 并

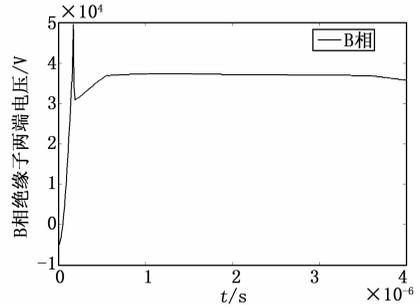


图 4 B 相塔绝缘子两端电压波形

起到耦合作用, 从而降低杆塔绝缘子上的电压, 在一定程度上提高了线路的耐雷水平。仿真选取的耦合地线型号为 GJ-35, 装有耦合地线线路在 ATP-EMTP 中的仿真模型如图 5 所示。

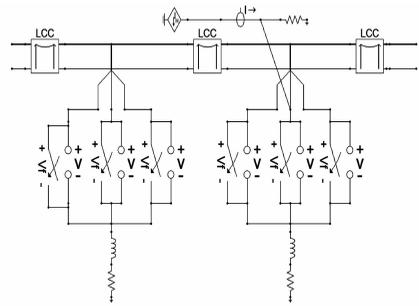


图 5 安装耦合地线的仿真模型

当雷电流幅值设为 2.4 kA 时, 雷击 3# 杆塔塔顶, 仿真得到的杆塔三相绝缘子两端电压波形如图 6 所示。由图可见, 绝缘子均未发生闪络, B 相绝缘子两端电压最大值约为 182.18 kV, A 相绝缘子两端电压约为 74.91 kV, C 相绝缘子两端电压约为 45.82 kV。

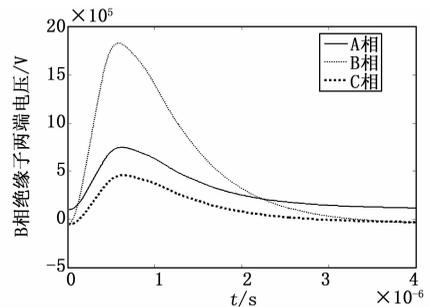


图 6 安装耦合地线的 3# 杆塔绝缘子两端电压波形

对安装耦合地线的模型进一步仿真, 仿真结果显示: 线路安装耦合地线后其耐雷水平约为 2.6 kA。

3.3 降低杆塔接地电阻

雷击杆塔, 过高的接地电阻会造成很高的反击电压, 从而导致杆塔上的绝缘子被击穿^[9]。尤其在浙南地区, 由于其过高的土壤电阻率, 使得杆塔的接地电阻很难达到规程要求。

增加水平接地电极的长度可以在一定程度上降低杆塔

的接地电阻^[10]。根据 GB/T50065—2011 交流电气装置的接地设计规范的相关规定^[4]: 在大地电阻率 $300 \Omega \cdot m < \rho < 2\,000 \Omega \cdot m$ 的地区, 采用水平敷设的接地装置, 接地极埋设深度不宜小于 0.5 m; 放射形接地极每根的最大长度应符合表 5 的规定。

表 5 放射形接地极每根的最大长度

土壤电阻率/ $\Omega \cdot m$	最大长度/m
≤ 500	40
500~1000	60
1000~2000	80
2000~5000	100

利用 CDEGS 软件^[3], 接地极模型如图 7 所示。接地极选用等效半径 $r=14 \text{ mm}$ 的圆柱形水平接地体, 材料为镀锌扁铁。水平接地极埋设的深度 $d=0.8 \text{ m}$, 土壤电阻率为 $\rho=647 \Omega \cdot m$; 在水平接地极上增加垂直接地极, 垂直接地极长度取 $h=5 \text{ m}$ 。

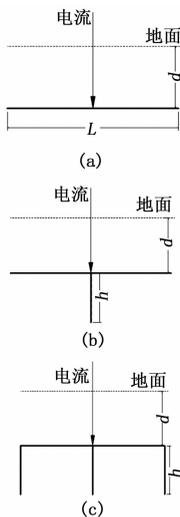


图 7 接地极模型

表 6 接地极电阻与接地极长度的关系

水平接地极长度/m	接地极电阻/ Ω
10	82.2
20	48.4
40	27.8
60	20
80	15.7
140	9.8
200	7.3
240	6.2

当用图 7 (a) 方式敷设接地极时, 得到不同水平接地极长度的电阻如表 6 所示。由表 6 可以看到, 电极的长度对接地电阻有一定影响, 电极越长, 接地电阻越小, 但是随着接地极长度的增加, 电阻下降的趋势明显放缓。

当用图 7 (b) 方式敷设接地极时 (水平接地极 $L=60 \text{ m}$), 接地极的电阻约为 19Ω ; 当用图 7 (c) 方式时 (水平接地极 $L=60 \text{ m}$), 接地极的电阻约为 16.5Ω 。

当雷电流为 1.5 kA 时, 不同接地电阻对应的线路过电压比较如表 7 所示。

由表 7 可知, 杆塔接地电阻对线路过电压情况影响较为明显, 接地电阻越小, 线路过电压越小。但接地电阻过小, 在山区进行工程实现的成本也会随之增加, 因此接地电阻的设计需要综合考虑防雷效果和工程成本等多种因素。

表 7 不同接地电阻对应的线路过电压比较

接地电阻/ Ω	线路电压最大值/kV
23	61.61
19	59.16
16.5	58.39

3.4 采用不平衡绝缘装置

采用不平衡绝缘装置这种方法的目的是使两相闪络耐雷水平远远大于单相闪络。采用计算机仿真技术, 可以得到不同绝缘子配置线路单相闪络和两相闪络的耐雷水平, 其结果如表 8 所示。由表 8 可知, 利用不平衡绝缘这种方法, 两相闪络的耐雷水平达到 20.3 kA , 比线路的初始配置方案 1 (14.4 kA) 提高了约 41%。

表 8 绝缘子不同配置对应的线路耐雷水平

方案	B 相	AC 相	单相闪络	两相闪络
1	P-15	P-15	2.4	14.4
2	P-15	P-15M	3.0	20.3
3	P-15M	P-15M	3.5	20.3

4 10 kV 线路综合防雷措施的具体方案选择

基于上述单一防雷措施对 10 kV 线路防雷效果影响仿真研究, 本文对以下两种综合防雷措施进行了仿真分析与性能比较, 从而为 10 kV 线路实际防雷工程设计与实现提供技术支撑。

4.1 方案 1

- 1) 全线架设耦合地线, 即在杆塔上添加一根型号为 GJ-35 的镀锌钢绞线, 距地面 8.1 m ;
- 2) 全线安装避雷器, 型号 YH5WS3-17/50;
- 3) 降低杆塔接地电阻, 电阻为 19Ω 。

4.2 方案 2

- 1) 全线架设耦合地线, 即在杆塔上添加一根型号为 GJ-35 的镀锌钢绞线, 距地面 8.1 m ;
- 2) 采用不平衡绝缘方法: B 相绝缘子采用 P-15, AC 相采用 P-15M;
- 3) 降低杆塔接地电阻, 电阻为 19Ω 。

4.3 方案 1 与方案 2 仿真分析与性能比较

从表 9 可知，方案 1 单相闪络和两相闪络的耐雷水平均高于方案 2，可见方案 1 防直击雷的效果优于方案 2。

表 9 两种方案的直击雷耐雷水平对比

直击雷	方案 1/kA		方案 2/kA	
	单相闪络	两相闪络	单相闪络	两相闪络
雷击塔顶	28.8	31.5	2.7	28.5

当雷电击中大地时，会在 10 kV 架空线路上产生感应电压。借鉴文献[11-12]的研究思路，基于 ATP-EMTP 仿真软件的 10 kV 架空线路感应电压的仿真模型如图 8 所示。

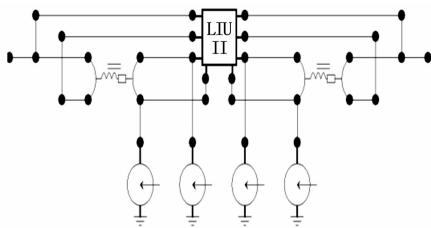


图 8 10 kV 架空线路感应电压仿真模型

当雷击位置距离线路 30 m 时，雷电流幅值为 70 kA 时，采用防雷方案 1 和方案 2 对应的 B 相绝缘子两端波电压形如图 9 所示。

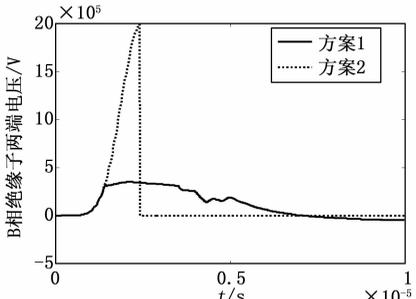


图 9 两种方案的 B 相绝缘子电压波形比较

当线路采用方案 2 时，雷击线路附近，3 号杆塔上 B 相绝缘子发生闪络；而采用方案 1 时，号杆塔上 B 相绝缘子未发生闪络，线路所受感应电压最大值约为 34.95 kV。

表 10 不同雷电流下无防雷措施和两种方案的绝缘子电压对比

雷电流/kA	无措施/kV	方案 1/kV	方案 2/kV
20	80.98	31.86	78.64
50	199.14	33.83	196.61
80	189.69	35.53	185.41

进一步，改变雷电流幅值对 10 kV 架空线路进行模拟仿真，不同雷电流下无防雷措施和两种方案的绝缘子电压对比如表 10 所示。由表 10 可知：当雷电流幅值大于 50 kA 时，线路采用方案 2 后，B 相绝缘子发生闪络，而采用方案 1 时，线路运行正常。因此，方案 1 预防感应雷过电压的效

果明显优于无防雷措施和方案 2。

基于上述仿真分析，不难看出方案 1 相比方案 2 在预防直击雷和感应雷方面均具有明显优势。因此，本文选用方案 1 对该 10 kV 线路于 2015 年进行了防雷改造工程，迄今为止该线路未出现因雷击而造成线路故障的情况，防雷效果明显。

5 结语

本文依据浙南地区 10 kV 架空线路所处环境，结合 ATP-EMTP 软件和 CDEGS 软件，具体分析了安装避雷器、架设耦合地线、降低杆塔接地电阻和采用不平衡绝缘装置对 10 kV 架空线路耐雷水平的影响。仿真结果表明：结合使用前 3 中防雷措施能够大大提高线路的耐雷水平和降低线路的感应雷过电压幅度，并且绝缘子不会出现闪络。基于该仿真研究方案对该线路进行了防雷改造工程，自 2015 年改造后至今尚未发现因雷击而造成的线路故障，防雷效果显著。因此，借助 ATP-EMTP 软件和 CDEGS 软件等计算机仿真与辅助设计技术，综合使用安装避雷器、架设耦合地线、降低杆塔接地电阻等防雷措施对复杂山区 10 kV 架空线路防雷优化设计提供了技术支撑，值得进一步推广应用。

参考文献：

- [1] 韩晋平, 王晓丰, 马心良, 等. 10 kV 架空绝缘导线雷电过电压与防雷综合措施研究 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (11): 2395-2399.
- [2] 李云阁. ATP-EMTP 及其在电力系统中的应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [3] 牛晓民. 电力系统接地分析软件 CDEGS 简介 [J]. 华北电力技术, 2004 (12): 29-31.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50065-2011 交流电气装置的接地设计规范 [S]. 2012, 22-23.
- [5] 机械工业部上海电缆研究所. GB/T14049-2008 额定电压 10 kV 架空绝缘电缆 [S]. 2008.
- [6] 李明贵, 鲁铁成. 高压架空输电线路雷击过电的仿真计算与分析研究之一: 输电线路雷电过电压仿真计算模型的建立 [J]. 广西电力, 2005 (4): 7-10.
- [7] 电力工业部, 电力科学研究院, 高压研究所. DL/T 620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 [S]. 1997: 53-55.
- [8] 赵淳, 阮江军, 李晓岚, 等. 输电线路综合防雷措施技术经济性评估 [J]. 高电压技术, 2011 (2): 290-297.
- [9] 张彦军. 油田 6-10 kV 配电线路防雷措施与方案评估的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- [10] 张敏. 杆塔接地极冲击接地技术及影响因素的研究 [D]. 西南交通大学, 2013.
- [11] 韦钰. 上海 10 kV 城郊配电线路防雷措施的研究 [D]. 华东理工大学, 2014.
- [12] 姜玉宏, 常俊. 配电线路感应雷过电压计算 [J]. 黑龙江电力, 2014, 36 (5): 443-446.