沿海10 kV架空配电线路防雷措施浅谈

锦州沿海地区10 KV架空线路每年都多次发生落雷事故，严重影响供电线路安全，给地方经济建设带来极大困扰，本文通过对发生于沿海10kv架空配电线路上的雷电过电压进行了分析，并对其发生的概率进行了评估。随机抽样统计了锦州供电公司及锦州开发区供电分公司辖区配电事故记录。从而提出了防雷措施的改进意见。

赵景伟 刘长庆 景欣 / 国网辽宁省电力有限公司锦州供分公司

赵景伟／工程师

关键词/Keywords

配电线路·

防雷·

措施改进·

0 引言

锦州市是个滨海城市而开发区临近海岸线，雷雨多，高于10KV架空线路的高大建筑物少，地下磁场大。所供电辖区配电线路仍多是架空线路。雷电过电压能够通过三种方式对其施加作用：雷击于导线而产生的直击雷过电压；雷击杆顶而作用于绝缘子的雷电反击过电压；雷云对线路附近的地面、物体放电时，在线路上产生的感应过电压。由于10 kV架空配电线路（以下简称配电线路）的绝缘水平较低，因此，上述雷电过电压均能对其构成威胁。但是，10 kV电网中性点是不接地的，当雷电过电压仅造成一相绝缘子闪络时，由于工频电流很小，不能使线路跳闸，只有当造成多相（两相或三相）绝缘子均闪络，形成相间短路并建立起稳定的工频电弧时，方能使线路跳闸。本文通过对配电线路雷击现象的分析、评估提出了预防雷击事故的改进措施。

1配电线路雷电过电压分析

1.1 雷击于导线、绝缘子

对于水平排列的线路，雷多击于边线，极少击于中线；三角排列时则多击于上线。

设遭雷击相导线的电位为U_d。在该相导线的绝缘子未闪络时，另两相导线上作用的电位有耦合电位KU_d及感应过电压一 U_g（U_g前冠以“一”是因为U_g与雷云的极性相反，以下同）。则另两相导线上的电位

$$U'_d = KU_d+(-U_g) = KU_d-U_g$$

此时作用在另两相绝缘子上的电压为

$$U'_j=\frac{1}{2}(U_d-U'_d) =\frac{1}{2}(U_d-KU_d+U_g) = \frac{U_d(1-K)+U_g}{2} \quad (1)$$

式中，K为计及电晕效应后的耦合系数。

当雷击相的绝缘子闪络时，该相导线通过铁横担及钢筋混凝土杆与大地连通，其作用对另两相相当于避雷线，由于雷击相绝缘子闪络，使铁横担的电位升高至 U_d。此时，另两相导线的电位为

$$U'_d =KU_d-U_g(1-K)^{[2]} \quad (2)$$

其绝缘子承受的电压为

$$U_j=U_d-U'_d =(U_j+U_g)(1-K) \quad (3)$$

遭雷击相闪络前后，另两相绝缘子承受电压的变化为

$$\Delta U = U_j-U'_j =(U_d+U_g)(1-K)-\frac{1}{2}[U_d(1-K)+U_g] =\frac{1}{2}U_d(1-K)+U_g\left[\frac{1}{2}-K\right] \quad (4)$$

1.2 雷击于杆顶

雷击于杆顶时，由于雷电流在电杆

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的电感及电杆接地电阻上的压降使铁横担的电位U_h升高。此时当绝缘子未发生反击闪络时，导线上的电位为$-U_g$，而绝缘子所承受的电压为

$$U'_g = U_h-(-U_g) = U_h + U_g \quad (5)$$

式中，U_h——铁横担的电位，kV。

当某相绝缘子首先发生反击闪络时，闪络相导线与铁横担等电位，闪络相导线对另两相导线起避雷线作用。此时，未闪络相导线的电位为

$$U'_d = KU_h+[-U_g(1-K)] = KU_h-U_g(1-K)$$

其绝缘子承受的电压为

$$U_j = U_h-U'_d = (U_h + U_g)(1-K) = U'_j(1-K) \quad (6)$$

1.3 感应过电压

当雷云对导线附近的地面或物体放电时，由于空间电磁场迅速变化，将在导线上感应出过电压。感应过电压的特点是：其极性与雷云的极性相反；在架空线路的三相上同时出现，且同极性、同数值，三相间没有电位差。DL/T620－1997[1]推荐感应过电压按下式计算：当雷击地点距线路≥65 m时，$U_g=25\frac{I_l h_p}{S}$；当雷击地点距线路＜65 m时，$U_g=ah_p$。

式中，I_l——雷电流，kA；

S——雷击点与线路的距离，m；

a——感应过电压系数，单位为kV/m，其数值等于以kA/ms计的雷电流平均陡度；

h_p——导线平均高度，m。

1.4 分析讨论

分析某相绝缘子闪络前后，另两相绝缘子上承受电压的变化，可判断发生多相闪络的可能性。

由式（4）知，在雷击导线时，遭雷击相绝缘子闪络前后另两相绝缘子承受的电压的变化与耦合系数K有关。10 kV配电线路耦合系数K的计算值如表1。用式（4）进行分析时

取较小k值。由此式中第一项必＞0，且约等于$\frac{1}{4}U_d \sim \frac{1}{3}U_d$；第二项≥0并在0 ~ 0.15之间。因此$\triangle U>0$，即遭雷击相绝缘子闪络后，另两相绝缘子所承受的电压值较雷击相闪络前必然增大，且距遭雷击较远的那一相（一般情况下水平排列时是另一边相）因耦合系数较小，$\triangle U$增加较多，因而更容易发生反击。这也是为什么取小的K值进行分析的原因。

表1　10 kV配电线路耦合系数K

线路情况	K
裸导线单回水平排列	0.35~0.49
绝缘导线单回水平排列	0.39~0.58
裸导线单回三角排列	0.46~0.50
绝缘导线双回水平排列	0.50~0.61

注：三相中相距最远的两相k取较小值，相距最近的两相k值取较大值。

由式（6）可知，雷击杆顶时，当某相首先发生反击闪络后，另两相绝缘子所承受电压将是该相闪络前的（1－k）倍，即有了大幅降低。对雷电现象观测的结果表明：雷电放电具有多重性，即第一次主放电后，还会有后续的多次主放电，只是后续的主放电电流比第一次主放电电流要小得多。因此，雷击杆顶时，如果不是在第一次主放电时就发生多相同时反击闪络的话，那么，当一相首先发生反击后，就不会再发生第二相或第三相的继续反击。

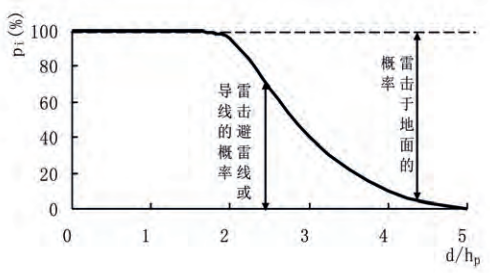
在感应过电压作用下，只有当多相同时闪络才可能发生短路跳闸，因为如果三相中有一相先闪络，根据感应过电压的特点，另两相绝缘子两端的电位将趋于相等，另两相就不会再继续闪络。

2 配电线路雷击概率的评估

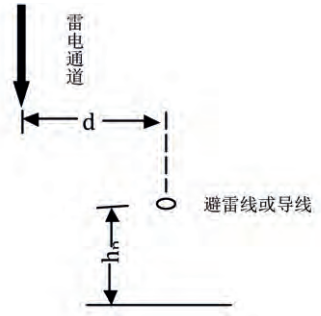
2.1 实验数据

根据实验提供的数据，雷击架空线路的概率分布$P_i=f(d/h_p)$如图1曲线。可见，当$\frac{d}{h_p}$＜1.5左右时，雷击线路的概率$P_x=1$，雷击地面的概率$P_d=0$，即雷电全部击于架空线路。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 雷击概率*Pi*曲线



(b) *hp*与遮蔽地面宽度d的示意图

图1 输电网络线路动态变权层次分析结构

d —— 雷电通道与避雷线或导线的水平距离；hp ——避雷线或导线悬挂平均高度

当$\frac{d}{h_p}>5.0$时，雷击线路的概率$P_x=0$，雷击地面的概率$P_d=1$，即雷电全部击于地面；当$\frac{d}{h_p}=1.5$ ~ 5.0时，雷击架空线路及直击地面的概率分别约为$P_x=0.43$及$P_d=0.57$。由图1可计算出架空线路的等值受雷宽度为：$2[1.5+(5.0-1.5)P_x]h_p=(3+7P_x)h_p$。因此，每百公里每年架空线路遭受雷击的次数

$$N_L=\gamma T_d\frac{(3+7P_x)h_p}{1000}=0.1(3+7P_x)\gamma T_d h_p \quad (7)$$

式中，P_x——当$d/h_p=1.5$ ~ 5.0时雷击导线的概率，$P_x=0.43$；

T_d——当地的年平均雷暴日数，d；

γ——地面落雷密度，即每平方公里，每雷暴日（d）的地面落雷次数。

关于地面落雷密度（γ），根据实际观测统计结果，DL/T620－1997推荐，对$T_d=40$的地区γ值取0.07。但DL/T620－1997同时又指出：T_d不同的地区，γ值也不同，且一般T_d较大的地区其γ值也随之变大。所以如果当地$T_d\neq40$时仍取$\gamma=0.07$，将影响NL计算结果的真实性。如果当地无关于γ的观测统计数据时，可采用国际大电网会议关于雷电研究总结报告推荐的公式：$\gamma=0.023T_d^{0.3}$。以锦州地区为例，1951~1962年锦州气象台雷暴观测数据为年平均雷暴日数28.5 d，则$\gamma=0.063$。将$P_x=0.43$、$T_d=28.5$ d 、$h_p=12$ m、$\gamma=0.063$代入式（7）得锦州地区配电线路，每百公里每年可能遭到约13次雷击。其中一半击于导线，一半击于杆顶。[4]

2.2 感应过电压

感应过电压值如果超过绝缘子的50%冲击闪络电压，将会发生闪络，甚至造成相间短路。根据鲁可夫提供的计算公式，这样的感应过电压值每百公里每年出现的次数为[2]

$$Ng=\frac{8T_d h_p}{U_{50\%}}e^{-\frac{u_{50\%}}{130}} \quad (8)$$

式中，$U_{50\%}$——线路绝缘子的50%冲击闪络电压。P-20绝缘子的$U_{50\%}=140$ kV。

以锦州地区实际情况的数据代入得：Ng＝6.7次。

2.3 锦州地区配电线路雷击跳闸率的评估

雷击导线时的跳闸率

$$n_1=\frac{1}{2}N_1P_1y$$

式中，n_1——雷击导线时的跳闸率；

P_1——雷电流I_L大于耐雷水平I_1的概率，$P_1=0.82$。I_1是当雷击导线引起绝缘子闪络后再向另一相反击时的耐雷水平。锦州地区I_1的计算值为7.5 kA；

y——建弧率。锦州地区配电线路$y=0.288$。

所以，$n_1=\frac{1}{2}\times13\times0.82\times0.288=1.54$（次）

雷击杆顶时的跳闸率：

$$n_2=\frac{1}{2}N_1P_2y$$

式中，n_2——雷击杆顶时的跳闸率；

P_2——雷电流大于雷击杆顶时反击闪络耐雷

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

水平I_2=2.6 KA的概率，P_2=0.93。

所以，$n_2=\frac{1}{2}\times 13\times 0.93\times 0.288=1.74$（次）

感应过电压时的跳闸率

$n_3=N_g y=6.7\times 0.288=1.93$（次）

式中，n_3——感应过电压跳闸率。

因此，锦州地区配电线路的雷击跳闸率为：

$N=n_1+n_2+n_{23}=1.54+1.74+1.93$

$=5.21$（次）

即每百公里每年因雷电过电压，可能能造成5次左右配电线路跳闸。

3　锦州地区配电线路雷击现统计分析

对锦州供电公司凌河分公司辖区及原两锦供电公司配电系统，随机采集了十个年份的251次配电事故分类统计如表2。

表2　配电事故抽样统计

事故分类	频数（次）	累计频数（次）	频率（%）	累计频率（%）
外力破坏	87	87	34.7	34.7
用户影响	50	137	19.9	54.6
雷害	42	179	16.7	71.3
设备质量	31	210	12.3	83.6
原因不明	22	232	808	92.4
自然灾害	7	239	2.8	95.2
维护不当	6	245	2.4	97.6
其他	6	251	2.4	100.0
总计	251			

对统计结果及遭雷地点的调查分析发现：

配电系统雷击事故是仅次于外力破坏及用户影响的第三大类配电事故，占全部配电事故的近17%，加强和改进配电线路的防雷措施，对减少配电事故及减少设备损坏有重要意义。

在市区内的配电线路很少发生雷击事故。分析认为其原因，首先，是由于市区高大建筑物林立，其防雷设施的屏蔽作用使配电线路受到保护，免遭直接雷击。其次，市区内变压器台数量多，比较密，杆顶有设备的较多，其上均装有避雷器，对配电线路有保护作用。第三，配电线路对感应过电压有相对较高的耐雷水平（约40 kA）。故发生雷击事故的机率大大减少。

开发区雷击事故多。这里高大建筑较少，地势开阔，电力线路突出，盐碱密度大，容易遭受雷击。

4　防雷措施的改进

目前，配电线路已经采用的防雷措施主要有：在每条配电线路上装设自动重合闸装置；在钢筋混凝土杆铁横担的配电线路使用高一级电压的绝缘子；尽量缩短短路故障的切除时间等。但由前述统计可知：雷击事故在配电事故中仍占较大比重，所以有必要采取一些改进措施，以减少配电雷击事故。由于配电绝缘水平低，遭雷击时造成绝缘子闪络是免难的，但是，改进措施可以从防止遭雷击时发生多相同时闪络入手。

市区内应以预防感应过电压为主，可采用相间差绝缘，即令一相的绝缘水平低于其余两相。例如：一相使用P-15型绝缘子，其余两相使用P-20型绝缘子。当线路遭受大于绝缘子50%冲击闪络电压的感应过电压时P-15型绝缘子首先闪络，从而使另两相绝缘子两端等电位避免再闪络。

对于开发区、城乡结合部、县城及农村分支线路应以预防直接雷击为主兼顾预防感应过电压。采用氧化锌避雷器保护。在配电线路上安装避雷器后，当雷电波袭来时，根据理论分析，只有避雷器安装地点的线路绝缘受到的雷电冲击电压最大值与避雷器的残压相等，只要离开避离器

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

安装地点一定距离，不论其前面或后面，则线路绝缘所受到的雷电冲击电压的最大值，必然要高于避雷器的残压，距离越远，高出的越多[3]。当线路绝缘受到的雷电冲击电压最大值等于其50%冲击闪络电压时与避雷器的距离就是避雷器的最大保护范围。此最大允许距离可按下式计算：

$$l_m=(U_{50\%}-U_{b.5})\frac{v}{2a} \quad (9)$$

式中，l_m——避雷器的最大允许距离，m；

$U_{b.5}$——流经避雷器的雷电流为5 kA时的残压。对氧化锌避雷器$U_{b.5}=45$ kV；

v——波速，$v=300$ m/ s；

$a=\frac{U}{\tau}$——雷电波陡度。当取$U=U_{50\%}=140$ kV及波头$\tau=2.6$ μs时，$a=\frac{140}{2.6}=53.85$kv/μs。

将数据代入式（9）得$l_m=265$ m。因此，只要在水平排列的两相或三角排列的顶相及一边相每隔250 m左右各安装一只氧化锌避雷器，即可确保在雷击时不会发生多相闪络（市区内的配电线路必要时亦可使用此措施）。

实施此措施时应将铁横担、绝缘子的固定部分或陶瓷横担固定部分之间有可靠的电气连接并与氧化锌避雷器一起引下接地。其接地电阻值可不作要求。

使用陶瓷横担，以提配电线路的耐雷水平。

5 结束语

抽样统计显示，雷击是配电事故前三大原因之一，改进防雷措施，减少雷击跳闸次数是预防配电事故的重要手段。

当雷击导线使该相绝缘子闪络后再向另两相反击，产生相继闪络，能造成多相闪络；当雷击杆顶或受感应过电压作用时，有发生多相绝缘子同时闪络的可能，但不会产生多相相继闪络。配电线路遭雷击时，发生多相绝缘子同时闪络或相继闪络，才有可能造成雷击事故。

雷击事故多发生在城乡结合部、县城及农村分支配电线路上，市区内的配电线路很少发生直接雷击事故。因此，预防直接雷击事故的重点地区应该是城乡结合部、县城及农村分支线路。市区内应以预防感应过电压为主。

防雷改进措施的主要内容是：在配电线路的两相上每隔250 m加装氧化锌避雷器；市区内亦可采取相间差绝缘。

（注：文中计算使用的配电数据如下：P-20型绝缘子，钢筋混凝土杆自然接地电阻$R_i=45$,导线平均高度$h_p=9\sim12$ m，导线规格$L_G-120\sim240$）。

参考文献

[1] DL/T620—1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合.

[2] 周泽存.高电压技术.水利电力出版社. 1988.

[3] 解广润.过电压及其保护（上）.水利电力出版社.1958.

[4] SDJ—79.电力设备过电压保护设计技术规程.

（收稿日期：2015-5-21）EA

作者简介

赵景伟（1959-），男，本科，工程师，电气工程自动化。

景欣（1964-），男，本科，信息工程专家，信息技术工程。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net