基站与高压电力塔共站的防护分析

Analysis on Protection of Base Station and High Voltage Power Tower Co-site

祁　征，陈　强，牛年增（中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司，河南 郑州 450007）
Qi Zheng，Chen Qiang，Niu Nianzeng（China Information Technology Designing & Consulting Institute Co.，Ltd. Zhengzhou Branch，Zhengzhou 450007，China）

摘　要：
随着5G通信技术的发展，5G基站对站点数量的需求越来越大，将电力塔与通信基站结合，是5G基站建设的趋势。但是，基站与高压电力塔共站时需要做好高压电力线对基站的危险影响防护，尤其要关注高压电力线故障时地电位反击对基站及附近居民的影响。从高压电力线对基站的容性耦合、感性耦合和阻性耦合做了分析，并分别从电气安全隔距、导线布置、均压网的设置、低压供电网络防护等方面给出了建议，减少了危险因素，为基站与高压电力塔共站建设提供了可实施的方案。

关键词：
5G；高压电力塔；共站；防护
doi：10.12045/j.issn.1007-3043.2021.02.016
文章编号：1007-3043（2021）02-0083-06
中图分类号：TN929.5
文献标识码：A
开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

Abstract：
With the development of 5G，the demand of 5G base stations for the number of sites is increasing. The combination of power tower and communication base station is the trend of 5G base station construction. However，when the base station and the high-voltage power tower are co-site，it is necessary to protect the dangerous impact of high-voltage power line on the base station，especially pay attention to the impact of earth potential counterattack on the base stations and nearby residents when the high-voltage power line fails. It analyzes the capacitive coupling，inductive coupling and resistive coupling of high-voltage power lines. and gives suggestions from the aspects of electrical distance，conductor layout，setting of equalizing voltage ground network，protection of low-voltage power supply network，etc.，which reduces the risk factors and provides an implementable scheme for the co-construction of base station and high-voltage power tower.

Keywords：
5G；High voltage power tower；Co-site；Protection

引用格式：祁征，陈强，牛年增. 基站与高压电力塔共站的防护分析[J]. 邮电设计技术，2021(2)：83-88.

1 概述

随着5G技术的发展，三大运营商陆续发布5G商用时间表，5G网络建设进程快速推进。5G基站对站点加密部署的需求更加迫切，利旧3G、4G存量站址还是无法满足5G站点部署的需求。而电力塔设施分布广、数量多，数倍乃至十倍于通信杆塔，有人提出能否用电力塔代替通信塔，如果可行将对5G基站建设及疑难站址攻坚均有一定的共享价值。

收稿日期：2021-01-16

用电力塔代替通信塔，难点在于安全问题，主要有以下3点。

a）高压电力线雷击、电晕、火花放电及强电场等都可能影响通信设备的正常工作。

b）在高压电力线发生短路接地故障时，在基站与高压电力线最临近的地网边缘处，产生的地电位升可能超过安全限值。同时，通信基站天线若安装在高压电力塔上，有可能因电力线断裂而接到天馈线上，强大的短路电流会引入通信基站，烧毁通信电、光缆（馈线）或通信设备。

c）当通信基站有出入金属缆线时，高压电力线也

会在与之平行接近的金属缆线上，产生磁感应纵电动势。

图1示出的是高压电力系统对通信设施的影响途径。

共享电力塔的安全稳定性是其大规模应用需要研究的关键问题。与电力塔共站的基站在电磁兼容和接地方式甚至安装位置等方面均与传统基站建设有显著区别，因此，有必要进行系统性研究并提出解决方案。

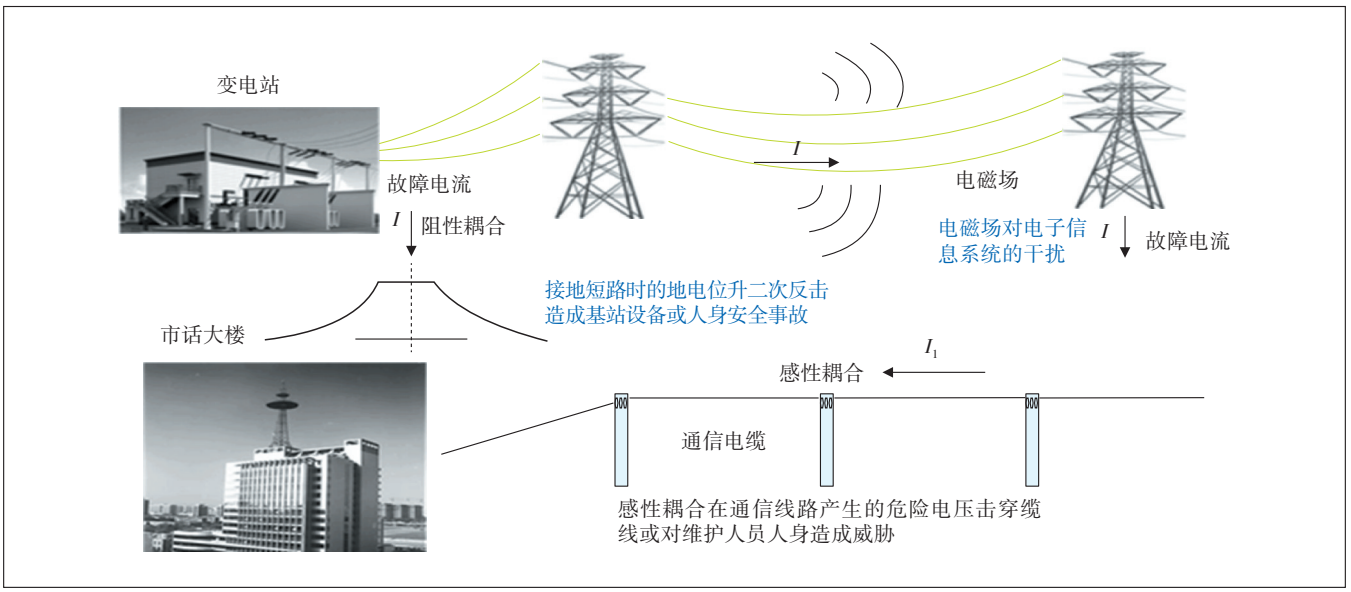

图1 高压电力系统对通信设施的影响途径

2 高压电力线的容性耦合

电力线路的电压在其周围空间形成电场，对邻近的电信线路和通信设备产生影响，这种影响是通过互电容耦合的，可称之为容性耦合影响。

容性耦合影响主要是指高压电力线雷击、电晕、火花放电及强电场对通信设备正常工作造成的影响。

通信设备与电力线路的最小隔距，应考虑施工、运维所带来的影响，在带电体的安全隔距之外安装基站设备，防止高压电力线由于雷击、电晕、火花放电及强电场等对通信设备造成破坏。电力行业考虑的是电气间隙值，不同工况下的电气间隙主要包括工频电压间隙、带电作业间隙、雷电过电压间隙、操作过电压间隙等。

综合以上考虑并根据电力塔线路不同的电压等级，可以计算出通信设备与电力线路的最小隔距。

工频电压间隙的计算公式为：

$$d = (e^{[U_{50\%}/(1\,080K_g)]} - 1)/0.46 \quad (1)$$

$$U_{50\%} = K_2 U_m \sqrt{2}/\sqrt{3} \quad (2)$$

$$K_\alpha = e^{mH/8\,150} \quad (3)$$

式中：

d——工频电压间隙

$U_{50\%}$——50%放电电压

K_g——间隙系数

K_2——工频电压统计配合系数

U_m——最高运行电压

K_α——海拔修正系数

H——海拔高度

m——海拔修正因子

操作过电压间隙可通过式(1)计算。50%放电电压的计算公式为：

$$U_{50\%}=K_3U_s \quad (4)$$

$$U_S = K_e U_m \sqrt{2}/\sqrt{3} \quad (5)$$

式中：

K_3——操作过电压统计配合系数

K_e——统计过电压倍数

雷电过电压的间隙取决于绝缘子串的正极性雷电冲击电压波50%放电电压，与绝缘子串的片数、高度有关。雷电过电压间隙可通过式(1)计算。$U_{50\%}$为50%雷电冲击放电电压。

带电作业间隙的计算公式为：

$$D=D_{min}+0.5(\text{人体活动范围}) \quad (6)$$

$$D_{min} = (e^{[U_{90\%}/(1\,080K_g)]} - 1)/0.46 \quad (7)$$

$$U_{90\%}=K_S U_{2\%} \quad (8)$$

$$U_{2\%}=K_e U_m \sqrt{2}/\sqrt{3} \quad (9)$$

式中：

D——工频电压间隙

D_{min}——最小电气安全距离

$D_{90\%}$——绝缘间隙的统计耐受电压

$D_{2\%}$——作业位置（相-地）的统计过电压

K_s——统计安全系数，取1.1

从电气安全的角度来看，基站天线应装设在铁塔带电导体下方、安全距离以外的塔身处；各电压等级基站天线的安装位置距离最下层导线挂点的安全距离为：

a）500 kV线路。根据海拔和回路数的情况，安全距离分布范围为11.2~12.4 m。

b）220 kV线路。根据海拔和回路数的情况，安全距离分布范围为6.1~6.8 m。

c）110 kV线路。根据海拔和回路数的情况，安全距离分布范围为3.7~4.1 m。

综上所述，可以通过增大高压电力线路与通信设备的间距达到减小或消除容性耦合影响的目的。

3 高压电力线的感性耦合

电力线路上的交变电流在其周围空间形成交变的磁场，从而在邻近的电信线路上感应出纵电动势，它是由互感耦合产生的，可称之为感性耦合。

强电磁感应耦合影响的纵电动势计算应依照下式进行。

$$E=\sum_{i=1}^{N}2\pi f M_i L_i I S_i \quad (10)$$

式中：

f——高压输电线频率（50 Hz）

M_i——第i接近段高压输电线与通信线间的互感系数

L_i——第i接近段的通信线在高压线路上的投影长度

I——高压输送线对通信线的影响电流（通信架空明线，I=0.6I_k；通信电缆，I=0.85I_k）

I_k——第i接近段的短路电流大小

S_i——第i接近段高压输电线与通信线间的综合屏蔽系数

如图2所示，在与送电线交越的通信线MN段上，求出距高压线为10 m的点M′和点N′。可以把MM′段和NN′段看成是单独的斜接近段。如果$\alpha>60°$，可以不考虑M′N′的影响，如果$\alpha\leqslant30°$，就可以把M′N′段看成是等效接近距离为6 m的平行接近段。$30°<\alpha\leqslant60°$时，电动势可以从表1中近似求得。

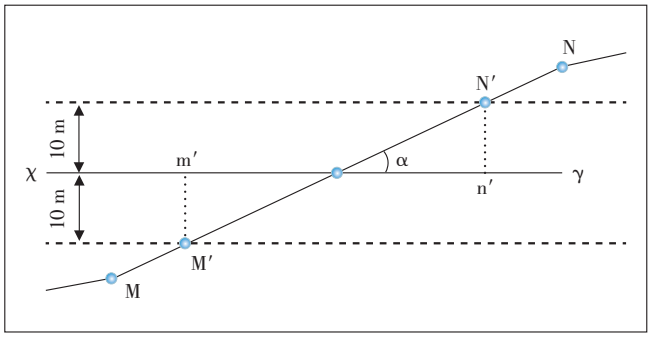

图2　与送电线交越的通信线示意图

表1　短路电流为1 kA时，不同大地电阻率、交越角α和M′N′交越段上的感应电动势

大地电阻率/(Ω/m)	在I_{k3}=1 kA时，交越段上感应电动势的计算值/V		
	α=30°	α=45°	α=60°
10	9.8	5.6	3.2
100	12.0	6.9	3.9
1 000	14.9	8.5	4.8
10 000	17.0	9.7	5.5

综上，当通信基站有出入金属缆线时，高压电力线也会在与之平行或交越接近的金属缆线上，产生磁感应纵电动势，交叉角度越小产生的感应电动势越大，因此，为减小高压电力线对通信线路的感性耦合影响，应使进出基站的缆线与高压电力线的交叉角尽量接近90°。

4 高压电力线的阻性耦合

流经输电线路杆塔接地装置的短路电流，在流入、流出大地的区域与远方大地之间产生电位差，使大地电位升高，通过大地电阻耦合对通信局（站）接地装置、埋地电缆、埋地光缆产生的影响，可称为阻性耦合。

高压线对地短路，引起铁塔地网产生很高工频地电位升（几千伏到几十千伏），将导致通信设备及线路绝缘损坏甚至引发火灾；地电位升沿着外部引入低压电源线传导到共变压器，还会带来附近居民人身危险和财产损失。

4.1 电力系统接地故障特性分析

当中性点直接接地的电力系统发生接地故障时，在馈电变电站，以及故障位置（可能是安装无线电基站的塔）都会出现地电位升高。在大多数情况下，地电位

升在故障处将高得多，因为故障点对地的等效阻抗远高于变电站。

非直接接地中性点发生接地故障时，由于故障电流幅值小，地电位升很小。然而，双接地故障也可能发生。在这种情况下，故障电流将高得多，并在2个故障位置上产生相当大的地电位升。

4.1.1 铁塔及附近地电位升

当大电流入地时，比如雷击铁塔或中性点直接接地的电网线路发生单相接地故障或中性点非直接接地的电网线路发生两相接地故障时，在铁塔处将出现较大的地电位升，可能是几十kV。

铁塔电位上升是由于故障电流导致铁塔接地（基础）相对于大地远处地电位升高。

当输电线路装有架空地线时，大部分故障电流通过这些线路返回，只有一小部分接地故障电流流过塔脚。铁塔地电位升可以通过塔脚接地故障电流的零序分量（$3I_0E$）和塔脚接地电阻（R）的乘积，即$3I_0ER$来计算。

当电力线没有接地线时，整个故障电流流过塔脚。铁塔地电位升可由接地故障电流的零序分量（$3I_0$）和塔的接地电阻（R）的乘积，即$3I_0R$来计算。

铁塔外区域地电位升是指远端单相接地故障，或非直接接地网络双接地故障时，导致铁塔区域相对于远端地电位下降，这个电位降或多或少形成电位漏斗，从塔脚开始增加。

地电位升可依据下式计算。

$$V=IRK_dK_P \tag{11}$$

式中：

I——计算点高压输电系统接地网的单相对地故障短路电流（A）

R——计算点高压输电系统接地网的接地电阻（Ω）

K_d——计算点高压输电系统的地电流系数

K_P——计算点高压输电系统接地网地电位衰减系数

网内短路时，

$$K_{d1}=\left(1-e^{-\beta}\right)\left(1-\frac{Z_{MO}}{Z_{LO}}\right) \tag{12}$$

网外短路时，

$$K_{d2}=\left(1-\frac{Z_{MO}}{Z_{LO}}\right) \tag{13}$$

式中：

Z_{MO}——“导线—地”与“地线—地”两回路间的零序互感阻抗

Z_{LO}——高压避雷线的零序自感阻抗

因此由上述计算式可知，铁塔地电位升高的幅值取决于接地故障电流幅值、接地电阻、架空地线、到变电站的距离、塔之间的距离等许多不同的因素。

4.1.2 接触电压和跨步电压

地电位升对人员所造成的危害主要是电击危害，产生危害的主要原因是接触电压和跨步电压超过了人体能承受的安全电压。

跨步电压和接触电压的计算如图3所示。

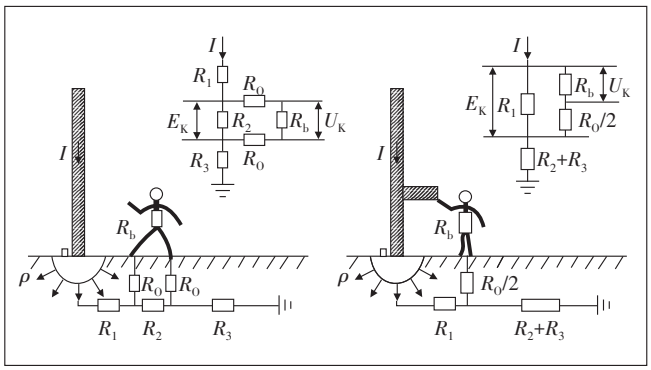

图3 跨步电压和接触电压的计算示意图

由图3可知，当人在地面行走时，人体两脚间的实际电压即跨步电压为：

$$U_k=\frac{R_b}{R_b+2R_0}E_k=\frac{R_b}{R_b+6\rho}E_k \tag{14}$$

当人站立于地面并用手接触接地的金属导体时，人的手与脚间的实际电压即接触电压为：

$$U_J=\frac{R_b}{R_b+0.5R_0}E_J=\frac{R_b}{R_b+1.5\rho}E_J \tag{15}$$

体重为50 kg的人体安全电流为：

$$I_{K50}=0.116/\sqrt{t} \tag{16}$$

根据以上公式，考虑到地面高电阻层修正系数C_s，可计算出体重为50 kg的人体在均匀土壤上的跨步电压和接触电压限值。

$$U_{K50}=\frac{116+0.7\rho_sC_s}{\sqrt{t}} \tag{17}$$

$$U_{J50}=\frac{116+0.17\rho_sC_s}{\sqrt{t}} \tag{18}$$

综上可知，加大地表土壤的电阻率可以增大人脚与土壤间的接触电阻，从而降低跨步电压和接触电压。

减小跨步电压和接触电压的主要措施有：

a）减小接地电阻。通常会采用减小接地电阻的方式减小跨步电势和接触电势,从而能够减小跨步电压和接触电压。

b）增大地表的土壤电阻率。增大地表的土壤电阻率,就意味着增大了人脚与地面的接触电阻,从而减小通过人体的电流,进而达到减小跨步电压和接触电压的目的。

c）减小基站附近地表分布的电位梯度,也能减小接触电势和跨步电势。

因此,对于与电力塔共站的基站来说,可以在基站周边采取均压措施来降低电击危害。即在基站的进出口、走道以及设备附近,增埋水平接地体(即均压带),如图4和图5所示,在基站机房外设置均压带(40 mm×4 mm热镀锌扁钢)。将基站均压网与铁塔地网可靠连接形成联合接地,能够有效改善地面上的电位分布。

上述各项措施应有效结合相辅相成,不应只强调某一措施,而忽略其他。只有综合采用各项措施,才能取得更好的效果。

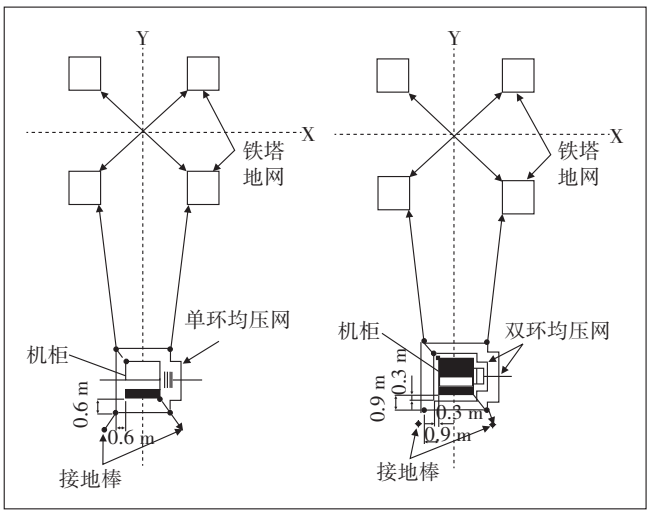

图4　基站位于铁塔外部时均压网的连接方式

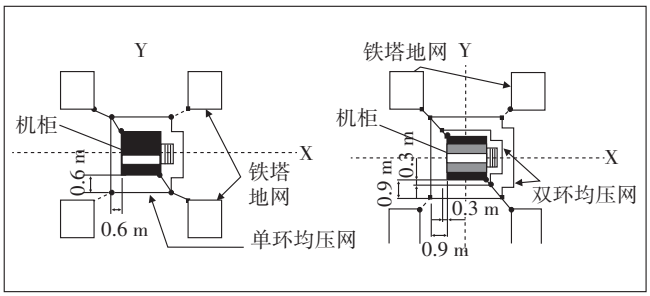

图5　基站位于铁塔内部时均压网的连接方式

上述的讨论都是针对在供电系统故障情况下,对人身安全的保护。而对于设备的保护,由于故障时过电压水平一般不高,通常是依靠提高设备的绝缘等级、迅速切除故障以及增强系统内各设备间的等电位连接等措施加以解决,在此就不详述了。

4.2 低压网络供电及防护

4.2.1 低压网络供电方案

低压网络供电是指从居民变压器或居民接电点处引出380或220 V电源线供给基站使用。

图6显示了基站从低压网络供电时的方案。

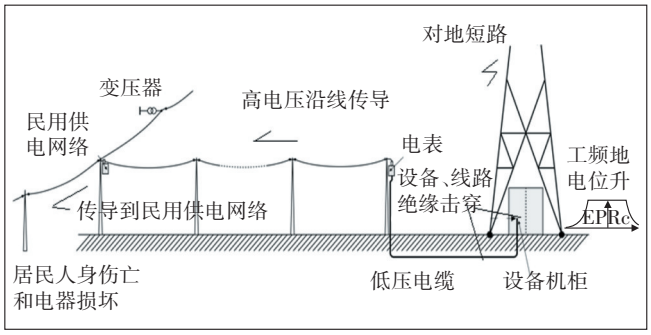

图6　低压供电方案

由前述分析可知,高压线对地短路时,会引起铁塔地网产生很高的工频地电位升(几千伏到几十千伏),地电位升将沿着引入的低压电源线传导到共变压器的居民区,使变压器和居民电器设备电位升高,造成附近居民人身危险和财产损失。

4.2.2 防护方案

采用低压网络对基站供电时,可采取在低压网络和基站之间使用隔离变压器的方式将可能产生的高压和低压网络隔离开。

雷电过电压或者短路故障过电压可能发生在绕组之间或隔离变压器的初级绕组和地之间。对于这样高的过电压防护水平,只依靠隔离变压器是不可行的。因此,应该通过SPD来保护,SPD连接在一次侧端子和地之间(如图7所示),可以减少二者的电位差,达到保护的目的。

使用隔离变压器时,应注意隔离变压器的绝缘水平。隔离变压器初级绕组工频绝缘耐压水平应高于由于接地故障引起的铁塔地电位上升的最大均方根值,另外,隔离变压器初级绕组的冲击电压耐受强度应高于所设置的中压SPD的残压。

中性线在接线的端子处与屏蔽层连接并在接电点处接地。在基站处,屏蔽层和铁塔地之间连接单个中

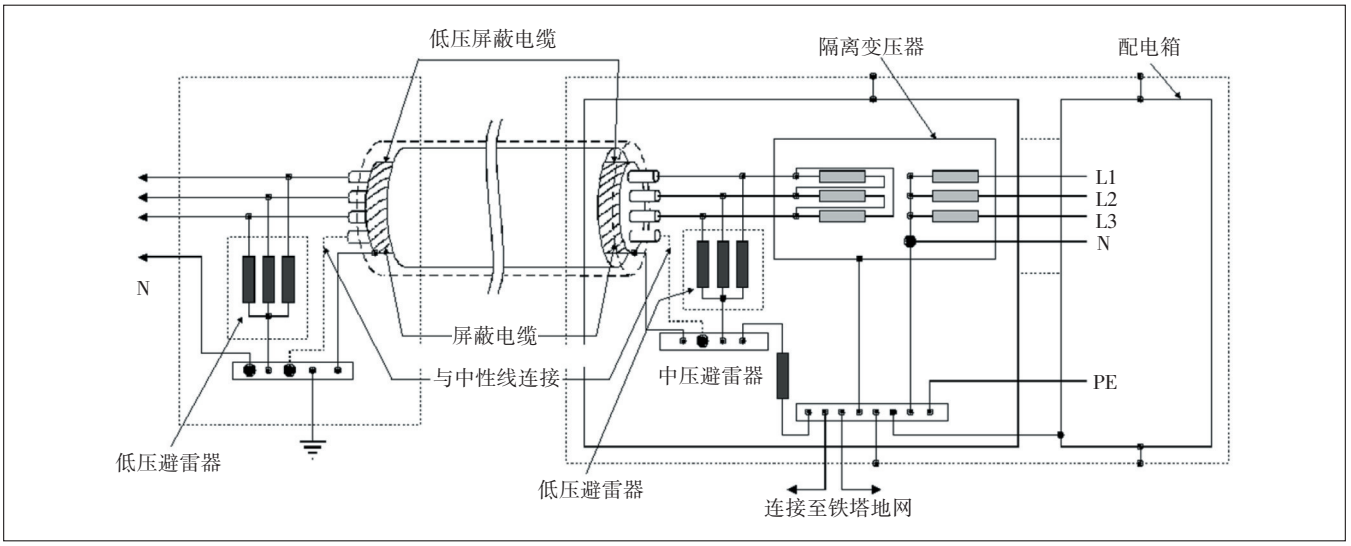

图7 两端分别采用SPD保护的接地方式

压SPD,铁塔带来的高电位由此SPD钳位。屏蔽层和三相线之间的过电压由低压SPD钳制。

为了对电缆实施良好的保护,低压侧电缆采用铠装电缆或导线穿钢管。配线电缆屏蔽层两端、保护钢管两端均应接地,且在电缆两端加装避雷装置,是为了产生电磁封锁效应,尽量减少雷电波的侵入,减少或消除雷电事故。

5 总结

综上所述,基站与高压电力塔共站时需要做好高压电力线对基站的危险影响防护,尤其要关注高压电力线故障时地电位反击对基站及附近居民的影响。主要有以下措施:

a)可以通过增大高压电力线路与通信设备的间距达到减小或消除容性耦合影响的目的。

b)应使进出基站的缆线与高压电力线的交叉角尽量接近90°,以减小通信缆线上的感生电动势。

c)做好基站供电线、设备、信号线等与电力塔的等电位连接及采用均压网或增大地表土壤电阻率等方式降低跨步电压和接触电压,以保障维护人员和周边活动人员的人身安全。

d)通过接地和隔离等方式减小地电位反击对附近居民用电网络、人身安全的影响。

参考文献:

[1] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范:GB/T 50064-2014[S/OL].[2020-03-02]. https://max.book118.com/html/2019/04 06/5043201303002023.shtm.

[2] 通信局(站)防雷与接地工程设计规范:GB 50689-2011[S/OL].[2020-03-02]. https://www.mayiwenku.com/p-13125.html.

[3] 110 kV~750 kV架空输电线路设计规范:GB 50545-2010[S/OL].[2020-03-02]. https://max. book118. com / html / 2019 / 0127 / 605403403 2002004.shtm.

[4] 交流线路带电作业安全距离计算方法:GB/T 19185-2008[S/OL].[2020-03-02]. http://www.doc88.com/p-9425084092103.html.

[5] 何金良,曾嵘.电力系统接地技术[M].北京:科学出版社,2007.

[6] 高压输电系统对通信设施危险影响防护技术要求:YD/T 2979-2015[S/OL].[2020-03-02]. https://max.book118.com/html/2018/1221/6130155145001240.shtm.

[7] 民用建筑电气设计规范:JGJ 16-2008[S/OL].[2020-03-02]. https://wenku.baidu.com/view/5454465e26d3240c844769eae009581b6bd9bd0c.html.

[8] 邬雄,万保权.输变电工程的电磁环境[M].北京:中国电力出版社,2009:168-181.

[9] 申元,谢冬冬,胡艳.电力、通信"共享"铁塔的基站天线设置分析[J].电力设备,2019(15).

[10] 祁征,林成.基站遭雷击对附近居民人身安全及家用电器的影响研究[J].邮电设计技术,2014(5):88-92.

[11] 刘吉克.移动通信基站的防雷与接地[J].邮电设计技术,2000(5):34-38.

[12] 何金良.电磁兼容概论[M].北京:科学出版社,2010.

[13] 李景禄,郑瑞臣.关于接地工程中若干问题的分析和探讨[J].高电压技术,2006,32(6):122-124.

[14] 李景禄.现代防雷技术[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

作者简介:

祁征,高级工程师,硕士,主要从事通信防护、防雷及电磁兼容相关的咨询、设计、检测及研究工作;陈强,教授级高级工程师,学士,主要从事通信防护、防雷及电磁兼容相关的咨询、设计、检测及研究工作;牛年增,高级工程师,硕士,主要从事通信防护、防雷及电磁兼容相关的咨询、设计、检测及研究工作。