

配电变压器雷击损坏的原因及防雷措施

方 晴

(四川省广元电业局, 四川 广元 628000)

摘 要: 阐述了配电变压器防雷接线的特点, 分析了配电系统中过电压产生的机理, 指出了配电系统防雷保护存在的主要问题, 提出了几种主要的防雷保护措施。

关键词: 配电变压器; 过电压与防雷保护; 分析

Abstract: The characteristics of lightning protection connection of the distribution transformer are introduced, and the mechanism of overvoltage occurring in distribution system is analyzed. The main problems existing in lightning protection of distribution system are pointed out, and several protection measures against lightning are proposed.

Key words: distribution transformer; overvoltage and lightning protection; analysis

中图分类号: TM86 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0032-06

1 配电变压器防雷接线的特点

根据 DL/T620-1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规程规定, 配电系统中的配电变压器, 其高低压侧均应装设阀式避雷器保护。阀式避雷器应尽量靠近变压器装设, 其接地线和变压器低压侧中性点(中性点不接地时则为中性点的击穿保险器的接地端)以及变压器的金属外壳三点应连在一起接地, 其接地电阻一般不应大于 4Ω 。其具体接线如图 1 所示。其特点可归结为:

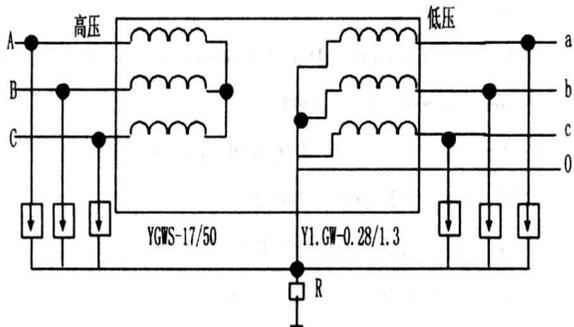


图 1 配电变压器防雷保护接线图

1.1 高低压侧均装设避雷器保护

高压侧避雷器应装设在跌落保险下方。理由是:

- ①可以减少避雷器引下线长度, 使避雷器离变压器更近, 保护效果更好;
- ②当避雷器质量不良, 放电后不能熄弧时, 工频续流使保险丝熔断, 保险管自行跌落与系统分离, 从而缩小了事故停电范围;
- ③便于避雷器

的更换试验, 只要将变压器高压侧跌落保险拉开即可自行换装。

1.2 “三位一体”的接地方式

即避雷器的接地线和低压绕组的中性点及变压器金属外壳连结在一起。其目的是避免雷电流流过接地装置时产生的压降与避雷器残压叠加起来作用在变压器绕组绝缘上导致绝缘损坏。若避雷器独立接地, 如图 2 所示, 则绕组上的对地电压为 $(U_c + IR)$, 其中 I 为冲击电流。由于变压器冲击绝缘水平是和避雷器的残压 U_c 配合的, 也即只允许 U_c 作用于绕组上。所以这种接线方式可能使变压器绝缘损坏。

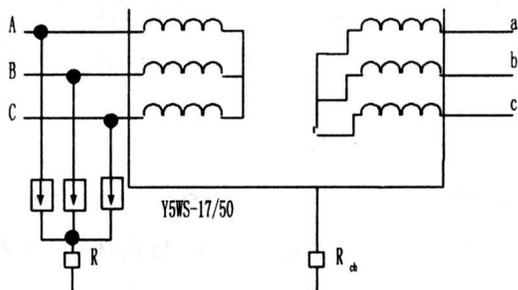


图 2 “三位”不共同接地的接线

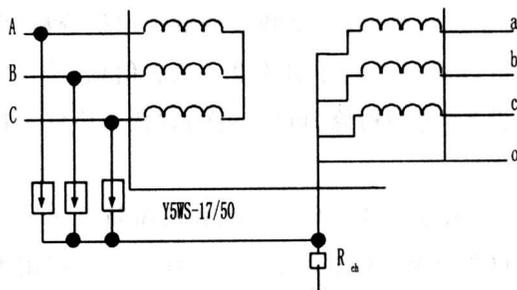


图 3 避雷器与变压器外壳共接地

若变压器低压绕组的中性点不与避雷器接地端和变压器外壳相连接,如图3所示。这时绕组上的对地电压即主绝缘的电压就是避雷器残压,但是,接地电阻上压降将使外壳(对地)电位抬高到 IR_{ch} ,可能造成对低压绕组绝缘的损坏。

2 配电变压器中的过电压

2.1 逆变换过电压

所谓逆变换过电压,即当 $3\sim 10$ kV 侧侵入雷电波,引起避雷器动作时,在接地电阻上流过大量的冲击电流,产生压降 IR_{ch} ,这个压降作用在低压绕组的中性点上,使中性点的电位抬高,当低压线路比较长时,低压线路相当于波阻抗接地。因此,在中性点电位作用下,低压绕组将流过较大的冲击电流,如图4所示。三相绕组中流过的冲击电流方向相同、大小相等,它们产生的磁通在高压绕组中按变压器匝数比感应出数值极高的脉冲电势。三相脉冲电势方向相同、大小也相等(假定三相磁路对称)。由于高压绕组接成星形,且中性点不接地,因此在高压绕组中,虽有脉冲电势,但无冲击电流。冲击电流只在低压绕组中流通,高压绕组中没有对应的冲击电流来平衡,因此,低压绕组中的冲击电流全部成为激磁电流,产生很大的零序磁通,使高压侧感应很高的电势。由于高压绕组出线端电位受避雷器残压固定,这个感应电势就沿着绕组分布,在中性点幅值最大。因此,中性点绝缘容易击穿。同时,层间和匝间的电位梯度也相应增大,可能在其他部位发生层间和匝间的绝缘击穿。这种过电压首先是由高压进波引起的,再由低压电磁感应至高压绕组,通常称之为逆变换。

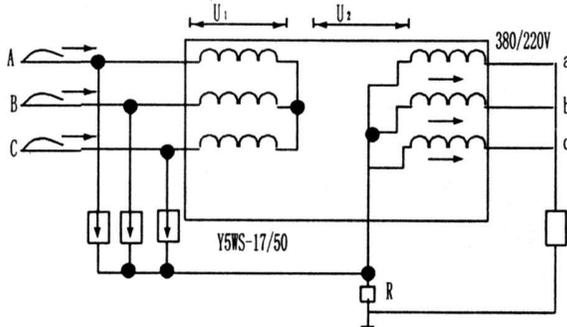


图4 产生逆变换过电压情况

来简要分析高压侧雷击时所引起的电流分布和逆变换过电压,如图5所示。

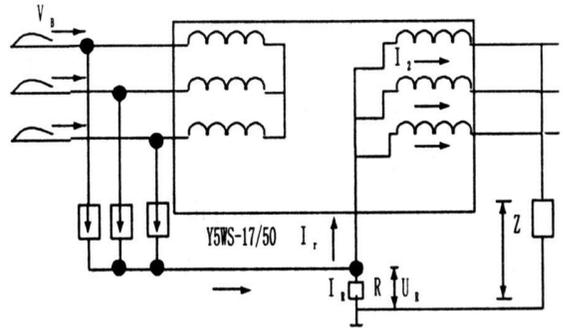


图5 配电变压器高压侧雷击的电流分布

假如变压器的冲击接地电阻 $R=7\ \Omega$, 避雷器动作后,流过的雷电流 $I_b=5$ kA, 由于接地电阻 R 一般比变压器低压绕组的阻抗小很多, I_r 可以忽略不计,则在 R 上所产生的电压 $I_r \cdot R \approx 35$ kV。这一电压降将作用在低压侧中性点上,而低压侧出线此时相当于导线波阻抗 Z 接地, Z 比变压器低压绕组的阻抗小得多,因此 $I_r \cdot R$ 绝大部分都加在低压绕组上。由于电磁感应,在高压绕组上将按变比出现高电压,例如 $10/0.38$ kV 变压器的变比为 26, 10 kV 绕组两端的冲击电压几乎达到 $26 \times 35 = 910$ kV。由于高压绕组出线端的电位受到避雷器冲击放电电压所固定,因此,这 910 kV 的高电位将沿高压绕组分布,最大值出现在中性点上,再叠加上避雷器残压,可能将中性点附近的绝缘击穿(中性点及主绝缘冲击绝缘水平仅 75 kV),此 910 kV 的高电位沿高压绕组产生的纵向电压很高,且可能产生振荡,因而也可能将高压绕组中性点附近或其他部分的层间或匝间绝缘击穿。表1给出了某单位近年来配电变压器(含农网设备)的雷击损坏情况^[2]。由此可见,配电变压器的雷击损坏大多数发生在高压绕组的层、匝间,这与理论分析是一致的。

表1 雷击配电变压器的损坏情况

损坏部位	损坏数占总损台数的百分数(%)
高压绕组层间损坏	73.8
高压绕组主绝缘损坏	6.9
套管闪络	10.8
低压绕组损坏	5.4
其他	3.1

下面以 Y, yn⁰ 接线的 10 kV 配电变压器为例,

逆变换过电压幅值的大小与下列因素有关:

(1)与进波方式有关。高压三相进波比单相或两相进波所引起的逆变换过电压高。

(2)与雷电流大小有关。逆变换过电压与通过变压器高压侧避雷器的雷电流有关,也就是说与进波电压幅值或线路绝缘水平有关,高压进线绝缘水平越高,逆变换电压也越高。

(3)与进波波长有关。逆变换过电压亦与进波波长成比例,波长越长,振荡过程可以得到充分发展,过电压也越高。

(4)与接地电阻大小有关。接地电阻越大,流过低压绕组的雷电流也越大,逆变换过电压幅值就越高。例如,当接地电阻为 $5\ \Omega$ 时,中性点电位为进波幅值的 85%;当接地电阻为 $47\ \Omega$ 时,中性点电位为进波幅值的 160%,如表 2 所示。因此,在山区、高土壤电阻率地区,逆变换过电压幅值很高,配电变压器损坏的可能性更大。

表 2 接地电阻对中性点电位的影响(进波百分比)

名称	数值				
接地电阻(Ω)	5	10	47	100	300
中性点电位 U(%)	85	110	160	175	175

(5)与低压侧线路的波阻抗 Z 有关。如果低压线路绝缘没有闪络,即相当于经 Z 接地,流经低压绕组的电流较小,因而这变换过电压较低;若低压线路绝缘破坏(可能性大),则相当于经线路的电阻(远小于 Z)直接接地,流经低压绕组的电流较大,因而过电压就较高,低压零线的存在减小了低压绕组的电流,也有助于降低逆变换过电压。

(6)与变压器变比有关。逆变换过电压与变比成正比,故 $35/0.38\ \text{kV}$ 的变压器比 $10/0.38\ \text{kV}$ 者严重。

2.2 正变换过电压

所谓正变换过电压,即当雷电波由低压线路侵入时,配电变压器低压绕组就有冲击电流流过,如图 6 所示。这个冲击电流也同样按匝数比在高压绕组上产生感应电动势,使高压侧中性点电位大大提高,绕组层间和匝间的电位梯度也相应地增加。这种由于低压进波在高压侧产生感应过电压的过程,称为正变换。试验表明,当低压过电压波为 $10\ \text{kV}$,接地电阻 $5\ \Omega$ 时,高压绕组上的层间电位梯度可能超过配电变压器的层间绝缘全波冲击强度一倍以上,必然威胁变

器绝缘,如图 7 所示。

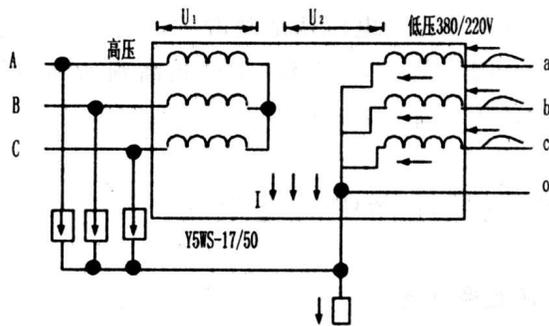


图 6 配电变压器产生正变换

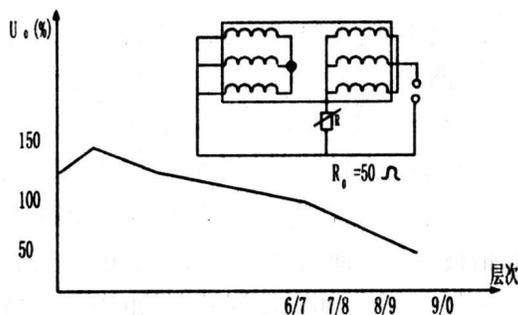


图 7 低压三相进波层间梯度电压

根据理论分析和试验结果表明^[2],影响正变换过电压的因素有:

(1)与进波方式有关。低压三相进波比单相进波所引起的正变换电压要高,但低压线路绝缘水平低,一般仅为 $60\ \text{kV}$ 左右,故雷击时基本上为三相进波。

(2)与进波波长有关。过电压与冲击波波长成正比,波长越长,振荡过程可以得到充分发展,过电压也越高。

(3)与变压器的变比有关。过电压与变压器变比成正比,因此 $35/0.4\ \text{kV}$ 配电变压器的正变换过电压比 $10/0.4\ \text{kV}$ 更为严重。

(4)与低压过电压波的幅值有关。即与低压线路的冲击绝缘水平有关,绝缘水平高,低压侧过电压的幅值大,高压侧感应电势也大。

(5)与接地电阻大小有关。接地电阻大小的影响和逆变换的情况正好相反。如图 8 所示。因为接地电阻小,低压过电压波引起的冲击电流大,在高压侧就感应出较高的电势,反之亦然。

综上所述,即使配电变压器按规定的冲击绝缘水平设计,避雷器的性能符合要求。雷击时,由正、逆变

换引起的过电压,对配电变压器的绝缘仍构成威胁。避雷器对这种过电压失去保护作用。这个结论与运行情况相符。在雷电活动强烈地区,配电变压器损坏率较高,除个别变压器是由于制造工艺所造成的缺陷或极个别避雷器的性能较差失去保护作用外,有相当多的配电变压器的损坏是由于上述正、逆变换过电压造成的。运行经验表明,配电变压器遭受雷击损坏时,往往伴有低压设备(如电度表、电动机、电灯等)同时被击坏的现象,这说明配电变压器雷击损坏和在低压线路上出现的雷电过电压有联系。

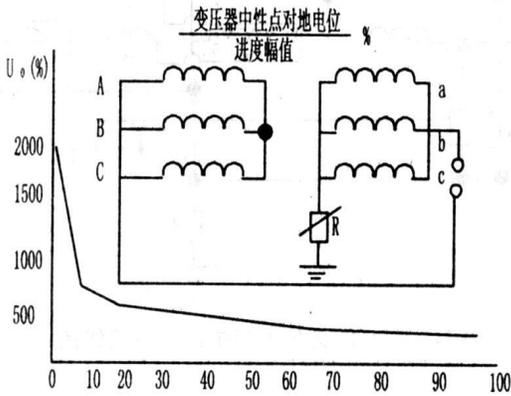


图8 低压三相进波正变换中性点对地电位

3 配电变压器雷击损坏的主要原因

3.1 忽视在配电变压器低压侧装设避雷器

农村配变的防雷保护工作一般只重视在配变的高压侧装设避雷器,而忽视低压侧也需装设避雷器的问题(尤其是多雷地区)。如前所述,因为高压侧避雷器向大地泄放很大的雷电流时,在接地装置上产生电压降,此电压经配变外壳同时作用在低压侧绕组的中性点,而低压侧绕组通过低压线路的波阻抗接地。因此,低压侧绕组中流过雷电流,它使高压侧绕组按变比感应出很高的电势(可达1 000 kV),即“反变换”电势,该电势与高压侧绕组的雷电侵入波电压叠加,会使高压侧绕组中性点电位变得很高,击穿中性点附近的绝缘。

3.2 避雷器损坏后未及时检出

有关部门的调查表明,有些避雷器运行12年未做过检查试验,有的作了试验,其中有12%不合格。由于避雷器损坏后未能及时检出,造成配电变压器实际上没有保护,因而当雷电波侵入时易导致配电变压器损坏。

3.3 避雷器接地引下线过长

配电变压器高压侧避雷器装于高压熔丝的下方,其接线端与配电变压器外壳和中性点的接地处的连接线有电感,当雷电流通过连接线时要产生电压降,它和避雷器的残压叠加在一起作用到变压器绝缘上,将威胁变压器的安全。譬如长度仅0.6 m的连接线约有1 μH的电感,如果在不大的雷电流陡度 $di/dt = 5 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 时,其电压降也可达到 $(di/dt)L = 5 \text{ kV}$ 。按接地线不超过5 m考虑,也可达40 kV,该电压和避雷器上的残压(一般为20~50 kV)叠加,这已经接近10 kV配电变压器全波冲击耐压值75 kV,再考虑绝缘老化的因素,势必导致变压器高压绕组的绝缘损坏。因此避雷器的接地点到变压器外壳的连接线应尽量缩短。

3.4 高压侧避雷器距配电变压器过远

因配电变压器高压侧要装设高压开关和高压熔断器,如果设计安装位置不当,就会使得高压侧避雷器的连接点 a 距配变的高压接线端 b 的距离 L 过长,当雷电侵入波经 a 点达到 b 点后发生反射,其反射波与侵入波叠加,使 a 、 b 两处的电压都升高。而高压侧避雷器 F_1 放电需要经过一定的时间,这就使得 b 处的电压比 F_1 的放电电压要高出一定的值,该值的大小与距离 L 成正比。如果变压器绝缘承受雷电冲击的能力达不到该值,就会损坏变压器。因此,尽可能缩短 L 的长度,就有利于变压器的安全,由过电压理论可推出 L 应满足如下关系式^[1]:

$$L \leq (U_T - U_5) V / 2\alpha$$

式中: U_T ——变压器绝缘耐受全波雷电冲击电压的能力,一般可取75 kV;

U_5 ——避雷器在5 kA下的残压冲,可查避雷器铭牌参数;

V ——雷电冲击波波速,可取300 m/μs;

α ——雷电波陡度,视当地雷暴情况可取150~300 kA/μs。

3.5 接地电阻过大

配电变压器的防雷装置能否起到良好的保护作用,其接地装置的质量至关重要。有相当多的农村配变的接地装置不符合要求,有的是接地体钢材埋深不够,有的是接地线不符合要求,使得接地装置的接地电阻大于10 Ω。从而使配变外壳的电位升高,这不利于变压器的安全。

3.6 接地线安装不当

有许多农村电工,甚至供电部门的技术人员在安装避雷器的接地线时,常常将避雷器的接地线直接接地,然后再从接地桩子上另引一根接地线至变压器的

外壳,这种接法表面上看来没有什么问题,但实际上是不正确的。因为当雷电流侵入,避雷器放电时,进入地下的雷电流在接地电阻上将产生较大的压降,它和避雷器上的残压叠加后加到变压器上,可使变压器损坏。

3.7 配电变压器本身绝缘薄弱或存在缺陷

配电变压器本身缺陷也是造成线圈损坏的原因之一。根据原北京电力建设科学技术研究所调查分析^[2],14 800 台年配电变压器的运行经验表明:在雷击损坏事故中,大约有 37% 是因绝缘存在缺陷而引起的。

4 配电变压器的防雷保护措施

目前,配电变压器防雷保护工作除了应确保避雷器的连接线应尽可能短,接地装置符合要求等基本措施外,主要有以下几方面的研究与应用:

4.1 配电变压器低压侧加装避雷器

如果低压侧装有避雷器,当高压侧避雷器放电,接地装置上电位升高到一定值时,则低压侧避雷器就会放电,使低压侧绕组出线端电位与其中性点及外壳的电位差减小,就能消除或减小“反变换”电势。对于 Y,yn⁰ 接线的配电变压器,特别是低压出线较长,易受雷击或线路绝缘水平较高(例如采用木杆、石杆、木担、瓷担或高压瓷瓶的低压线路)的配电变压器,低压侧更有必要采取保护措施,且将低压绝缘子铁脚接地以提高保护的可靠性。

4.2 选择防雷保护性能优异的金属氧化物避雷器

由于金属氧化物避雷器具有优异的防雷保护性能,目前已大量采用,将逐步取代传统的阀式避雷器。

配电变压器低压侧避雷器额定电压是由最高运行电压乘 1.1 的接地余度系数确定的,主要型号一般有 Y_{1.5}W-0.28/1.3(220 kV 系统)或 Y_{1.5}W-0.5/2.6(380 kV 系统)。在安装时应与变压器的电气距离不超过 5 m 为宜,一般装于变压器低压侧出线总开关或总保险丝的外侧,也可直接吊装于低压出口处的变压器旁边,与变压器共用接地装置。

配电变压器高压侧无间隙金属氧化物避雷器型号一般选择 Y5WS-17/50,而对于雷击活动频繁地区,为减轻阀片负担,避免热崩溃,宜采用内部带串联间隙的氧化物避雷器 Y5CS-12.7/45。

4.3 采用 Z 型接线的防雷配电变压器

不管是正变换过电压,还是逆变换过电压,均是

由于低压绕组中有冲击电流,并在高压绕组中感应出高电压而损坏变压器。所以若能减小或消除低压绕组中的冲击电流,就能降低或消除正、逆变换过电压。低压绕组采用曲折星形连接或 Z 型连接的变压器可以实现这个目的,而且其零序阻抗也较小,有利于过流保护。通常采用的连接方式是 Y,Zn11 组别。如图 9 所示。

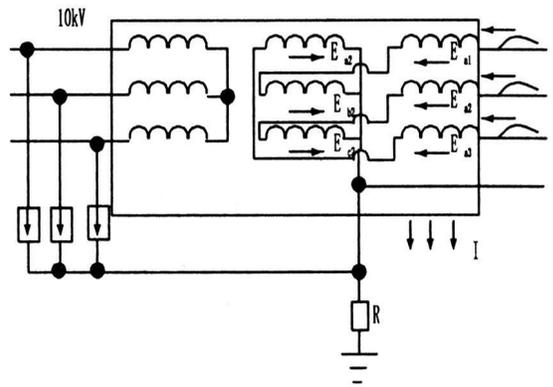


图 9 Y,Zn11 连接的配电变压器接线图

当其低压三相进波或高压侧进波,每个铁芯柱上有两个半绕组,这两个半绕组中流过的冲击电流大小相等,但方向相反。无论流过低压绕组的冲击电流有多大,每个铁芯柱上的总磁势都等于零,磁通也就等于零,从而在高压绕组中几乎没有正、逆变换过电压。由于实际的变压器磁路和结构不完全相同,有很小的过电压产生。因此,在雷害严重地区采用这种接线的配电变压器防雷效果十分明显,而且低压侧也不必装设低压避雷器。

4.4 加强生产工艺,提高配电变压器的制造质量

(1)层间绝缘使用的电缆纸必须注意质量,尽量采用较薄的电缆纸,因为在达到同样厚度时,用较薄的电缆纸层数较多,而针孔容易错开,同时厚的电缆纸往往均匀度较差。

(2)高压绕组分接头板尽量避免使用布质层压板,以免由于沿板层间击穿强度较低而分接头在振荡过程中击穿。

(3)低压绕组出线必须保证先弯曲成形后再包扎绝缘,因为低压绕组一般是两层,绕组首末端靠在一起,此处绝缘承受了全部绕组的层间过电压,同时低压绕组导线较粗,弯曲时外包绝缘容易折断,容易造成低压绕组首末端击穿。

4.5 在配电变压器高压侧加装电抗线圈

在配电变压器高压侧加装电抗线圈有两个作用:

其一是抬高它前面的阀式避雷器冲击电压,使避雷器容易放电,从而保护变压器。其二是降低波前陡度,减小作用于变压器匝间和层间的冲击电压梯度,保护配电变压器的纵绝缘。

实践中,往往采取综合防雷保护措施,为配电变压器的保护设置多道防线,即是上述的有关保护措施加以组合,从多方面来限制侵入配电变压器的雷电波,使配电变压器免遭雷害,达到安全运行的目的。

4.6 加强配电变压器运行管理

在实施以上有关技术措施的同时,必须重视和加强配电变压器运行管理,定期测试变压器的绝缘状况,进行变压器油试验分析,测量接地电阻,检测高、低压避雷器,以保证变压器绝缘水平和保护装置的良好可靠,这些是做好配电变压器防雷的基础。

5 结语

(1)配电系统中的正逆变换过电压是导致配电变

压器雷击损坏的根本原因,而防雷保护装置安装设计不当是配电变压器雷击损坏的主要原因;

(2)配电系统中的配电变压器防雷保护应在其高低压侧均应装设金属氧化物避雷器保护,且要求“三位一体”的防雷接地方式,接地电阻符合有关要求。接地引下线,以及避雷器至被保护变压器的连接导线长度应尽可能短,并按规定校核。

参考文献

- [1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:中国水利电力出版社,1985.
- [2] 陈化钢等. 电力设备异常运行及事故处理[M]. 北京:中国水利电力出版社,2005.

作者简介

方晴(1963—),男,四川重庆人,高级工程师,四川广元电业局生产副局长,从事电力生产管理工作。

罗军川(1966—),男,四川剑阁人,现就职于四川广元电业局生产技术部高级工程师,主要从事电力生产技术管理工作。
(收稿日期:2008-02-14)

(上接第15页)

表4 500 kV 线路直线塔不均匀覆冰不平衡张力百分数算例

冰区 (mm)	覆冰率	计算档距 (m)	导线	地线(1) (双联串)	地线(2) (单联串)
50	20/100	250	5.4	34.1	42.0
		300	10.8	49.1	53.4
		350	19.4	56.4	59.0
40	20/100	250	3.3	17.7	25.1
		300	6.6	34.9	41.6
		350	11.6	46.6	50.7
30	20/100	300	2.7	9.6	13.4
		350	4.9	18.1	24.2
		400	7.9	28.7	34.4
20	20/100	350	4.1	23.4	25.9
		400	6.6	31.7	33.7
		450	9.9	37.4	38.9

30、40 mm 冰区: $4 \times A3/S1A-465/60$, $N=2.895$, 串长 6.217 m, 串重 6 111N;

50 mm 冰区: $4 \times A3/S3A-465/60$, $N=2.65$, 串长 6.342 m, 串重 8 114N。

地线:

(1)20 mm 冰区: $GJ-100$ (1 270 MPa), $N=3.2$, 双联串长 0.47 m, 串重 180 N;

30、40 mm 冰区: $GJ-120$ (1570 MPa), $N=2.65$,

双联串长 0.57 m, 串重 234 N;

50 mm 冰区: $GJ-150$ (1570 MPa), $N=2.7$, 双联串长 0.57 m, 串重 234 N。

(2)单联串长 0.4 m, 串重 100 N, 其余同(1)。

影响直线塔不均匀覆冰不平衡张力计算结果的因素主要有:各挡覆冰厚度取值、耐张段的档数、档距、高差、绝缘子金具串长度、架线张力等,工程设计时需根据规程要求结合工程具体条件进行计算。

4 结论

(1)所述的重冰区输电线路在覆冰断线工况和不均匀覆冰工况下的纵向张力计算方法,适合于用计算机进行数值求解。经编制程序进行计算,并与有关资料对照,表明计算方法是可靠的。

(2)影响直线塔覆冰断线张力及不均匀覆冰不平衡张力计算结果的因素很多,工程设计时应根据规程要求结合工程具体条件进行计算。

(3)以不均匀覆冰工况下的纵向张力及档距变化计算结果为基础,可以计算不均匀脱冰时导地线之间静态及动态接近距离,为杆塔地线支架高度设计取值提供依据。所述算法同样适用于轻冰区线路的相关计算。
(收稿日期:2008-03-05)