

基于雷电流传输特性与时频特性的防雷器件应用设计与应用分析

在电力系统的防雷保护中，雷电流的传输特性和时频特性直接影响了雷击杆塔后的塔顶的暂态过电压水平，进而决定了输电线路的雷击闪络率。提出一种基于雷电流传输特性与时频特性的防雷器件的设计方法，该器件能够有效地改变雷电流的波形与幅值；通过大幅度增加雷电流波前时间和减小雷电流幅值的方法，防雷器件能有效降低杆塔塔顶雷击后的暂态过电压水平，进而降低输电线路的反击闪络率。冲击电流试验结果表明，雷电流波前时间越短、波形陡度越高，防雷器件对其陡度的抑制效果越显著，雷电流波前时间增幅越大，雷电流幅值衰减也越大，防雷效果越好。防雷器件独特的设计和良好的防反击性能使其在500 kV以下输电线路防雷中具有较大的应用前景。

高利军/内蒙古农业大学机电工程学院



高利军/副教授

关键词/Keywords

雷电流·
传输特性·
时频特性·
陡度·
防雷器件·

雷击是造成输电线路闪络的主要原因，在我国高跳闸率区域，雷击引起的跳闸次数约占总跳闸次数的40%~70%，这一比例在多雷、高土壤电阻率和地形复杂的区域则更高^[1]。南方电网公司所辖线路均位于雷电活动强烈地区，雷害情况严重，以2008年为例，南方电网110 kV及以上输电线路雷击跳闸率为61.1%。而在日本50%以上的电力系统故障是由雷击输电线路引起的^[2]，因此如何有效地提高输电线路的防雷性能对系统的安全稳定运行有着十分重要的意义。

长期运行经验表明，对于500 kV以上的超高压、特高压输电线路，绕击是造成雷击跳闸的主要原因；而对于500 kV以下的输电线路，雷击杆塔和避雷线引起

的反击则是线路雷击事故的主要原因^[3-4]。

目前，我国电力部门考核的主要是雷击闪络率，因而我国防雷措施的出发点是尽量不让线路发生闪络，目前主要的防雷措施包括：安装避雷线和耦合地线，提高输电线路绝缘水平，降低杆塔接地电阻，安装线路避雷器以及双回线路采用不平衡绝缘等^[5-7]。其中，安装避雷线相当于给输电线路撑起了保护伞，对防绕击有一定的效果，但却在一定程度上增加了线路的引雷概率。提高线路的绝缘水平和降低杆塔接地电阻均能够提高线路相对雷电流的击穿阈值，从而降低线路的闪络概率。安装线路避雷器可以达到100%防止被保护线路雷击闪络的效果，但其成本过高，推广难度大。双回输电线路采用不平衡绝缘实际上是牺牲低绝缘水平的一回来保护高绝缘水平的一回，由于考核方式的限制，我国实际上是采用加强一回线路绝缘水平的方式来降低闪络率。

目前国内外的运行经验表明，对于直击雷的相关防护，最有效的措施就是降低杆塔的接地电阻，对110~220 kV输电线路，其效果尤为明显^[8-9]。因此，目前有关雷电防护的研究都集中在对冲击电阻接地电阻的分析和接地装置的优化上^[10-11]。然而，当输电杆塔遭受雷击时，雷电流从杆塔顶端传播到底端，然后再通过其接地装置流入大地，在此过程中杆塔会产生过电压，该过电压是杆塔自身电压和接地装置电压的总和。杆塔在设计过程中主要考虑的是其力学性

南方电网重点科技项目：灾难性事件情况下电网运行
风险防控与机制建设（GZHBG-12193）。

能,其结果在电气工程研究人员眼中通常被认为是给定的,因此传统研究往往忽略了雷击杆塔时对杆塔和接地装置上电压分布的研究,而盲目去降低杆塔的接地电阻。研究表明,当雷电流陡度较大,其时频特性对杆塔的过电压起到了决定性作用,此时杆塔顶端暂态过电压主要集中在杆塔上,而与接地电阻关系不大^[12],如果再去降低接地电阻,防雷效果并不理想。

基于上述分析,作为对传统防雷手段的一种补充,提出了一种新型的基于雷电流传输特性与时频特性的防雷波器件的设计方法,该器件能够有效改变雷电流的波形与幅值,在大幅度增加雷电流波前时间的同时,还能在一定程度上减小雷电流的幅值,从而大幅度降低了杆塔顶部的暂态过电压水平,有效降低了输电线路的反击闪络概率,这些优良的性能使得该防雷器件在500 kV以下输电线路防雷中具有较大的应用前景。

雷电流参数与杆塔暂态过电压水平

雷电作为一种自然现象,是雷云复杂活动的结果,雷电流的特性主要包括雷电流幅值概率、雷电流波形分布和雷电流极性等相关参数。

雷电流幅值概率一般采用IEEE推荐公式,即

$$P = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_M}{a} \right)^b} \quad (1)$$

式中, a 、 b 为被统计地区雷电活动相关的参数, IEEE推荐值为 $a=31$, $b=2.6$ 。

我国规程中推荐雷电流幅值公式为

$$\lg P = -\frac{I_M}{88} \quad (2)$$

两者均表明雷电流的幅值概率分布服从大幅值、低概率的分布特点。

同时大量观测结果表明,雷击杆塔的雷电流主要是负极性的,且雷电流随时间近似呈指数规律上升至峰值,然后又近似指数规律下降的特点,其表达式为

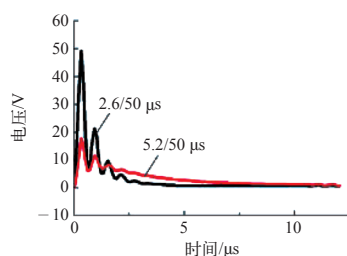
$$i(t) = I_m k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

式中, I_m 为雷电流峰值; α 为波前系数; β 为波尾系

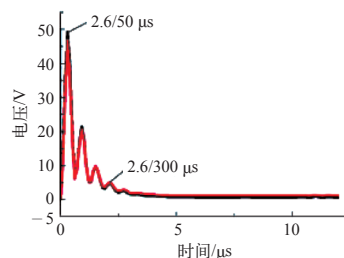
数; k 为波形修正系数。

因其表达式简单直观,雷电流波形双指数函数模型得到广泛应用。定量表征雷电流的主要参数有幅值、波前时间和半波时间,标准的雷电流波形为2.6/50 μs ,然而实际的雷电流波形却千差万别,因此研究雷电流的幅值与波形对杆塔过电压及线路闪络的影响是制定有效的防雷方案的基础。

运行经验表明,幅值小、陡度大的雷电流和幅值大、陡度小的雷电流具有相同的危害,都会引发雷击跳闸事故,例如桂林供电局2004~2005年度发生的5次雷击跳闸事故中,3次由幅值小、陡度大的雷击引起,两次由幅值大、陡度小的雷击所致^[13],而降低接地电阻等传统方法只对幅值大、陡度小的雷电流具有显著的抑制效果,对幅值小、陡度大的雷电流造成的闪络抑制效果并不明显。进一步的研究表明,在雷击情况下,杆塔主要呈电感性,在电流快速上升时,过电压主要集中在杆塔上,且电流上升速度越快,塔顶电位峰值越高^[14]。图1给出了相同雷电流幅值、不同波前时间和半波时间对杆塔过电压水平的影响。由图1可知,当波前时间从5.2 μs 减小至2.6 μs 时,杆塔过电压幅值提高了3倍,而半波时间则几乎对过电压水平没有影响。由于波前时间远小于半波时间,因而波前时间含有的高频分量幅值更大,对暂



(a) 波前单位雷电流作用下杆塔塔顶暂态电压



(b) 波尾单位雷电流作用下杆塔塔顶暂态电压

图1 单位雷电流作用下杆塔塔顶暂态电压

态过电压水平影响也更大,这充分说明了雷电波中的高频分量是造成杆塔暂态过电压的主要原因。

频域分析表明,杆塔的阻抗与频率的关系较大,图2给出了雷电流幅值、杆塔阻抗和杆塔过电压的频率特性曲线示意图,实际的仿真分析表明,杆塔阻抗的最大值出现在1 MHz左右^[15]。虽然雷电流的高频分量幅值很小,但由于杆塔的高频阻抗较大,造成杆塔过电压中的高频分量幅值依然较大;这也从频域的角度进一步说明了高频分量是造成杆塔较高过电压的主要原因。

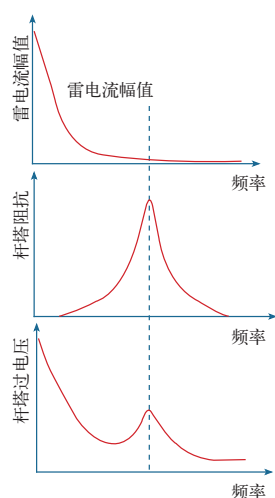


图2 雷电流幅值、杆塔阻抗和杆塔过电压的频率特性曲线示意图

综上所述,由于杆塔阻抗的频变特性,杆塔顶端的暂态过电压峰值主要由雷电流的高频分量决定,雷电流的高频分量与其波前时间密切相关,在雷电流幅值相差不大的情况下,波前时间越短,雷电流高频分量越多,杆塔顶端的过电压峰值越大,线路越容易发生闪络。因此有效去除雷电流中的高频分量,抑制雷电流的波前时间能够直接而有效地防止反击闪络事件的发生。

基于传输特性和时频特性的防雷器件的设计

基于上述对雷电流与杆塔顶端暂态过电压的分析,设计了如图3所示的防雷波阻器件,该器件由3个分节电感串联而成,3个电感的参数如下: L_1 的电感值为15 μH ,寄生电容约为20 pF,磁心最优响应频率为10 MHz,自然谐振频率点约为9 MHz;

L_2 的电感值为20 μH ,寄生电容约为28 pF,磁心最优响应频率为2 MHz,自然谐振频率点约为6 MHz; L_3 的电感值为30 μH ,寄生电容约为40 pF,磁心最优响应频率为100 kHz,自然谐振频率点约为4 MHz。电阻值较小,高频分析时可忽略不计。

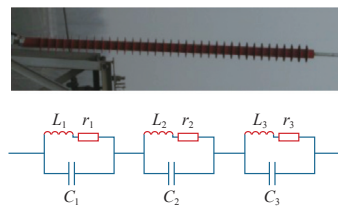


图3 防雷器件外观及原理图

从集中参数和频域的角度来看,波阻器件中电感 L_1 、 L_2 、 L_3 的最优响应频率和谐振频率依次减小,可以将3个电感视为3个截止频率依次减小的低通滤波器,其工作范围分别为0~10 MHz、0~2 MHz和0~100 kHz。雷电流中含有丰富的频率分量^[16-17],其有害频率高达10 MHz,3个电感串联工作能够依次滤除雷电流中的大于10 MHz、2 MHz~10 MHz和100 kHz~2 MHz的频率分量,能够有效地削弱雷电流中有害的高频分量,从而达到有效减缓电流陡度、增加波前时间的目的;同时高频分量通过寄生电容的旁路效应和磁心的涡流效应而损耗,雷电流的总能量也会有所下降,因此雷电波的幅值也有一定程度的减小。

从雷电流的传输特性和分布参数的角度来看,雷电流在通过波阻器件时,雷电流的陡度 di/dt 是一个动态的数值,其值随时间和位置的变化而变化,雷电流中的高频分量随着进入波阻器件深度的增加而被逐渐衰减和消耗,每一匝线圈上的 di/dt 都不尽相同,总体而言, di/dt 在通过防雷器件时是在动态降低的。因此,在防雷器件的设计中,将高频滤波电感放在前端、低频滤波电感放在后端,从而达到对逐渐减小的 di/dt 的最好滤波效果。这样的设计也有利于绝缘的设计,对雷电流的频谱分析可知,雷电流中含有丰富的频率分量,且其幅值随频率的增加而减小,通过逐级滤除高频分量的方法能够有效防止出现感应电压过分集中在防雷前端的情况,保证电压在防雷器件上呈均匀分布,从而有效避免了暂态电压畸变对

绝缘的破坏，这一基于雷电流传输特性的巧妙设计保证了防雷器件绝缘结构的稳定性，为其良好的耐雷水平奠定了基础。后续多次大电流冲击试验中防雷器件并没有任何损失也充分证明了这一设计的合理性。

综上所述，基于雷电流的传输特性和时频特性分析所设计的防雷器件能够有效地滤除雷电流中的高频分量；同时其合理的结构设计也保证了其绝缘的稳定性，这些都为其正常运行提供了有力保证。

防雷器件的冲击电流试验

为了验证上述防雷器件设计的合理性和可靠性，分别在四川电力试验研究院、国网武汉高压研究院和南网电力科学研究院等地开展了相应的冲击电流试验来模拟雷电流的作用过程。

图4为典型的冲击电流试验的试验电路图，该电路为典型的高压发生电路，其基本原理为：通过变压器和高压硅堆组成的电路对电容进行充电，充电结束后，通过触发球隙放电使球隙开关闭合，将经过电感、电阻调制的特定波形的冲击电流加在被试样品上来模拟雷电流的作用过程。

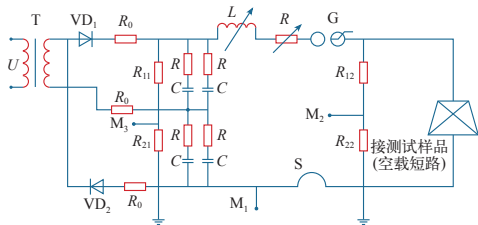


图4 冲击电流试验电路图

表1和表2分别给出了四川电力试验研究院和国网武汉高压研究院的冲击电流试验数据。其中，四川电力试验研究院的冲击电流为单一幅值小电流，波前时间大、波形较为平缓；武汉高压

表1 四川电力试验研究院冲击电流试验结果

被试品	充电电压 /kV	输出冲击电流幅值 /A	被试器电压幅值 /V	波形参数 /μs
空载	15.2	7 713	0	8.1/19.0
样品1	15.2	5 602	5 418	11.6/24.0
样品2	15.2	5 805	6 090	11.0/24.0

表2 武汉高压研究院冲击电流试验结果

回路状态	充电电压 /kV	输出冲击 电流幅值/kA	实测冲击 电流波形/μs	试样两端 电压/kV
回路不接入试样	60	94.5	4.25/10.6	—
	38	55.2	4.25/10.6	—
	22	30.4	4.25/10.6	—
回路接入试样	60	66.9	7.75/17.6	32.03
	38	41.8	7.75/17.6	20.27
	22	22.7	7.75/17.6	11.76

研究院的冲击电流幅值大、波前时间小、波形陡度大；且具有多组不同冲击电流的试验数据，更加全面有说服力。

首先，对比防雷对冲击电流波形的改变效果，当冲击电流波前时间为8.1 μs时，经过防雷器件的作用，波前时间变为11.6 μs，增大了43.2%；当冲击电流波前时间为4.25 μs时，经过防雷器件的作用，波前时间延长为7.75 μs，增大了82.4%。这说明，冲击电流的陡度越高，所含有的高频分量越大时，防雷器件的滤波效果越显著。其次，对比防雷对冲击电流幅值的影响结果，当波前时间为8.1 μs时，经过防雷器件的作用，冲击电流的幅值由7.713 kA减小为5.602 kA，减小了27.4%；当波前时间为4.25 μs时，经过防雷器件的作用，冲击电流的幅值由94.5 kA减小到66.9 kA，减小了29.2%。这说明，当冲击电流的陡度越高，防雷器件虽然对高频分量的滤波效果越好，但由于高频分量在雷电流中幅值较小，因而防雷器件对雷电流幅值影响并不像对波前时间的作用那么明显。通过上面的分析可知，防雷器件充分利用了雷电波的时频特性，有效地减小了雷电波的陡度，且对于越陡的雷电波其效果越明显；同时防雷器件也能有效地削弱雷电波的幅值，但这一削弱能力并不随雷电波陡度的增加而显著增加，这样能够有效防止雷电流功率在防雷器件上消耗过大而引起防雷器件的热破坏。

分析表明，在幅值相差不大的情况下，陡度是决定杆塔暂态过电压水平的主要因素，防雷器件只要能成功地抑制雷电波陡度，就能有效抑制杆塔的暂态过电压水平。

同时，当雷电流较大时，防雷器件本身需要

承受较大的幅值。在武汉高压研究院的试验中，当冲击电流为94.5 kA时，防雷器件上的过电压为32.03 kA，冲击试验结束后发现，冲击电流并未对试样造成任何损伤，这充分说明防雷器件本身具有良好的绝缘设计和耐雷水平。

另外，在武汉高压研究院进行的冲击试验中，试验数据表明冲击电流的波形与充电电压无关，这是因为电路的特性由其拓扑结构和原件参数决定，与电压幅值的绝对值的大小无关。

综上所述，防雷器件通过大幅度减小雷电波陡度和一定程度减小雷电流幅值的方法成功抑制了杆塔的过电压水平；同时防雷器件优化的绝缘设计保证了其良好的耐雷水平，两者共同保证了防雷器件的正常工作。

结束语

1) 杆塔塔顶暂态过电压水平与雷电流的波形参数有较大关系，主要取决于雷电流的波前时间和幅值，波前时间越小、幅值越大，过电压水平越高，线路越容易发生闪络。

2) 所设计的防雷器件能够有效改变雷电流的波形与幅值，在大幅度增加了雷电流波前时间的同时，还能减小雷电流的幅值；且雷电流波前时间越短、波形陡度越高，防雷器件对其陡度的抑制效果越显著，杆塔顶端的暂态过电压越低，防雷效果越好。

3) 防雷器件巧妙的结构设计保证了器件本身在雷电流通过时内部过电压的均匀分布，有效保护了设备本身，保证了防雷器件的正常使用。

参考文献

- [1] 何金良，曾嵘，陈水明. 输电线路雷电防护技术研究(三)：防护措施[J]. 高电压技术，2009(12)：2917-2923.
- [2] 曾嵘，何金良，张波，等. 电力系统接地技术研究新进展[J]. 陕西电力，2007(2)：1-5.
- [3] 维列夏金，吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验分析[J]. 高电压技术，1998，24(2)：76-79.
- [4] Eriksson A J. The incidence of lightning strikes to power lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(3)：859-870.
- [5] 刘海. 35 kV输电线路雷电防护[J]. 信息与电脑：理论版，2011，37(8)：173-174.
- [6] 杨庆，司马文霞，冯杰，等. 云广特高压直流输电线路雷电屏蔽性能研究[J]. 高电压技术，2008，34(3)：442-446.
- [7] 贺恒鑫，何俊佳，钱冠军，等. 特高压交流输电线路的雷电屏蔽分析模型[J]. 高电压技术，2010，36(1)：196-204.
- [8] 张波，余绍峰，孔维政，等. 接地装置雷电冲击特性的大电流试验分析[J]. 高电压技术，2011，37(3)：548-554.
- [9] 韩学民，夏长征，喻剑辉，等. 杆塔接地体冲击电位分布特性的模拟试验[J]. 高电压技术，2011，37(10)：2464-2470.
- [10] 邓长征，杨迎建，童雪芳，等. 接地装置冲击特性研究分析[J]. 高电压技术，2012，38(9)：2447-2454.
- [11] 陈林，李劲林，杨庆，等. 基于土地电离特性的无边界接地系统有限元模型分析(英文)[J]. 高电压技术，2012，38(8)：2104-2111.
- [12] 张波，薛惠中，金祖山，等. 遭受雷击时输电杆塔及其接地装置的暂态电位分布[J]. 高电压技术，2013，39(2)：393-398.
- [13] 王巨丰，齐冲，车谄颖，等. 雷电流最大陡度及幅值的频率分布[J]. 中国电机工程学报，2007，27(3)：106-110.
- [14] 王东举，周浩，陈稼苗，等. 特高杆塔的多波阻抗模型设计及雷击暂态特性分析[J]. 电网技术，2007，31(23)：11-16.
- [15] 苏红. 雷击杆塔冲击阻抗及过电压的计算方法研究[D]. 天津：天津大学，2011.
- [16] 刘有菊，方兴，李斯娜. 雷电流的能谱分析[J]. 保山学院学报，2011(2)：66-69.
- [17] 王祎菲，仇一凡，冯世涛，等. 雷电流特性及其波形分析[J]. 黑龙江电力，2010(6)：404-407.

(收稿日期：2015-01-20) **EA**