第 49 卷 第 6 期：2607-2614 高电压技术 Vol.49, No.6: 2607-2614
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220950

基于网格法的工作电压下雷电侵入过电压研究

罗喻扬，李　化，江宇栋，刘瑞琪，林福昌
（华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室，武汉 430074）

摘　要：为研究工作电压对雷电侵入波过电压的影响规律，基于行波理论网格法分析了设备与避雷器间电气距离不同时工作电压对雷电侵入波传播过程的影响，并结合实例分析了考虑工作电压前后设备过电压差异，进一步研究了设备过电压取最大值时对应工作电压的取值规律。结果表明设备过电压取最大值时对应的工作电压在电气距离不同时并不恒定，而是随电气距离的增大逐渐从与雷电同极性峰值处向反极性峰值处移动。另外存在临界电气距离，工作电压主要影响电气距离大于该临界距离时的设备过电压。对于 66 kV 及以上线路，工作电压对设备过电压的影响均可达 10%以上，需要考虑工作电压的影响。
关键词：工作电压；雷电侵入过电压；电气距离；波过程；网格法；避雷器残压；陡度

Research on Lightning Intruding Overvoltage Under Operating Voltage Based on Grid Method

LUO Yuyang, LI Hua, JIANG Yudong, LIU Ruiqi, LIN Fuchang
(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the influence of operating voltage on lightning intruding overvoltage, based on the traveling wave theory, the influence of operating voltage on propagation process of lightning intruding wave is analyzed when the electrical distance between equipment and lightning arrester is different. Combined with a project case, the difference of equipment overvoltage before and after the operating voltage is taken into account is analyzed, and the value rule of the operating voltage when the overvoltage is the maximum is further studied. The results show that when the equipment overvoltage reaches its maximum value, the corresponding operating voltage is not constant when the electrical distance is different, and gradually moves from the same polarity peak to the opposite polarity peak with the increase of the electrical distance. In addition, there is a critical electrical distance, and the operating voltage mainly affects the equipment overvoltage when the electrical distance is greater than the critical distance. For 66 kV and above lines, the influence of operating voltage on equipment overvoltage exceeds 10%, thus the influence of operating voltage should be considered.
Key words: operating voltage; lightning intruding overvoltage; electrical distance; wave process; grid method; residual voltage of arrester; steepness

0　引言

雷电侵入波严重威胁了变电站设备的运行安全，常采用避雷器对电气主设备进行保护[1-3]。被保护设备遭受的雷电侵入波过电压受避雷器伏安特性、电气距离、侵入波陡度、工作电压等影响，严苛情况下超过自身雷电冲击耐受水平[4]。值得指出的是，在 220 kV 及以上的系统中，电压等级越高，工作电压对变电站设备的危害性越大，如 220 kV 线路的工作电压峰值占变压器雷电冲击耐压的 20%以上，750 kV 线路占比则高于 30%[5]。

考虑工作电压的影响时，输电线路的过电压通常视为工作电压与雷电过电压的线性叠加，如在雷电绕击时将工作电压与雷电过电压叠加得到绝缘子串两端的冲击电压[6-8]。而变电站内的侵入波传播过程较为复杂，一方面氧化锌避雷器伏安特性的非线性导致工作电压与雷电侵入波不满足线性叠加规律[9-10]；另一方面避雷器和被保护设备之间的电气距离使得避雷器产生的负反射波不能完全抵消终端设备如变压器等的全反射效果[4]。

在工作电压对变电站绝缘配合影响方面，文献[11]对典型 1000 kV 特高压变电站的研究表明，工作电压与雷电极性相反时主变侵入波过电压较不考虑工作电压时增加 20%，较考虑同极性工作电压时

增加 50%；在工作电压对雷电侵入波传播过程的影响方面，文献[12]指出工作电压改变了雷电侵入波传播时的“电压起始点”，从而对波过程以及设备过电压产生影响。

本文基于行波理论网格法研究了工作电压影响下雷电侵入波在变电站内部的传播和发展过程，结合实例重点讨论了不同电气距离下设备过电压峰值随工作电压的变化规律，进一步对比分析了考虑工作电压前后设备过电压最大值的差异。研究为变电站侵入波防护和设备绝缘配合等提供参考。

1 计及工作电压的雷电侵入波过电压分析

1.1 折反射过程分析

以交流系统 a 相进波为例，工作电压瞬时值为

$$u_0 = U_{\mathrm{m}} \cos\left(\omega t + \varphi_0\right) \tag{1}$$

式中：U_{m} 为线路相电压幅值；ω 为电源频率；φ_0 为初始相角。由于工频电压波长远大于输电线路长度，因此在分析雷电侵入波时将工作电压恒定为 U_0。

图 1 为分析变电站雷电侵入波的典型接线，图中 B 点装设氧化锌避雷器，C 点装设被保护设备，由于设备如变压器、断路器等等值入口电容不大，将其视为开路。图中，u_{r}，i_{r} 分别为避雷器对地电压和流过避雷器的电流；u_{c} 为设备对地电压。雷电侵入波 u 从 A 点侵入，沿线路传播到 B 点后发生折反射，定义从 B 到 C 点传播的折射波为 u_{q}、反射波为 u_{f}。u_{q} 到达 C 点后，发生全反射，其反射波为 u_{fl}。当 u_{fl} 到达 B 点后将再次发生折反射，并在 B、C 两点间重复以上折反射过程。

设雷电波的传播速度为 v，B、C 之间的电气距离为 l，从 B 点传播到 C 点需要的时间为 $\tau=l/v$。以雷电波到达 B 点的时刻为 0 点，当 $0\le t<2\tau$ 时，由 B 点电压连续性有

$$u + u_{\mathrm{f}} = u_{\mathrm{r}} - U_0 = u_{\mathrm{q}} \tag{2}$$

由 B 点电流连续性有

$$\frac{u}{Z_{\mathrm{c}}} - \frac{u_{\mathrm{f}}}{Z_{\mathrm{c}}} = i_{\mathrm{r}} + \frac{u_{\mathrm{q}}}{Z_{\mathrm{c}}} \tag{3}$$

式中 Z_{c} 为线路波阻抗。

避雷器伏安特性曲线满足

$$i_{\mathrm{r}} = f\left(u_{\mathrm{r}}\right) \tag{4}$$

根据式(2)—式(4)，避雷器两端的电压 u_{r} 为

$$2u = 2u_{\mathrm{r}} + Z_{\mathrm{c}} f\left(u_{\mathrm{r}}\right) - 2U_0 \tag{5}$$

设备对地电压 u_{c} 为

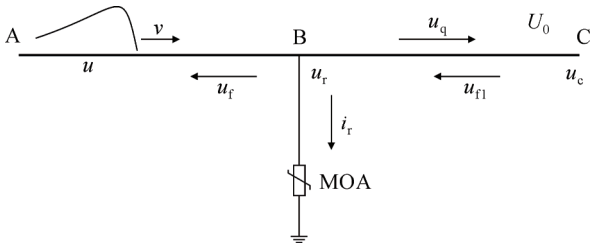


图 1 变电站典型接线

Fig.1 Typical circuit diagram of surge propagation in substation

$$u_{\mathrm{c}} = u_{\mathrm{q}} + u_{\mathrm{fl}} = 2u_{\mathrm{r}} - U_0 \tag{6}$$

2τ 后反射波 u_{fl} 到达 B 点，将继续在 B 点和 C 点间发生折反射。由 B 点电压、电流的连续性可知，当 $2(n\text{-}1)\tau\le t<2n\tau$（$n$ 为正整数）时，u_{r}、u_{c} 分别为：

$$\begin{aligned} &2u+\sum_{k=0}^{n-2}(-1)^k \cdot 2u_{\mathrm{r}}(t-2k\tau-2\tau) = \\ &2u_{\mathrm{r}} + Z_{\mathrm{c}} f(u_{\mathrm{r}}) - (1+(-1)^{n-1})U_0 \end{aligned} \tag{7}$$

$$u_{\mathrm{c}} = \sum_{k=0}^{n-1}(-1)^k \cdot 2u_{\mathrm{r}}(t-2k\tau) + (-1)^n U_0 \tag{8}$$

式(7)—式(8)给出了变电站内设备过电压理论计算方法，当 n=1 时，退化为式(5)—式(6)。

1.2 工作电压的影响规律

在雷电侵入波为斜角波($u=at$)时，避雷器取理想伏安特性，以避雷器残压 U_{ref} 为动作电压阈值，存在避雷器未动作(开路)和避雷器动作(维持残压)两种情况，即 $u_{\mathrm{r}}<U_{\mathrm{ref}}$ 时，避雷器开路；u_{r} 一旦达到 U_{ref} 后，$u_{\mathrm{r}}=U_{\mathrm{ref}}$。

1）$u_{\mathrm{r}}<U_{\mathrm{ref}}$，避雷器开路，流过避雷器的电流 $i_{\mathrm{r}}=0$。在 $0\le t<2\tau$ 时，式(7)可简化为

$$u_{\mathrm{r}} = at + U_0 \tag{9}$$

在 $t\ge 2\tau$ 时，式(7)可简化为

$$u_{\mathrm{r}} = 2at - 2a\tau + U_0 \tag{10}$$

由上式可知，B 点电压在 $0\le t<2\tau$ 时以陡度 a 上升，在 $t\ge 2\tau$ 时以陡度 $2a$ 上升。

2）$u_{\mathrm{r}}\ge U_{\mathrm{ref}}$，避雷器动作，$u_{\mathrm{r}}=U_{\mathrm{ref}}$。

当 $t_{\mathrm{f}}<2\tau$ 时，u_{c} 的表达式如表 1 所示。由表可知，u_{c} 为随时间变化的周期函数，周期为 4τ。

根据表 1 公式，图 2 给出了 B、C 两点电压 u_{r}、u_{c} 在半周期内的波形。由图可知，u_{c} 在 $t_{\mathrm{f}}\le t<2\tau$ 内取最大值 U_{C}

$$U_{\mathrm{C}} = 2U_{\mathrm{ref}} - U_0 \tag{11}$$

另外，图 2 分别给出了工作电压 U_0 分别为 U_{m}、0、$-U_{\mathrm{m}}$ 时的 B、C 两点电压波形，对应的 C 点电压

表 1　$t_r<2\tau$ 时不同时间段内 u_c 表达式

Table 1　The expression of u_c at different time periods when $t_r<2\tau$

t	u_c	u_r
$0\le t<t_r$	$2at+U_0$	$at+U_0$
$t_r\le t<2\tau$	$2U_{ref}-U_0$	
$2\tau\le t<2\tau+t_r$	$2U_{ref}-U_0-2a(t-2\tau)$	$2a(t-\tau)+U_0$
$2\tau+t_r\le t<4\tau$	U_0	
$4\tau\le t<4\tau+t_r$	$2a(t-4\tau)+U_0$	

表 2　$t_r\ge2\tau$ 时不同时间段内 u_c 表达式

Table 2　The expression of u_c at different time periods when $t_r\ge2\tau$

t	u_c	u_r
$0\le t<t_r$	$2at+U_0$	$at+U_0$
$t_r\le t<2\tau$	$U_{ref}-2a(t-t_r)+2a\tau$	
$2\tau\le t<2\tau+t_r$	$U_{ref}-2a(t-t_r)+2a\tau$	$2a(t-\tau)+U_0$
$2\tau+t_r\le t<4\tau+t_r$	$U_{ref}+2a(t-t_r-2\tau)-2a\tau$	

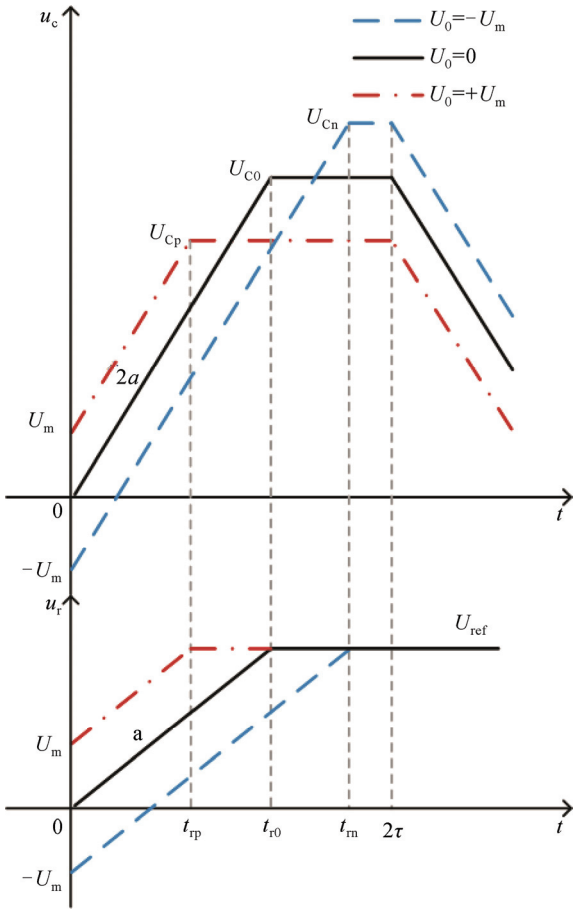


图 2　$t_r<2\tau$ 时 B、C 两点电压波形

Fig.2　Voltage at point B and C when $t_r<2\tau$

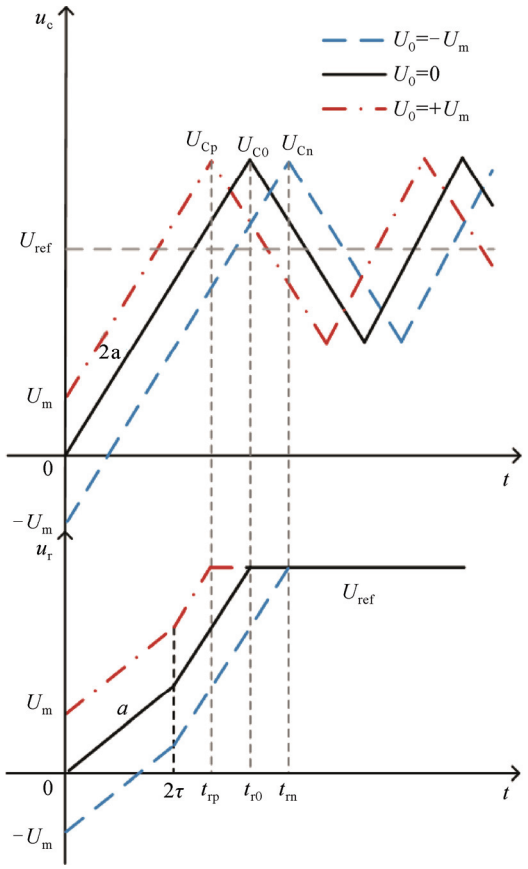


图 3　$t_r\ge2\tau$ 时 B、C 两点电压波形

Fig.3　Voltage at point B and C when $t_r\ge2\tau$

峰值分别为 U_{Cp}、U_{C0}、U_{Cn}，B 点到达残压的时间分别为 t_{rp}、t_{r0}、t_{rn}。

由图 2 可知，一方面工作电压 U_0 的存在使得 B 点电压到达残压的时间发生改变，如工作电压为 $+U_m$ 时，B 点电压到达残压的时间从 t_{r0} 变为 t_{rp}；另一方面，工作电压改变了 C 点的初始电位。两方面同时作用使得 $t_r<2\tau$ 情况下 $U_{Cn}>U_{C0}>U_{Cp}$。

当 $t_r\ge2\tau$ 时，u_c 的表达式如表 2 所示。由表可知，u_c 在 $t>t_r$ 后以 4τ 为周期变化。

根据表 2 公式，图 3 给出了 B、C 两点电压在一个周期内的波形。由图可知，u_c 在 t_r 时刻取得最大值 U_C：

$$t_r=\frac{U_{ref}-U_0}{2a}+\tau \tag{12}$$

$$U_C=U_{ref}+2a\tau \tag{13}$$

由图 3 可知，虽然工作电压 U_0 改变了避雷器到达残压的时间 t_r 与 C 点电压初始电位，但二者对 U_C 的影响相互抵消，使得 $t_r>2\tau$ 的情况下 $U_{Cn}=U_{C0}=U_{Cp}$。

结合雷电侵入波在 B、C 两点间的传播过程(a)、(b)，$t_r=2\tau$ 为临界工况，对应 B、C 两点间的临界电气距离 l_c 为

$$l_c = \frac{U_{ref} - U_0}{2a} v \tag{14}$$

即当 $l \geq l_c$ 时波过程属于类别(a)；当 $l < l_c$ 时波过程属于类别(b)。由式(11)、式(13)可知不同工作电压下设备过电压峰值 U_C 随 l 的变化规律如图 4 所示，图中 l_{cp}、l_{c0}、l_{cn} 分别为 $U_0=U_m$、0、$-U_m$ 时对应的临界电气距离。

由图 4 可知，当 $l < l_c$ 时设备过电压峰值 U_C 随 l 的增大而增大；当 $l \geq l_c$ 时 U_C 随 l 的增大维持恒定。另外，当 $l < l_{cp}$ 时，工作电压 U_0 对 U_C 没有影响；当 $l \geq l_{cp}$ 时，$U_0=-U_m$ 对应的 U_C 更大。整体上，工作电压与雷电极性相反时设备过电压更为严苛。

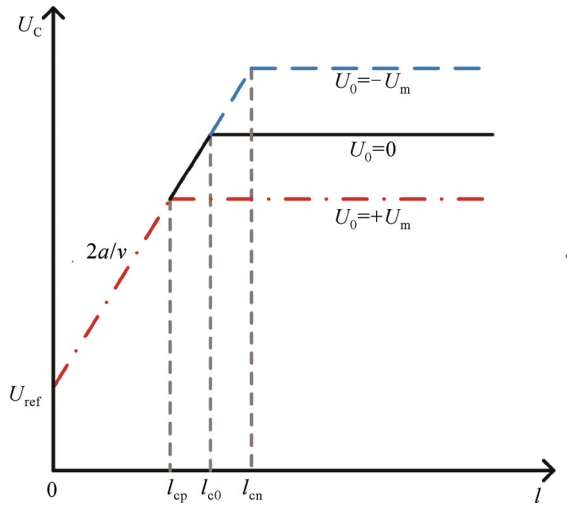


图 4 不同工作电压下设备过电压随电气距离变化曲线

Fig.4 Curve of equipment overvoltage changing with electrical distance at different operating voltages

2 实例分析

2.1 结果对比

以典型 220 kV 系统为例，取雷电波为标准双指数波，波形参数为 2.6/50 μs[5]。根据 220 kV 线路绝缘子 $U_{50\%}$典型值，取雷电波幅值 U_s=1200 kV[13]。雷电波形如图 5 所示。

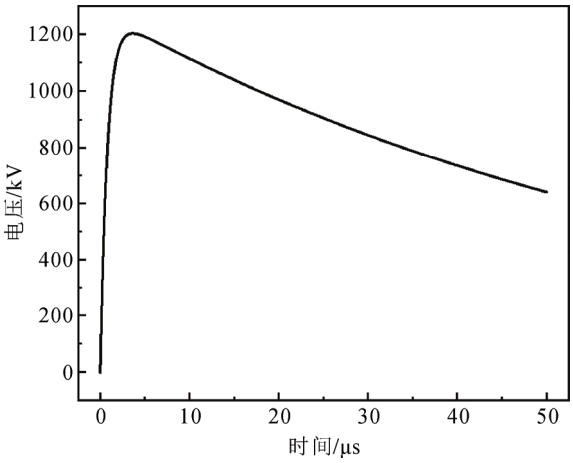


图 5 雷电波形图

Fig.5 Lightning waveform

设线路波阻抗 Z_c=400 Ω，波速 v=300 m/μs。MOA 型号为 YH10W−200/496W，使用分段线性化的方式对避雷器伏安特性曲线进行拟合，对应的伏安特性曲线如图 6 所示[14-15]。

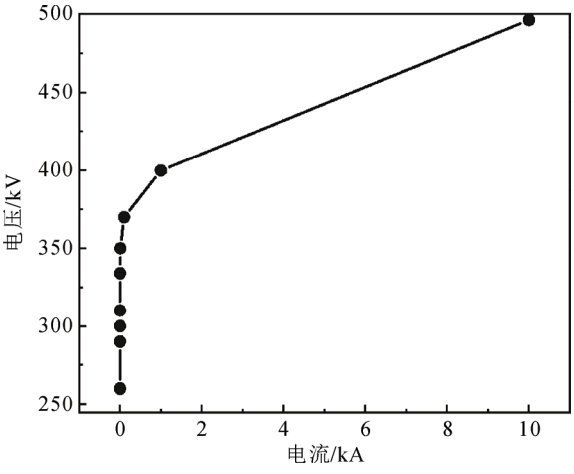


图 6 避雷器伏安特性曲线

Fig.6 Volt-ampere characteristic curve of arrester

使用式(7)、式(8)计算 $U_0=U_m$、0、$-U_m$ 时 U_C 随 l 的变化曲线，并与 EMTP 计算结果进行对比。计算结果如图 7 所示。

由图 7 可知，工作电压 U_0、电气距离 l 不同时，设备过电压峰值 U_C 的理论计算与 EMTP 计算结果误差在 5%以内。图中 l、U_0 对 U_C 的影响规律与图 4 基本一致，但在不同工作电压下 U_C 随 l 的上升速率不同，该现象在 U_s 较小时尤为明显。极限情况下 U_s 小于避雷器残压时，U_C 不随 l 变化。由于工程上该情况下的 U_C 很小，不对设备造成威胁，本文不作讨论。

图 8、图 9 分别给出了雷电波幅值 U_s=900 kV、600 kV 时，$U_0=\pm U_m$、$\pm 0.5U_m$、0 下的 U_C 随 l 的变化曲线。图 8 中在 l=60 m，$U_0=-U_m$ 时 U_C 与不考虑工作电压时的偏差为 7.6%；图 9 中偏差为 10.3%。

下文以该 220 kV 系统为研究对象，重点分析不同工作电压下设备过电压峰值 U_C 随 l 变化的上升速率不同的原因，进一步研究考虑工作电压前后 U_C 的差异，以及 U_C 取最大值时对应 U_0 的取值规律。

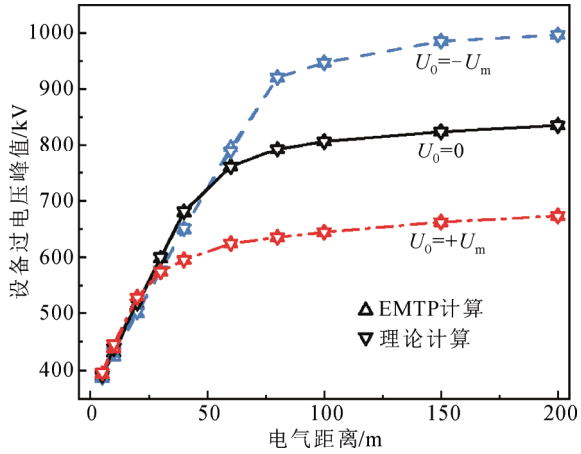


图 7　不同计算方法结果对比

Fig.7　Comparison of results of different calculation methods

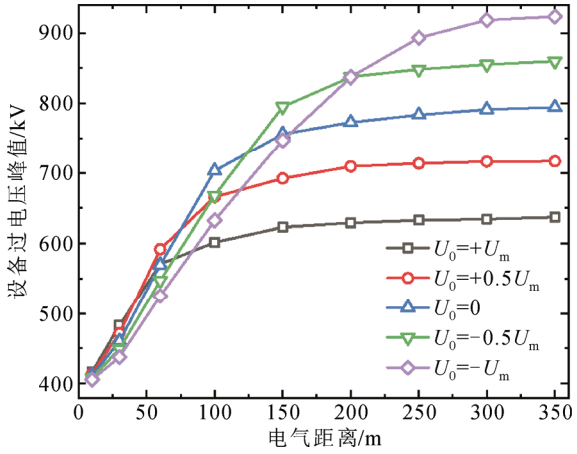


图 9　U_s=600 kV 时 U_C 随 l 变化曲线

Fig.9　Change curve of U_C with l when U_s=600 kV

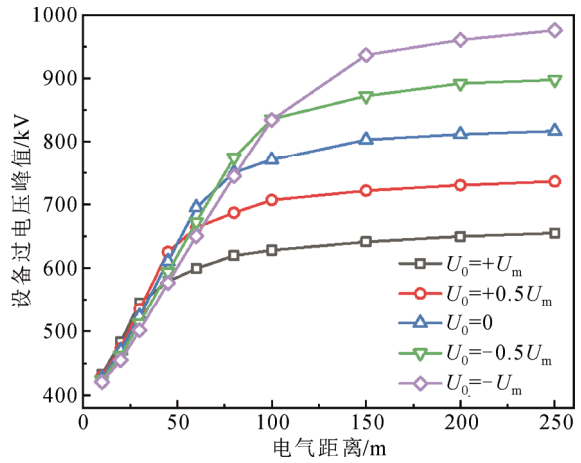


图 8　U_s=900 kV 时 U_C 随 l 变化曲线

Fig.8　Change curve of U_C with l when U_s=900 kV

2.2　结果分析

U_C 随 l 的变化规律与临界电气距离 l_c 有关：

1）当 $l\geq l_c$ 时，U_C 在 $t\leq 2\tau$ 时间段内取得，u_c、u_r 满足式(5)、式(6)。式中 u_c 与 u_r 同时达到峰值，与雷电波瞬时值 $u(t)$呈正相关，因此 u_c 的峰值时刻与 $u(t)$极大值对应时刻相同。

设雷电波 $u(t)$的峰值时间为 t_h，若 $2\tau<t_h$，2τ 时刻雷电波仍位于波头区段，$u(t)$极大值在 $t=2\tau$ 时取得；

若 $2\tau\geq t_h$，$t=2\tau$ 时 $u(t)$已越过峰值开始下降，$u(t)$极大值在 $t=t_h$ 处取得，与 τ 无关。

因此设备过电压峰值 U_C 为

$$U_C=2u_r(\min(t_h,2\tau))-U_0 \tag{15}$$

由于避雷器伏安特性非线性良好，$u_r(2\tau)$的变化很小，因此 U_C 随 l 的变化不大。如图 8 中 l 从 150 m 增大到 250 m 时，U_C 仅有 5%以内的变化。另外由于 U_C 与 U_0 呈负相关，$U_0=-U_m$ 时 U_C 更大。

2）当 $l<l_c$ 时，U_C 在 $t>2\tau$ 时间段内取得。分析时仍假定避雷器具有理想伏安特性，残压为 U_{ref}。根据式(7)、式(8)可得：

$$u(t)+u(t-2\tau)=U_{ref}-U_0 \tag{16}$$

$$U_C=2u(2t)+U_0 \tag{17}$$

对于雷电双指数波有

$$u(t)=\frac{U_s}{k}\left(e^{-t/\tau_1}-e^{-t/\tau_2}\right) \tag{18}$$

式中：τ_1 为波尾时间常数；τ_2 为波头时间常数；k 为电压峰值的修正因子[16]。

由于雷电波头时间远小于波尾时间，τ_1 远大于 τ_2，分析时认为 $t/\tau_1=0$。于是设备过电压峰值 U_C 为

$$U_C=\frac{e^{2\tau/\tau_2}-1}{e^{2\tau/\tau_2}+1}\left(\frac{2U_s}{k}+U_0\right)+\frac{2U_{ref}}{e^{2\tau/\tau_2}+1} \tag{19}$$

由式(19)可知，U_C 随 U_0 增大而增大，U_0 越大，l 增大时 U_C 的上升速率越大。

结合 $l\geq l_c$、$l<l_c$ 两种工况，当 $t=2\tau$ 使得式(16)成立时为临界工况，其中 l_c 满足

$$u\left(2l_c/v\right)=U_{ref}-U_0 \tag{20}$$

由式(20)可知，l_c 与 U_0 呈负相关。由于 $-U_m\leq U_0\leq+U_m$，l_c 的变化范围为 $l_{cp}\leq l_c\leq l_{cn}$。

由式(19)可知，在 $l<l_c$ 时，U_0 与 U_s 越接近，工作电压对设备过电压的影响越大。因此相对于 U_s=900 kV、1200 kV，U_s=600 kV 时不同工作电压下 U_C 随 l 变化的上升速率差别越大；由式(15)可知，在 $l\geq l_c$ 时，工作电压对设备过电压的影响与 U_0 对 U_{ref}的占比有关，而与 U_s 无关。U_0 占比越大，工作

电压影响越大。

定义式(21)、式(22)所示的工作电压 U_0 占 $2U_s/k$ 的最大占比 η 与工作电压 U_0 占 $2U_{ref}$ 的最大占比 λ，以线路绝缘水平作为雷电侵入波幅值，不同电压等级线路的占比 η、λ 如表 3 所示[5,13,17]。

$$\eta = \frac{kU_s}{2U_{50\%}} \tag{21}$$

$$\lambda = \frac{U_s}{2U_{ref}} \tag{22}$$

由表 3 可知，35 kV 及以上线路中占比 η 均小于 10%。结合式(19)，在 $l<l_{cp}$ 时考虑工作电压后 U_C 增加占比小于 η，因此当雷电冲击电压幅值接近线路绝缘水平时，工作电压的影响也小于 10%；35 kV 线路占比 λ 在 5%左右，66 kV 及以上线路中 λ 均在 10%以上。结合式(15)，在 $l\geq l_{cp}$ 时考虑工作电压后 U_C 增加占比在 λ 附近，66 kV 及以上线路需要考虑工作电压的影响。

由于式(19)中波头时间常数 τ_2 仅存在于 τ/τ_2 项，其作用在于对 U_C 随 l 的变化曲线进行横向伸缩变换，并不会改变工作电压对设备过电压的影响规律，无需考虑雷电波头时间的影响。

2.3 U_C 最大值分析

当 $l_{cp}\leq l\leq l_{cn}$ 时，结合式(19)，虽然 U_0 增大使得 $l<l_c$ 时的 U_C 增大，但也使 l_c 减小。而当 U_0 增大使得 $l>l_c$ 时，由式(15)可知，U_C 随 U_0 的增大而减小。因此当 U_0 使得 $l=l_c$ 时，U_C 取最大值。当 l 增大时，U_C 取最大值对应的 l_c 增大，U_0 减小。

当 $l<l_{cp}$ 时，对于任意 U_0 始终满足 $l<l_c$，U_C 与 U_0 呈正相关。受工作电压幅值的限制，$U_0=+U_m$ 对应的 U_C 最大。

当 $l>l_{cn}$ 时，始终满足 $l>l_c$，U_C 与 U_0 呈负相关。因此 $U_0=-U_m$ 对应的 U_C 最大。

图 10 给出了 U_s=600 kV 时，分别使用 EMTP 与上述分析得到的 U_C 取最大值时对应的工作电压 U_0 随电气距离的变化曲线。按照本文分析计算时，将避雷器残压 U_{ref} 视为恒定，根据图 9 所示 U_0=0，$l\geq l_c$ 的区段取避雷器残压 U_{ref}=395 kV。

由图 10 可知，两种方法计算结果差距在 5%以内，设备过电压峰值 U_C 取最大值时对应的 U_0 随 l 的变化规律与上述分析一致，即随着 l 的增大，U_C 取最大值时对应的工作电压逐渐从与雷电同极性峰值处向反极性峰值处移动。

图 11 分别给出了 U_s=1200 kV、900 kV、600 kV 时考虑工作电压前后的 U_C 最大值随电气距离 l 的变化曲线。

表 3 不同电压等级线路工作电压占比

Table 3 Ratio of operating voltage of different voltage levels

电压等级/kV	相电压幅值 U_m/kV	避雷器残压 U_{ref}/kV	绝缘子耐压 $U_{50\%}$/kV	占比 η	占比 λ
35	28.6	130	400	3.5%	5.5%
66	53.9	220	600	4.4%	12.3%
110	89.8	260	800	5.5%	17.3%
220	179.6	520	1200	7.5%	17.3%
500	408.2	970	2600	7.8%	21.0%
1000	816.5	1620	4000	9.4%	25.2%

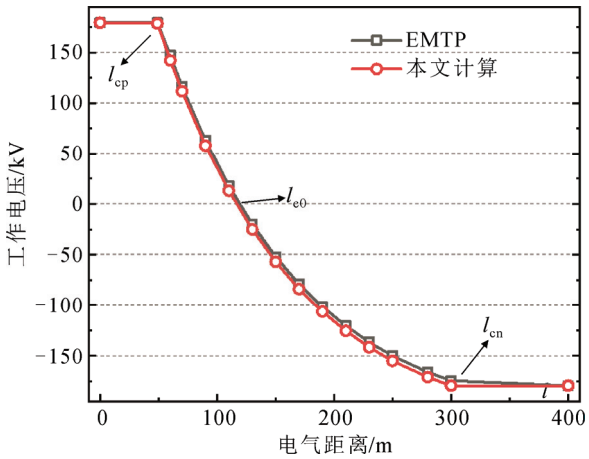


图 10 U_C 取最大值时工作电压 U_0 随 l 变化曲线

Fig.10 Curve of operating voltage U_0 changing with l when U_C takes the maximum value

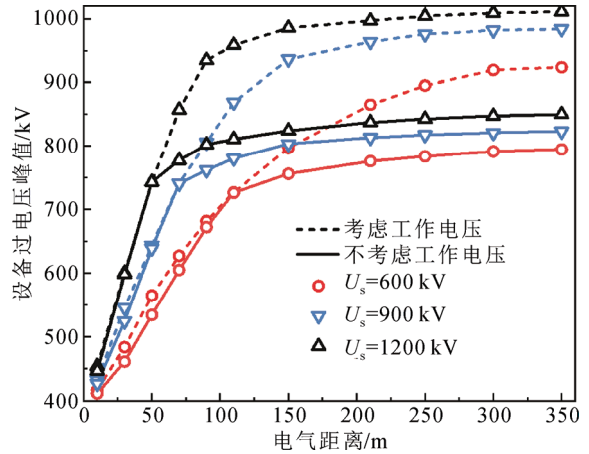


图 11 不同 U_s 下工作电压对 U_C 最大值的影响

Fig.11 Influence of operating voltage on maximum U_C under different U_s

由图 11 可知，当 $l<l_{c0}$，U_s 分别为 1200 kV、900 kV、600 kV 时，考虑工作电压前后 U_C 最大值偏差

分别在 1%、4%、6%以内。结合式(19)，雷电波幅值 U_s 越小，占比 η 越大，工作电压对 U_C 的影响越显著。

当 $l \geq l_{c0}$ 时，考虑与雷电极性相反的工作电压时 U_C 更大。结合式(15)，由于占比 λ 可达 22.7%，考虑反极性工作电压后 U_C 最大值增加占比也在 20%附近，其影响不能忽略。

3　结论

本文基于行波理论研究了工作电压下雷电侵入波过电压随电气距离的变化规律，进一步对比分析了考虑工作电压前后设备过电压最大值的差异。在对雷电侵入波幅值大于避雷器残压值的雷电侵入波过电压分析中，存在以下结论：

1）存在一个临界电气距离 l_c，在 $l<l_c$ 时，避雷器在反射波到达后到达残压，此时，设备过电压幅值 U_C 与侵入波陡度、避雷器残压、工作电压有关，U_C 随 l 增大而增大；在 $l \geq l_c$ 时，避雷器在反射波到达前已达残压，U_C 仅由工作电压与避雷器残压决定，U_C 随 l 的增加趋于恒定。

2）不同电气距离下设备过电压 U_C 取最大值时对应的工作电压不恒定。随着电气距离的增加，工作电压逐渐从与雷电同极性峰值处移动到反极性峰值处。

3）以工作电压相对线路绝缘水平的占比 η 以及工作电压相对避雷器残压的占比 λ 为依据考虑工作电压的影响。对于 35 kV 及以上线路，η 均小于 10%，而 λ 可达 25%，因此工作电压主要影响 $l \geq l_{cp}$ 时的设备过电压。35 kV 线路中工作电压影响在 5%左右，而 66 kV 及以上线路工作电压影响均可达 10%以上，需要考虑工作电压的影响。

参考文献　References

[1] 周利军，魏仁伟，刘　聪，等. 多重雷击下氧化锌避雷器的冲击老化特性[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3507-3516.
ZHOU Lijun, WEI Renwei, LIU Cong, et al. lmpact aging characteristics of zinc oxide arrester under multiple lightning strikes[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3507-3516.

[2] 田金虎，刘渝根，赵俊光. GIS 升压站雷电侵入波过电压计算及其影响因素分析[J]. 高压电器，2021，57(12)：74-82.
TIAN Jinhu, LIU Yugen, ZHAO Junguang. Calculation and influence factors analysis of lightning intruding overvoltage in GIS step-up station[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 74-82.

[3] 周沛洪，何慧雯，李振强，等. 1000kV 同塔双回线路高抗中性点小电抗侧中性点避雷器参数的选择[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1606-1616.
ZHOU Peihong, HE Huiwen, LI Zhenqiang, et al. Parameters selection for the neutral arrester beside neutral grounding reactorat the neutral point of shunt reactors on 1000kV double-circuit line[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1606-1616.

[4] 解广润. 电力系统过电压[M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2018：194-199.
XIE Guangrun. Overvoltage of power system[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2018: 194-199.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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]. 北京：中国标准出版社，2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations: GB/T 50064—2014[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2014.

[6] 周远翔，鲁　斌，尹庆福，等. 工频电压对输电线路雷击跳闸率的影响[J]. 高电压技术，2007，33(9)：61-65.
ZHOU Yuanxiang, LU Bin, YIN Qingfu, et al. Influence of power frequency voltage on lightning flash-over rate of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 61-65.

[7] 冯瑞发，蔡汉生，廖民传，等. 不同工况下断路器过电压仿真及防护措施[J]. 南方电网技术，2021，15(2)：124-131.
FENG Ruifa, CAI Hansheng, LIAO Minchuan, et al. Overvoltage simulation and protection measures of circuit breaker under different operation conditions[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(2): 124-131.

[8] 王　祯. 雷电过电压作用下的发电厂及变电站避雷器配置优化研究[D]. 济南：山东大学，2019.
WANG Zhen. Research on arrester configuration optimization in power plant with auxiliary substation under lightning overvoltage[D]. Ji'nan, China: Shandong University, 2019.

[9] 周啸宇，周路遥，李　特，等. 交流线路用金属氧化物避雷器的伏安温度特性研究[J]. 中国测试，2021，47(7)：154-160.
ZHOU Xiaoyu, ZHOU Luyao, LI Te, et al. Research on voltage-current temperature characteristics of metal oxide arrester for AC line[J]. China Measurement & Testing, 2021, 47(7): 154-160.

[10] 司马文霞，司　燕，杨　鸣，等. ±500kV 柔性直流输电系统雷电反击侵入波对直流断路器的影响[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2375-2384.
SIMA Wenxia, SI Yan, YANG Ming, et al. Influence of lightning back-flashover intruding wave on DC circuit breaker in μ500 kV MMC-HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2375-2384.

[11] 陈水明，王　威，于化鹏，等. 计及工频电压的特高压变电站雷电侵入波过电压分析[J]. 高电压技术，2010，36(8)：1852-1857.
CHEN Shuiming, WANG Wei, YU Huapeng, et al. Analysis on UHV Substation Lightning Intruding Over-voltage Considering Power Frequency Voltage[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 1852-1857.

[12] 梁　玲，肖先勇. 考虑波形起始点的特高压变电站雷电入侵过电压分析[J]. 四川电力技术，2014，37(2)：52-55，71.
LIANG Ling, XIAO Xianyong. Analysis on lightning invading overvoltage of UHV substation considering point on wave[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2014, 37(2): 52-55, 71.

[13] 孙　振，王建国，谢从珍，等. 110～500kV 复合绝缘子的雷电闪络特性[J]. 电网技术，2008，32(16)：43-46.
SUN Zhen, WANG Jianguo, XIE Congzhen, et al. Lightning impulse flashover characteristic of composite rod insulators with rated voltage from 110 kV to 500kV[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 43-46.

[14] 刘志远，于晓军，李秀广，等. 基于静态伏安特性曲线的 ZnO 电

阻片耐受能量计算等效性研究[J]. 电瓷避雷器，2022(1)：15-21.
LIU Zhiyuan, YU Xiaojun, LI Xiuguang, et al. Equivalence of energy calculation of ZnO varistors based on Static V-A characteristic[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 15-21.

[15] 何雨微，司文荣，魏本刚，等. 考虑吸收能量估算的金属氧化物避雷器模型准确性分析[J]. 中国电机工程学报，2017，37(10)：3019-3027.
HE Yuwei, SI Wenrong, WEI Bengang, et al. Accuracy analysis of metal-oxide arrester simulation models considering the energy absorption estimation under impulse currents with different steepness[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 3019-3027.

[16] 李　顺，行鸿彦，易秀成. 雷电流信号的频谱与陡度性能分析[J]. 电子测量技术，2019，42(18)：106-111.
LI Shun, XING Hongyan, YI Xiucheng. Spectrum and steepness performance analysis of lightning current signals[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(18): 106-111.

[17] 焦保利，霍　锋，陈　勇，等. 特高压同塔双回交流线路的外绝缘特性[J]. 高电压技术，2009，35(7)：1526-1532.
JIAO Baoli, HUO Feng, CHEN Yong, et al. External insulation characteristic for UHVAC transmission line with double-circuit on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1526-1532.



罗喻扬
1999—，男，硕士生
主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作
E-mail: 524832553@qq.com

LUO Yuyang



李　化(通信作者)
1979—，女，博士，教授，博导
主要从事高电压与绝缘技术和脉冲功率技术等方面的研究工作
E-mail: leehua@hust.edu.cn

LI Hua
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-06-13　修回日期　2022-11-20　　编辑　陈　蔓