引用格式:陈炯,秦子翌,马爱清,等.输配电廊道感应电接地试验及其防护距离研究[J].电力科学与技术学报,2025,40(5):297-305.
Citation:CHEN Jiong, QIN Ziyi, MA Aiqing, et al. Study on grounding test of induced voltage and its protection distance in power transmission and distribution corridors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(5):297-305.

输配电廊道感应电接地试验及其防护距离研究

陈　炯[1],秦子翌[1],马爱清[1],任茂鑫[2],尹　凡[2]
(1.上海电力大学电气工程学院,上海 200090;2.国家电网有限公司华东分部,上海 200120)

摘　要:超、特高压输电线路对其下方邻近配电线路形成极大的感应电危害,对配电检修作业造成困难。在电线上挂设接地线作为最有效的感应电防护措施之一,鲜有试验模拟并提供有助于实际工程的定量指导。基于感应电原理设计试验,验证了配电检修时感应电接地防护的有效性与距离性,探究了电压等级、回数、接地间隔距离对感应电压的影响规律,拟合得到配电线单侧接地时的感应电压简化算式,计算了各典型工况下的安全接地间隔距离并细化了配电线接地后的防护具选择。研究表明,220 kV 双回线路下不接地导线实测感应电压约为 963.7 V,接地后减小 99.69%,效果显著;配电线路接地防护存在距离限制,感应电压随线路电压等级、回数、接地间隔距离的增大而增大;各工况配电线接地后感应电压降低 92.77%~97.71%,特高压线下配电线接地安全间隔距离仅为 0.094 km,并且存在 5 个风险级别,须采取不同的防护措施来应对。所得结果可为配电线检修的安防工作提供参考。

关　键　词:高压输电;输配电廊道;感应电压;检修作业;接地防护
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.05.028　　**中图分类号**:TM726.1　　**文章编号**:1673-9140(2025)05-0297-09

Study on grounding test of induced voltage and its protection distance in power transmission and distribution corridors

CHEN Jiong[1], QIN Ziyi[1], MA Aiqing[1], REN Maoxin[2], YI Fan[2]
(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. East Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: The extra-high voltage and ultra-high voltage transmission lines pose significant induced voltage hazards to the adjacent distribution lines beneath them, creating difficulties for distribution maintenance work. Installing grounding wires on the lines is one of the most effective protective measures against induced voltage, but there is a lack of experimental simulations and quantitative guidance that can support practical engineering. Based on the principle of induced voltage, experiments are designed to verify the effectiveness and distance limitation of induced voltage grounding protection during distribution maintenance. The influence of voltage level, number of circuits, and grounding interval distance on induced voltage is explored, and a simplified calculation formula for induced voltage under distribution line single-side grounding conditions is derived; the safe grounding interval distance under various typical operating conditions is calculated, and the selection of protective equipment is refined after the distribution line is grounded. The results show that the measured induced voltage of the ungrounded conductor under the 220 kV double-circuit line is approximately 963.7 V, and it decreases by 99.69% after grounding, showing a significant effect. The grounding protection for distribution lines has a distance limitation, and the induced voltage increases as the line voltage level, number of circuits, and grounding interval distance increase. After grounding the distribution line under various operating conditions, the induced voltage is reduced by 92.77%~97.71%. The safe grounding interval distance for the distribution line under the ultra-high voltage line is only 0.094 km, and there are five risk levels, for which different

收稿日期:2024-09-04;**修回日期**:2025-02-27
基金项目:上海市自然科学基金(19ZR1420600)
通信作者:秦子翌(2000—),男,硕士,主要从事超特高压输电线路电磁环境数值模拟与测量研究;E-mail: 2833282326@qq.com

protective equipment must be adopted to address. The results obtained can provide a reference for the safety work in distribution line maintenance.

Key words: high voltage transmission; power transmission and distribution corridor; induced voltage; maintenance work; grounding protection

超、特高压电网具有送电容量大、区间长、损耗低等优点，契合国情且顺应电网发展趋势[1-3]。然而，华中、华东地区输电廊道愈发紧张，输配电线路共走廊架设已成常态，线路网络变得错综复杂。超、特高压输电线路通过静电耦合与电磁感应，在其邻近配电线路上产生极大的感应电[2]，对配电线路的运检工作造成困难[4-7]。

配电线路在进行停电检修时，由于感应电流的存在，导线上仍然存在一定电压，作业人员若不采取相应的防护措施可能会发生触电事故，造成人身伤害。目前，对于输配电廊道的感应电问题，国内外已有学者进行了广泛研究[8-14]。文献[15]计算了330 kV输电线路下380 V配电线上的感应电压与电流，并分析了感应电的影响因素；文献[16]对线路下方感应电分布特性进行了分析，并计算了人体感应电强度；文献[17]对500 kV/220 kV同塔多回情况的感应电流与检修作业防护措施进行了分析，认为要穿戴屏蔽服进行作业。然而，目前的研究多为仿真计算，可验证理论的实测与试验较少[18]，文献[19]对线路下方居民区住房物体及人体感应电压进行了测量，提出了相关预防措施；文献[20]实测了500 kV/220 kV同塔混压四回输电工程单回停电时的感应电大小，得到了防范感应电的最优相序排布。但对于配电线路平行架设于输电线路下方或附近的输配电廊道场景，缺少对配电线路停电检修时感应电接地防护的模拟试验来验证感应电接地防护的有效性与距离性。

区别于同塔多回输电线路的非全停检修作业[17,20]，在实际配电检修中，由于配电线距离输电线路较远，穿戴屏蔽服或静电服会增加作业人员负担，故通常采用对配电线路进行挂接接地线来防止感应电伤人[21-22]。DL/T 2111—2020《架空输电线路感应电防护技术导则》规定[21]：220 kV以上同塔多回线非全停检修须穿戴屏蔽服，临近输电线路的配电检修仅须挂接接地线。而接地线防护存在防护距离的限制，相关文件中并无明确规定，若防护不及时，会出现感应电伤人事故；若防护过度，可能会提高误操作率或增加人员疲劳感，降低经济效益，故不应以过大裕度换取安全度。同时，国家电网较为关注典型工况下配电线路所受的具体感应电压值，可对安规作出完善与优化，具体而言：由于配电线在单侧接地时的感应电与其远离接地点的间隔距离有关，配电线路经过多长距离进行一次接地能保证其为有效接地有待研究，而超出有效距离后，亟须一种方法快捷地计算感应电压值，为不同工况界定风险级别，以选取符合绝缘要求的防护具。

针对上述问题，本文首先基于感应电接地防护原理设计模拟试验，在湖州220 kV同塔双回线路下进行感应电实测，验证接地线挂接对感应电防护的有效性与距离性；随后根据各等级输配电线路的设计导则计算典型输配电廊道的最危险架设方案及其感应电大小，分析电压等级、回数、接地间隔距离对感应电压值的影响并得到感应电压的简化算式；最后为各电压等级输电线路下的配电检修计算安全接地间隔距离并细化配电线接地后的防护具选择方法，提供数据支撑与优化建议。

1 接地模拟试验

1.1 感应电接地防护原理

典型的输配电并行廊道如图1所示，在带电运行的A、B、C三相交流输电线路下方或邻近位置平行或交跨架设着一条配电线路d。在单位长度下，配电线路d的对地电容为C_d，输电线路相导线与配电线路d之间的互电容为C_{Ad}、C_{Bd}、C_{Cd}，输电线路各个相导线与配电线路d之间的互电感为M_{Ad}、M_{Bd}、M_{Cd}[23-24]，则线路回路存在感应电压U_1、U_2，感应电流I_1、I_2。为便于分析，本文忽略输电线路对地电容、相间电容、相间互感、沿线电阻、全部对地有功泄漏。

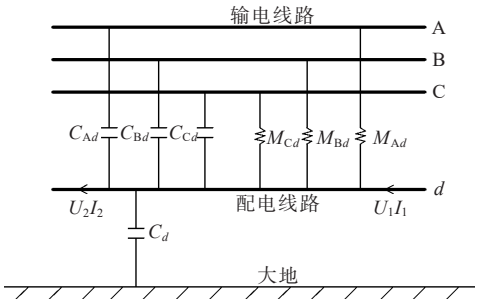


图1 输配电廊道示意

Figure 1 Power transmission and distribution corridors

配电线路 d 任意点的感应电压 $\dot{U}$、电流 $\dot{I}$ 方程由分布参数法[25]得：

$$-\frac{\partial \dot{U}}{\partial l}= \mathrm{j}\omega L\dot{I}+\mathrm{j}\omega M_{\mathrm{A}d}\dot{I}_{\mathrm{A}}+\mathrm{j}\omega M_{\mathrm{B}d}\dot{I}_{\mathrm{B}}+\mathrm{j}\omega M_{\mathrm{C}d}\dot{I}_{\mathrm{C}} \tag{1}$$

$$-\frac{\partial \dot{I}}{\partial l}=\mathrm{j}\omega C_d\dot{U}+\mathrm{j}\omega C_{\mathrm{A}d}\left(\dot{U}-\dot{U}_{\mathrm{A}}\right)+ \mathrm{j}\omega C_{\mathrm{B}d}\left(\dot{U}-\dot{U}_{\mathrm{B}}\right)+\mathrm{j}\omega C_{\mathrm{C}d}\left(\dot{U}-\dot{U}_{\mathrm{C}}\right) \tag{2}$$

式(1)、(2)中，$\dot{U}$ 为感应电压；$\dot{I}$ 为感应电流；L 为线路电感；$\dot{U}_{\mathrm{A}}$、$\dot{U}_{\mathrm{B}}$、$\dot{U}_{\mathrm{C}}$ 分别为每相电压；$\dot{I}_{\mathrm{A}}$、$\dot{I}_{\mathrm{B}}$、$\dot{I}_{\mathrm{C}}$ 分别为每相电流；l 为配电线长度。

由 A、B、C 三相间的相序关系，简化式(1)、(2)得到通用计算式如下：

$$\dot{U}_2=\dot{U}_1\cos(\gamma l)-\mathrm{j}\dot{I}_1Z_{\mathrm{C}}\sin(\gamma l)+ \frac{\alpha}{\gamma^2}\dot{U}_{\mathrm{A}}\left(1-\cos(\gamma l)\right)-\mathrm{j}\frac{M}{L}Z_{\mathrm{C}}\dot{I}_{\mathrm{A}}\sin(\gamma l) \tag{3}$$

$$\dot{I}_2=-\mathrm{j}\frac{\dot{U}_1}{Z_C}\sin(\gamma l)+\dot{I}_1\cos(\gamma l)+ \mathrm{j}\frac{\alpha}{\gamma^2 Z_{\mathrm{C}}}\dot{U}_{\mathrm{A}}\sin(\gamma l)-\frac{M}{L}\dot{I}_{\mathrm{A}}\left(1-\cos(\gamma l)\right) \tag{4}$$

式(3)、(4)中，γ 为传播系数；M 为等效互电感；α 为等效电容；Z_{C} 为波阻抗，其满足：

$$\gamma=\mathrm{j}\omega\sqrt{L(C_d+C_{\mathrm{A}d}+C_{\mathrm{B}d}+C_{\mathrm{C}d})} \tag{5}$$

$$M= M_{\mathrm{A}d}+\left(-\frac{1}{2}-\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\right)M_{\mathrm{B}d}+\left(-\frac{1}{2}+\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\right)M_{\mathrm{C}d} \tag{6}$$

$$\alpha=-\omega^2L\left[C_{\mathrm{A}d}+\left(-\frac{1}{2}-\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\right)C_{\mathrm{B}d}+ \left(-\frac{1}{2}+\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\right)C_{\mathrm{C}d}\right] \tag{7}$$

$$Z_{\mathrm{C}}=\sqrt{L/(C_d+C_{\mathrm{A}d}+C_{\mathrm{B}d}+C_{\mathrm{C}d})} \tag{8}$$

当输电线路正常运行，下方配电线路停电检修时，若不进行接地操作，此时由于互电容和对地电容，配电线路出现对地电压 U_c。此时 $I_1=I_2=0$，对于一般的线路，$\gamma l<<1$，则有：

$$\dot{U}_1\approx\dot{U}_2\approx\frac{\alpha}{\gamma^2}\dot{U}_{\mathrm{A}}= \frac{C_{\mathrm{A}d}\dot{U}_{\mathrm{A}}+C_{\mathrm{B}d}\dot{U}_{\mathrm{B}}+C_{\mathrm{C}d}\dot{U}_{\mathrm{C}}}{C_{\mathrm{A}d}+C_{\mathrm{B}d}+C_{\mathrm{C}d}+C_d} \tag{9}$$

该感应电压值一般较大，危险性极高，工程中通常对配电线路进行单端接地操作以降低电压，为作业人员提供防护。当配电线路进行单端接地时，等效原理如图 2 所示。

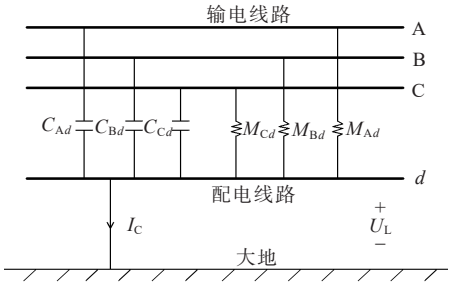


图 2　配电线路单侧接地

Figure 2　Distribution line single-side grounding

此时配电线路上的感应电荷通过接地端流入大地，出现感应电流 I_{C}；不接地端会感应出一个纵向电动势并呈线性分布，不接地端对地电压为 U_{L}。由于一端 $I_1=0$，$U_2=0$，则有：

$$\left|\dot{U}_L\right|\approx\left|\mathrm{j}(M/L)Z_{\mathrm{C}}\dot{I}_{\mathrm{A}}\tan(\gamma l)\right|=\left|\mathrm{j}\omega l\left(M_{\mathrm{A}d}\dot{I}_{\mathrm{A}}+ M_{\mathrm{B}d}\dot{I}_{\mathrm{B}}+M_{\mathrm{C}d}\dot{I}_{\mathrm{C}}\right)\right| \tag{10}$$

$$\left|\dot{I}_{\mathrm{C}}\right|\approx\left|\mathrm{j}(\alpha/\gamma^2)Z_{\mathrm{C}}\dot{U}_{\mathrm{A}}\tan(\gamma l)\right|=\left|\mathrm{j}\omega l\left(C_{\mathrm{A}d}\dot{U}_{\mathrm{A}}+ C_{\mathrm{B}d}\dot{U}_{\mathrm{B}}+C_{\mathrm{C}d}\dot{U}_{\mathrm{C}}\right)\right| \tag{11}$$

此时感应电压由静电分量主导转化为由电磁分量主导，使其值极大地减小，实现了对作业人员的安全防护。

1.2　试验设计

为验证感应电接地防护的有效性与距离性，本文设计了试验来模拟配电检修作业场景。不接地时的静电感应电压测试示意如图 3 所示，单端接地的感应电测试示意如图 4 所示。在输电线路下方，测试人员利用绝缘杆支撑起测试导线，利用 Tektronix P6015A 型高压探头、万用表测量导线处于非接地、接地状态时的感应电压，以模拟配电线路的不同接地工况，验证接地防护的有效性；随后改变测试导线长度进行多次试验，来反映配电线不同接地间隔距离下的感应电压变化规律，验证接地防护的距离性。

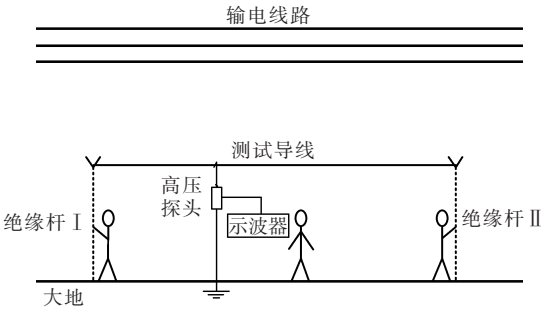


图3 不接地时的静电感应电压测试示意

Figure 3 Electrostatic induced voltage test under ungrounded condition

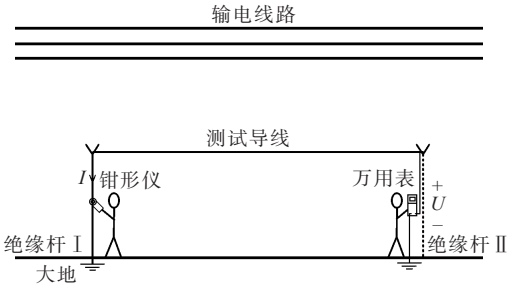
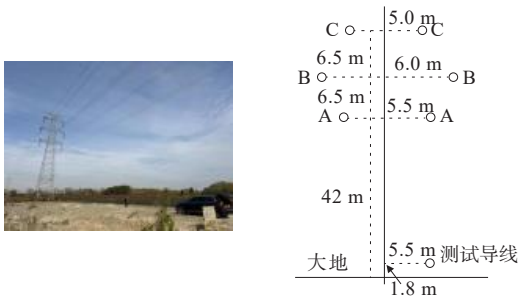


图4 单端接地的感应电测试示意

Figure 4 Induced voltage test under single-end grounding condition

1.3 实测与分析

测试场地位于湖州林圩东北157 m，东南338 m范围之间，在升塘2P77线、2P78线220 kV同塔双回输电线路的35号杆塔和36号杆塔间下方空地进行试验。测试当天天气良好，无风偏或湿度影响，测试环境如图5所示。



(a) 线路实景 (b) 线路空间悬挂点

图5 测试环境

Figure 5 Test environment

该线路电压等级为220 kV，运行电流平均取值316.9 A，导线型号为2×LGJ-300/25，杆塔型号为SZ51。测高仪测得该线路弧垂点在测试场地处对地高度最低为21.5 m，接地电阻实测值为0.37～0.38 Ω。试验平台搭建如图6所示，示波器接线实景如图7所示。

试验架设了不同长度的测试导线，分别进行不接地与接地的感应电测试，将试验结果与电磁暂态程序(electromagnetic transients program，EMTP)数学建模计算结果进行对比，试验值与仿真值如表1所示。

(a) 测试导线(左侧) (b) 测试导线(右侧)

图6 试验平台搭建

Figure 6 Test platform construction

图7 示波器接线实景

Figure 7 Actual wiring scene of oscilloscope

表1 试验值与仿真值

Table 1 Test values and simulation values

导线接地情况	感应电压/V	
	试验值	仿真值
不接地	963.70	981.14
单端接地，测试导线长度20 m	0.82	1.06
单端接地，测试导线长度30 m	1.34	1.58
单端接地，测试导线长度40 m	1.94	2.12
单端接地，测试导线长度50 m	2.60	2.64
单端接地，测试导线长度60 m	3.31	3.17
单端接地，测试导线长度70 m	3.97	3.72

由表1可知，测试导线不接地时，感应电压约为963.70 V，该值不随测试导线长度的增减而变化。接地后感应电压急剧减小，选用70 m长的测试导线时感应电压降低约99.59%，效果显著。但也不难发现，感应电压随测试导线长度的增大而增大，即接地防护存在一定距离限制。

2　典型输电线路接地防护距离计算

2.1　线路参数

为得到满足普遍工况的配电线接地防护结论，本文对常见的不同电压等级高压交流输电线路进行收资与建模。以典型设计条件作为参考，高压交流输电单回线路通常采用水平或三角排列，双回线路通常采用垂直同相序排列，导线均相对于杆塔中线呈对称分布，典型线路空间排布如图 8 所示。

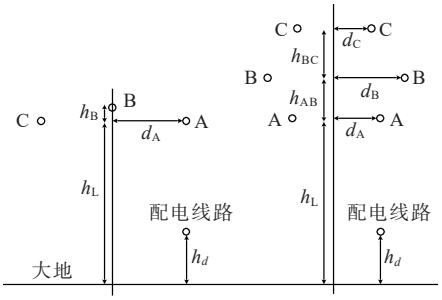


图 8　典型线路空间排布

Figure 8　Spatial arrangement of typical lines

线路的架设高度 h_L 与 h_d 通常严格遵循规范，为保留一定裕度且使结论更具通用性，线路空间布置在保留相间距的同时尽可能地降低高度以模拟最危险的线路架设情况。不同电压等级线路的最低架设高度由各等级线路的国标设计规范文件[26-28]计算求得，最低相的设计规范高度与计算高度如表 2 所示，其余典型空间排布计算参数如表 3 所示。

表 2　最低相的设计规范高度与计算高度

Table 2　Design specification height and calculated height of the lowest phase

电压等级/kV	最小对地距离/m	与配电线最小距离 h_L-h_d/m	计算高度 h_L 或 h_d/m
10	6.5		6.5
110	7.0	3	9.5
220	7.5	4	10.5
330	8.0	5	11.5
500	14.0	8	14.5
750	19.5	12	19.5
1 000	25.0	16	25.0

利用 EMTP 软件建立多导线系统的数学模型，如图 9 所示。不同电压等级的单/双回输电线路典型导线参数如表 4 所示。计算时配电线导线采用铝导线，导线截面为 70 mm²，输电线路导线均采用钢芯铝绞线，土壤电阻率取 200 Ω·m。

表 3　典型线路空间排布计算参数

Table 3　Calculation parameters of spatial arrangement of typical line

电压等级/kV	单回线		双回线				
	d_A/m	h_B/m	d_A/m	d_B/m	d_C/m	h_{AB}/m	h_{BC}/m
110	5.50	0	3.10	3.6	3.1	4.20	4.3
220	6.00	4	5.50	6.0	5.0	6.50	6.5
330	10.31	0	7.00	9.0	7.0	9.00	9.5
500	11.50	0	9.35	11.1	8.7	12.15	13.4
750	20.80	0	14.40	16.4	14.4	15.20	16.3
1 000	24.85	3	16.10	15.7	15.3	19.20	19.2

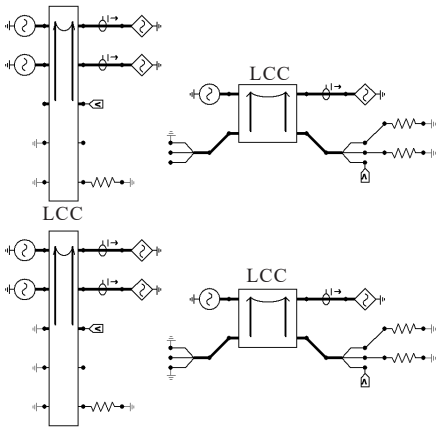


图 9　EMTP 建模

Figure 9　EMTP modeling

表 4　输电线路典型导线参数

Table 4　Typical conductor parameters of power transmission lines

电压等级/kV	回数	典型导线型号	相分裂数	分裂间距/mm	导线直径/mm	直流电阻/(Ω·km⁻¹)
110	单回	LGJ-240/30			21.6	0.118 10
	双回	JL/G1A-300/40			23.9	0.096 10
220	单回	JL/GIA-240/30	2	400	21.6	0.120 90
	双回	LGJ-300/25	2	400	23.7	0.094 33
330	单回	LGJ-300/40	2	400	23.9	0.096 14
	双回	LGJ-400/35	2	400	26.8	0.073 89
500	单回	JL/G1A-630/55	4	500	34.3	0.045 20
	双回	LGJK-400/35	6	400	26.8	0.074 00
750	单回	LGJ-400/50	6	400	27.6	0.072 32
	双回	LGJ-500/45	6	400	30.0	0.059 12
1 000	单回	JL/G1A-630/45	8	400	33.6	0.045 90
	双回	LGJ-630/45	8	400	33.6	0.046 33

2.2　感应电计算与分析

当配电线路不进行接地防护时，不同线路对配电线路产生的静电感应电压如表 5 所示。配电线路

处于极强的外电场中，由于与运行线路间存在电容耦合效应，配电线路上产生极大的对地电位。尽管大电压等级、多回的线路在架设时适当放宽了空间排布间距，但仍然产生了更大的感应电危害，特高压双回线路下方的配电线在不进行接地操作时，感应电压高达167.72 kV。

表5 无接地防护时的感应电压

Table 5 Induced voltage without grounding protection

电压等级/kV	回数	感应电压/kV
110	单回	12.55
110	双回	15.51
220	单回	23.31
220	双回	29.10
330	单回	45.03
330	双回	51.65
500	单回	54.55
500	双回	77.58
750	单回	71.44
750	双回	73.23
1 000	单回	71.56
1 000	双回	167.72

因此，对处于输配电廊道中的任何配电线路，在其停电检修时都应当进行接地操作，并且对不同输电线路下的场景进行区分。配电线进行单侧接地后，未接地侧产生一定的对地电位，线路回数、电压等级、与接地处间隔距离均对感应电压产生一定影响。

单回线、双回线下的感应电压分别如图10、11所示。从图10、11中可以看出，各典型工况下在配电线接地后，在10 km范围内感应电压至多能降低92.77%～97.71%，且不同电压等级、回数、接地间隔下的感应电压差值较大，因此在配电检修时防护具的选择应考虑不同影响因素的差异以避免感应电防护不及或防护过度。

比例系数随电压等级的变化如图12所示。不难发现，随着输电线路电压等级、回数、接地间隔距离的增大，感应电压增大；而感应电压与接地间隔距离还满足正比例关系，且比例系数随电压等级的增大而增大。

本文通过最小二乘法对该比例系数与电压等级的关系进行解析式拟合，其与仿真数据变化趋势一致，R^2均大于0.99，拟合优度较高，因此可直接通过拟合式推导出不同电压等级、回数、接地间隔距离下的感应电压大小。在单回输电线路与双回输电线路下，配电线路上感应电压的近似表达式分别为

$$U_{\mathrm{I}}=\left(65.82\mathrm{e}^{\frac{1\,417U_{\mathrm{N}}}{10^6}}-393.3\mathrm{e}^{-\frac{957U_{\mathrm{N}}}{5\times10^4}}\right)d \tag{12}$$

$$U_{\mathrm{II}}=\left(307.2\mathrm{e}^{\frac{9U_{\mathrm{N}}}{4\times10^4}}-669.2\mathrm{e}^{-\frac{8\,111U_{\mathrm{N}}}{10^6}}\right)d \tag{13}$$

式(12)、(13)中，U_{I}和U_{II}分别为单回情况与双回情况下的感应电压，kV；U_{N}为输电线路电压等级，kV；d为接地间隔距离，km。

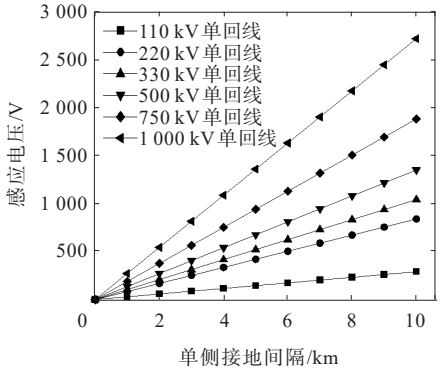


图10 单回线下的感应电压

Figure 10 Induced voltage under single-circuit line condition

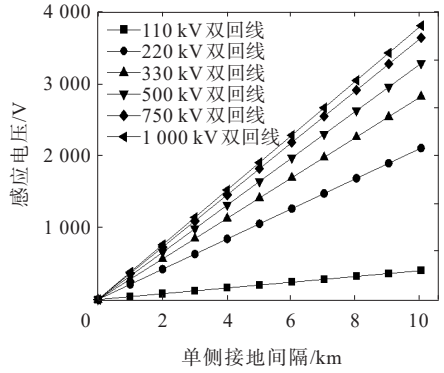


图11 双回线下的感应电压

Figure 11 Induced voltage under double-circuit line condition

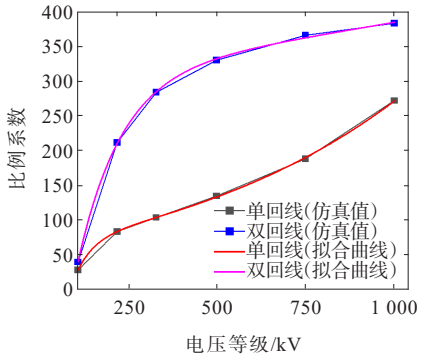


图12 比例系数随电压等级的变化

Figure 12 Variation of proportional coefficient with voltage level

利用式(12)、(13)可得出我国典型输配电廊道中配电线接地防护的安全距离，为安规优化提供数据参考。以人体安全电压限值36 V为限，若不穿戴任何感应电防护具进行作业，各电压等级线路下配电线接地防护的安全距离如表6所示。超出界限后则必须穿戴感应电防护具防止触电，规程中各防护具的安全分级如表7所示[29-31]。

表6　各电压等级线路下接地防护的安全距离

Table 6　Safety distance of grounding protection under lines of different voltage levels

电压等级/kV	回数	安全距离/km
110	单回	1.240
110	双回	0.880
220	单回	0.420
220	双回	0.170
330	单回	0.350
330	双回	0.130
500	单回	0.270
500	双回	0.110
750	单回	0.190
750	双回	0.099
1 000	单回	0.130
1 000	双回	0.094

表7　规程中各防护具的安全分级

Table 7　Safety classification of various protective equipment in specifications

防护具	分级	安全电压/V
安全帽	P型	36
	JG型	2 200
	TJE型	20 000
绝缘手套	0级	380
	1级	3 000
	2级	10 000
	3级	20 000
	4级	35 000
绝缘鞋	0级	400
	1级	3 000
	2级	6 000、10 000
	3级	20 000
	4级	35 000

以特高压双回线路下配电检修场景为例，接地防护安全距离仅为0.094 km，因此应防范感应电触电风险。在该安全距离范围内，无感应电触电风险，作业人员不需要穿戴过多感应电防护装备，从而可降低疲劳感与误操作率。超出该安全距离范围后，由于配电线检修接地防护间隔距离通常不超过10 km，可利用式(13)计算得配电线接地后感应电压不超过3 845 V，故结合表7可区分5个感应电压区间，分别对应不同的防护具选取组合，由此可为其界定5个感应电风险级别，检修人员在作业前根据接地间隔距离即可方便地确定工况风险级别，选用相应的防护具组合，特高压双回输电线路下配电检修风险级别界定如表8所示。

表8　特高压双回输电线路下配电检修风险级别界定

Table 8　Risk level definition of distribution maintenance under ultra-high voltage double-circuit power transmission line condition

风险级别	接地间隔距离/km	感应电压区间/V	安全帽	绝缘手套	绝缘鞋
Ⅰ	≤0.094	≤36	P型	0级	0级
Ⅱ	0.094～0.980	36～380	TJG型	0级	0级
Ⅲ	0.980～1.040	380～400	TJG型	1级	0级
Ⅳ	1.040～5.720	400～2 200	TJG型	1级	1级
Ⅴ	5.720～10.000	2 200～3 845	TJE型	2级	1级

3　结语

本文结合感应电接地防护机理、接地模拟试验和仿真拟合，对感应电的接地防护作出了有效性验证与定量研究。在湖州220 kV同塔双回输电线路下方架设测试导线，验证了接地防护的有效性与距离性，确定了我国典型输配电廊道的最危险架设场景，分析了电压等级、回数、接地间隔距离对感应电压的影响，计算了典型工况下配电检修的感应电压大小与规律，并得到如下结论。

1）基于感应电机理设计接地试验，试验结果表明测试导线不接地时，其感应电压约为963.7 V，当接地后感应电压急剧减小，并且单端接地时的感应电压随测试导线长度的增大而增大，接地防护存在距离限制。

2）利用所得配电线接地时感应电压的拟合公式，可方便地计算不同典型场景下的感应电压。感应电压随着电压等级、回数、接地间隔距离的增大而增大，并与接地间隔距离存在正比关系，其比例系数随电压等级的增大而增大。

3）计算了不同电压等级工况对应的安全接地间隔距离，特高压双回线路下配电线单端接地有效接地间隔距离仅为0.094 km，利用数学关系为其界

定了5个风险级别,并选取了对应等级的防护具,兼顾了安全性与经济性。

参考文献:

[1] 韩先才,孙昕,陈海波,等.中国特高压交流输电工程技术发展综述[J].中国电机工程学报,2020,40(14):4371-4386+4719.
HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, et al. The overview of development of UHV AC transmission technology in China[J].Proceedings of the CSEE,2020,40(14):4371-4386+4719.

[2] 王冉冉,徐静,李子扬,等.特高压交流输电线路线下钢架建筑的感应电压、电流仿真分析[J].高电压技术,2021,47(2):724-731.
WANG Ranran, XU Jing, LI Ziyang, et al. Simulation analysis for induced voltage and induced current in the steel frame construction under UHV AC transmission lines[J].High Voltage Engineering,2021,47(2):724-731.

[3] 吕安强,魏伦,李婷,等.回路间距对电力电缆短路电动力的影响分析[J].电力工程技术,2023,42(6):206-213.
LYU Anqiang,WEI Lun,LI Ting,et al.Influence of phase sequence and loop spacing on short circuit electromagnetic force of power cable[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(6):206-213.

[4] 党世轩,王岩,胡聪,等.110 kV输电线路巡检无人机电磁兼容分析[J].电力科学与技术学报,2023,38(1):235-242.
DANG Shixuan, WANG Yan, HU Cong, et al. Electromagnetic compatibility analysis of patrol UAV applied to 110 kV transmission line[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(1):235-242.

[5] 金涛,黄俊波,孙斌,等.复杂地形区域输电线路无人机自主巡检方法研究[J].电网与清洁能源,2024,40(7):107-113.
JIN Tao,HUANG Junbo,SUN Bin,et al.Research on the autonomous inspection method of transmission line UAVs in the complex terrain area[J].Power System and Clean Energy,2024,40(7):107-113.

[6] 马爱清,毕永翔,陈鑫涛,等.特高压交直流输电线路带电作业安全防护及碳减排效应分析[J].电测与仪表,2024,61(8):47-54.
MA Aiqing,BI Yongxiang,CHEN Xintao,et al.Analysis on safety protection and carbon emission reduction effect of UHV AC/DC transmission line live working[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2024,61(8):47-54.

[7] 曹碧波,姜梅.输变电工程电磁环境研究现状综述[J].电力安全技术,2020,22(1):46-51.
CAO Bibo,JIANG Mei.Summary of the research status of electromagnetic environment in power transmission and transformation engineering[J]. Electric Safety Technology,2020,22(1):46-51.

[8] TANG B, YANG X F, ZHANG J G, et al. Analysis of induced current on power transmission lines for the reradiation interference in medium wave based on characteristic modes[J].International Journal of Antennas and Propagation,2022,2022(1):4587930.

[9] WANG Q B, LI D X, LIU M, et al. Study on distribution characteristics of induced voltage and current on optical fiber composite ground wire of distribution line[J].Journal of Physics:Conference Series,2022,2401(1):012037.

[10] 杨文刚,杨发.110 kV双回交流T接塔电场仿真分析[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):138-143.
YANG Wengang, YANG Fa. Simulation analysis of electric field of 110 kV double-circuit AC T-tower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(5):138-143.

[11] LEMAN J T, OLSEN R G, RENEW D. Calculation of transmission line worker electric field induced current using Fourier-enhanced charge simulation[J]. Energies,2023,16(22):7646.

[12] 彭飞,周亚傲,肖斌,等.±800 kV直流线路工程邻近带电体架线施工防护研究[J].电力科学与工程,2024,40(3):70-78.
PENG Fei,ZHOU Yaao,XIAO Bin,et al.±800 kV direct current line project adjacent to the construction of live wire protection[J]. Electric Power Science and Engineering,2024,40(3):70-78.

[13] PAPADOPOULOS T A,DATSIOS Z G,CHRYSOCHOS A I, et al. Transient induced voltages on aboveground pipelines parallel to overhead transmission lines[J]. Electric Power Systems Research,2023,223:109631.

[14] 朱轲,邱雪梅,宁鑫,等.220 kV复合横担输电杆塔电场分布及均压优化分析[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):217-222.
ZHU Ke, QIU Xuemei, NING Xin, et al. Electric field distribution and voltage-sharing optimized analysis of 220 kV transmission tower with composite cross-arm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(3):217-222.

[15] 郑云龙,罗日成,邹明,等.330 kV同塔双回输电线路下平行运行的380 V线路感应电压电流仿真计算[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):216-222.
ZHENG Yunlong, LUO Richeng, ZOU Ming, et al. Induced voltage and current simulation of 380 V lineparallel operating under 330 kV double-circuit transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(1):216-222.

[16] 王军燕,王鹏,刘勇,等.500 kV直流输电线路下方施工设备及人体感应电研究[J].电力安全技术,2024,26(5):43-48.
WANG Junyan, WANG Peng, LIU Yong, et al. Research on construction equipment and human-induced electricity below the 500 kV DC transmission lines[J]. Electric Safety Technology,2024,26(5):43-48.

[17] 李金亮,邹德华,刘夏清,等.500 kV/220 kV同塔四回混压输电线路检修作业安全防护研究[J].电力科学与技

术学报,2016,31(2):134-140.
LI Jinliang,ZOU Dehua,LIU Xiaqing,et al.Research on security protection of maintenance work on 500 kV/220 kV four-circuit mixed-voltage transmission lines on the same tower[J].Journal of Electric Power Science and Technology, 2016,31(2):134-140.

[18] 何旺龄,汤荣,刘云鹏,等.特高压交流输电线路附近钢架平台处人体与晾衣架感应电特性研究[J].电工技术学报,2024,39(23):7605-7615.
HE Wangling, TANG Rong, LIU Yunpeng, et al. The induced electrical characteristics of human body and metal clothes rack at the steel frame platform near the UHV AC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2024,39(23):7605-7615.

[19] 赵亚光,杨金波,王韧,等.500 kV输电线路下方感应电产生机理研究及防控[J].云南电力技术,2021,49(1):48-54.
ZHAO Yaguang,YANG Jinbo,WANG Ren,et al.Research on induction generation mechanism under 500 kV transmission line and its prevention and control[J]. Yunnan Electric Power,2021,49(1):48-54.

[20] 徐党国,李亚美,黄诗洋,等.500 kV/220 kV同塔混压四回输电线路感应电压及电流的计算与测量分析[J].高压电器,2025,61(4):203-210+218.
XU Dangguo, LI Yamei, HUANG Shiyang, et al. Calculation and measurement analysis for induced voltage and current of 500 kV/220 kV mixed-voltage four-circuit transmission line on the same tower[J].High Voltage Apparatus,2025,61(4):203-210+218.

[21] 国家能源局.架空输电线路感应电防护技术导则:DL/T 2111—2020[S].北京:中国电力出版社,2020.
National Energy Administration. Technical guide of protection for induced voltage and current on overhead transmission lines: DL/T 2111—2020[S]. Beijing: China Electric Power Press,2020.

[22] 孙生耀,张建军.输电线路带电检修作业的安全防护研究[J].品牌与标准化,2023(增刊1):177-179.
SUN Shengyao, ZHANG Jianjun. Research on safety protection for live line maintenance of transmission lines [J].Brand & Standardization,2023(sup 1):177-179.

[23] REN H T,ZHANG Y.Research on induced current and induced voltage of 500 kV double circuit transmission line[J].Energy Reports,2021,7:216-223.

[24] 李正康,高仕斌,周文婕,等.接触网上方平行接近或交跨高压交流输电线路感应电研究[J].电气化铁道,2022,33(4):27-32.
LI Zhengkang,GAO Shibin,ZHOU Wenjie,et al.Studies on induction electric of high voltage AC power transmission line parallelly approaching to or crossing-over of OCS[J].Electric Railway,2022,33(4):27-32.

[25] 任承贤,李稳,时海刚,等.220 kV/500 kV混压同塔四回输电线路检修方式[J].电力科学与技术学报,2018,33(3):147-153.
REN Chengxian,LI Wen,SHI Haigang,et al.220 kV/500 kV maintenance of a mixed pressure with the four-line transmission line tower[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(3):147-153.

[26] 国家能源局.10 kV及以下架空配电线路设计规范:DL/T 5220—2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
National Energy Administration.Code for design of 10 kV or under overhead distribution line:DL/T 5220—2021[S]. Beijing:China Planning Press,2021.

[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部.110 kV~750 kV架空输电线路设计规范:GB 50545—2010[S].北京:中国计划出版社,2010
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line:GB 50545—2010[S]. Beijing:China Planning Press,2010

[28] 中华人民共和国住房和城乡建设部.1 000 kV架空输电线路设计规范:GB 50665—2011[S].北京:中国计划出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.Code for design of 1 000 kV overhead transmission line:GB 50665—2011[S].Beijing: China Planning Press,2012.

[29] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.头部防护 安全帽:GB 2811—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Head protection-safety helmets: GB 2811—2019[S]. Beijing: Standards Press of China,2019.

[30] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.带电作业用绝缘手套:GB/T 17622—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
General Administration of Quality Supervision,Inspection and Quarantine ,National Standardization Administration. Live working-gloves of insulating material:GB/T 17622—2008[S].Beijing:Standards Press of China,2009.

[31] 国家能源局.带电作业用绝缘鞋(靴)通用技术条件:DL/T 676—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.
National Energy Administration. General technical specification of dielectric shoes(boots)for live working:DL/T 676—2012[S].Beijing:China Electric Power Press,2012.