500 kV线路下方低压配电线路感应电压问题研究

为了保障低压配电线路检修作业的安全，有必要研究交流超高压输电线路下方平行架设的低压配电线在停运检修状态下的感应电压问题。采用CDEGS电磁场数值计算软件，计算了某交流500 kV架空输电线路下方平行架设的停运低压配电线路上的感应电压，分析了配电线路与500 kV线路平行长度、偏移距离以及500 kV线路潮流、相序排列方式等因素对感应电压的影响。基于现有的感应电抑制方法，研制了一种便于操作、安全可靠的感应电自动消除装置，并通过试验证明了其有效性。

李世龙[1] 何雨微[1] 刘亚坤[1] 王黎明[2] 傅正财[1]/1.上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室 2.国网上海市电力公司电力科学研究院

李世龙/硕士研究生

关键词/Keywords
感应电压·
架空线路·
配电线路·
CDEGS·
消除措施·

0 引言

随着电力需求的增长，越来越多的超高压输电线路先后建成并投入运行。而由于土地资源紧张，许多超高压线路邻近或跨越村镇、工厂和农田等民用设施区域，不可避免地平行或接近平行于低压配电线路等金属管线。低压配电线路与上级变压器断开处于检修状态时，其线路上的感应电荷无路径释放，感应电压可达数十千伏[1-2]，导致低压电工在检修时可能感到麻电，甚至威胁人身安全。上海地区有多条超、特高压输电线路与低压配电线路共用输电走廊，配电线路的感应电压问题已成为上海电网接到的电磁环境投诉的主要问题之一，给新建、维护电力设施带来困难，亟待解决。

以往国内外关于架空输电线路感应电问题的研究主要集中在超、特高压同塔双回或多回线路的运行线路在停运线路上产生的感应电压，提出了理论计算、测量方法与抑制感应电压的措施[3-5]，以及通过计算超、特高压输电线路架空地线的感应电压、电流水平研究地线环流电能损耗及其对超、特高压交流线路的设计和安全运行的影响[6-7]，缺乏对于超、特高压输电线路下方平行架设的低压配电线路上的感应电相关问题的研究。因此，研究超高压输电线路下方低压配电线路上感应电压的产生机理、计算方法与抑制措施具有实际意义。

本文采用CDEGS软件仿真计算了500 kV超高压交流输电线路下方平行架设的低压配电线路的感应电压，分析了感应电压的影响因素，基于感应电防治技术研制了一套便于操作、安全可靠的感应电自动消除装置，并通过现场试验证明了其有效性。

1 配线感应电压的仿真计算

1.1 基于CDEGS的仿真模型建立

基于CDEGS软件建立仿真模型，计算500 kV超高压架空线下方停运配电线路的感应电压并分析影响因素。CDEGS是加拿大SES公司开发推出的集成工程软件包。该软件以电磁理论为基础，不受频率限制，其核心是计算导体网络周围的电磁场分布与导体、地表电位分布等[8]。

进行仿真计算时，作如下假设：①忽

国网上海市电力公司科技项目（5209401350BY）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

略超高压输电线路的端部效应和弧垂，不考虑线路换位，将输电线视为长直平行导线[9]；②架空地线对停运配电线上的感应电压影响很小，建立的模型忽略架空地线；③假定导线之间是完全平行的，将三维空间问题简化为二维问题；④考虑配电线路的三相导线间隔距离小，对计算结果影响小，仿真试验中只考虑一相，即对单根配线导体模型进行分析。

所建立的仿真模型的导线布置截面图如图1所示，其中导体1～3、导体4～6分别为500 kV双回线路的三相导线；导体7为低压配电线；d为偏移距离，即配电线路对地高度不变时偏离杆塔截面中心线的长度。

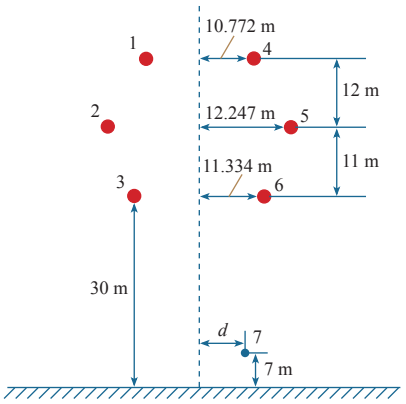


图1　导线布置截面图

交流500 kV同塔双回输电线路的杆塔模型为鼓形塔型，导线相序采用正相序布置（两回自上而下都是A相、B相、C相），导线型号选取4×LGJ－400/35四分裂钢芯铝绞线，具体参数为：分裂间距为450 mm，次导线外径为13.41 mm，相对电阻率为1.795 Ω·mm^2/m（相对于退火铜0.017 5 Ω·mm^2/m）；380 V配电线路参数为：导线外径为4.72 mm，相对电阻率为1.617 Ω·mm^2/m；土壤采用电阻率为100 Ω·m的均匀土壤模型。

采用仿真模型，计算以下工况下的配电线路感应电压：配电线路位于500 kV线路杆塔中心线（d=0）；500 kV双回线路均处于运行状态，输送功率为1 732 MW；线路间平行长度为200 m。计算结果如下：静电感应电压为36 026 V，电磁感应电压为13.2 V。

1.2　配电线路感应电压的影响因素

（1）平行长度

计算当配电线路位于杆塔截面中心线、500 kV线路输送功率为1 732 MW时，不同平行长度下的配电线路感应电压的计算结果如表1所示。

表1　不同平行长度下的配线感应电压

平行长度/m	静电感应电压/V	电磁感应电压/V
20	36 034	1.3
50	36 024	2.9
100	36 028	6.3
200	36 024	13.0
300	36 029	19.7
400	36 026	26.0
500	36 018	32.7
600	36 029	38.8
700	36 037	45.5
800	36 039	52.3
900	36 055	59.3
1 000	36 049	65.8

从计算结果可以看出，停运配电线路上静电感应电压幅值与线路平行长度没有太大关系，而电磁感应电压随着平行长度的增加呈线性增大，如图2所示。

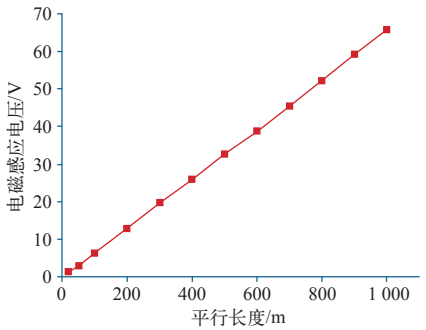


图2　电磁感应电压随平行长度变化曲线

（2）500 kV线路输送功率

计算配电线路位于杆塔截面中心线、线路平行长度为200 m时，500 kV线路不同输送功率下的配电线路感应电压，计算结果如表2所示。

从计算结果可以看出，停运配电线路上的静电感应电压与500 kV线路的输送功率基本无关，而电磁感应电压与线路潮流呈线性关系，如图3所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 500 kV线路不同输送功率下的配线感应电压

潮流/MV·A	静电感应电压/V	电磁感应电压/V
520	36 029	4.2
866	36 028	6.8
1 299	36 027	10.0
1 732	36 026	13.2
2 598	36 025	19.7
3 464	36 024	26.2
4 330	36 022	32.6

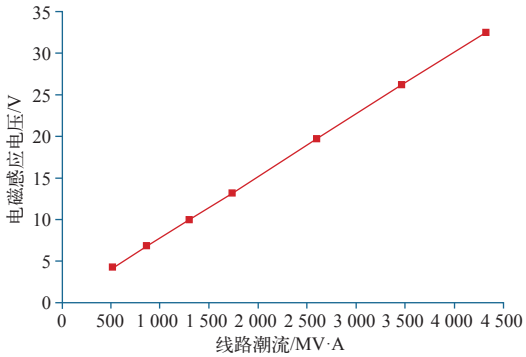


图3 电磁感应电压随线路潮流变化曲线

（3）偏移距离

以配线偏移距离作为典型指标研究高低压线路空间距离对于感应电压的影响。计算当500 kV输送功率为1 732 MW、线路平行长度为200 m时，不同偏移距离下的感应电压，计算结果如表3所示。

表3 不同偏移距离下的配线感应电压

偏移距离/m	静电感应电压/V	电磁感应电压/V
0	36 026	13.2
5	35 421	13.1
10	33 382	12.6
20	24 471	10.7
30	13 550	8.3
40	5 677	6.1
50	1 320	4.5

图4为静电感应电压和电磁感应电压随偏移距离的变化曲线，均随着偏移距离的增大而减小很快。当偏移距离达到50 m时，相较于位于杆塔中心线的情况，静电感应电压和电磁感应电压分别减小了96.34%和65.91%。

（4）500 kV同塔双回线路相序排列

当同塔双回线路的一回线路相序固定，改变另一回的相序，共有六种情况。在仿真模型中，

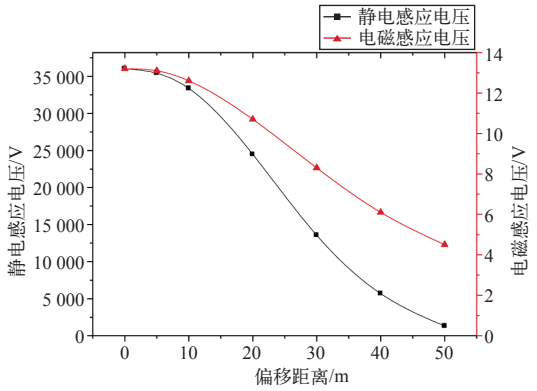


图4 不同偏移距离下感应电压变化曲线

考虑配电线路位于杆塔中心线，线路平行长度为200 m，500 kV线路输送功率为1 732 MW，线路I回导线自上而下为A相、B相和C相正相序排列（与其他排列方式具有等效性），研究II回导线不同相序排列方式对于配电线感应电压的影响，计算结果如表4所示。

表4 不同相序排列时配线感应电压

相序排列	静电感应电压/V	电磁感应电压/V
A• •A′ B• •B′ C• •C′	36 024	13.2
A• •A′ B• •C′ C• •B′	24 308	10.9
A• •B′ B• •A′ C• •C′	35 182	12.0
A• •B′ B• •C′ C• •A′	18 012	6.6
A• •C′ B• •A′ C• •B′	18 012	6.6
A• •C′ B• •B′ C• •A′	10 874	1.1

从表4中可以看出，在双回线路不同相序排列方式下，静电感应电压和电磁感应电压的变化规律相似。同相序排列方式和逆相序排列方式为两种边缘情况，其中同相序排列下感应电压最大，逆相序排列下感应电压最小，其余排列方式的情况介于此两种之间。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 感应电防治技术研究

目前，我国对于高压输电线路感应电的防治已经采取很多措施，比如加挂临时接地线，检修人员使用双保险安全带，穿防护服、导电鞋和导电手套等[10]。但对于低压配电线路，由于其感应电问题一直未受重视，还未采取统一的防治措施。基于仿真试验和对感应电压影响因素的讨论，提出以下抑制和消除措施。

2.1 检修状态配电线路接地

将停运配电线路接地可以有效释放感应电荷，抑制感应电压的大小。

利用CDEGS软件，对上文中所述标准工况仿真计算：当停运配电线路单端接地时，远离接地一端的感应电压为12.5 V，接地一端感应电流为16 mA；当停运配电线路两端接地时，线上最大感应电压为6.1 V。

从仿真结果可以看出，配电线路分别与上级变压器以及用户负载断开后，两端同时接地比单端接地能够更好地释放感应电荷，将线上的感应电压限制在非常小的数值，尤其在检修范围较大的情况下对比更明显。因此，可以采用将停运配电线路两端接地的措施解决感应电问题。另外，还建议在检修的工作区段加挂双临时接地线。

2.2 其他措施

其他防治配线感应电压的措施有优化高压线路路径、优化低压线路路径以及架空配电线路改直埋电缆等。

通过仿真计算发现，增大配电线路偏移超高压杆塔中心线的距离可以显著减小感应电压，因此可以通过优化线路路径来处理配线感应电问题。优化高压线路路径即要求相关单位在超、特高压线路设计勘查阶段将配电线路同样作为线路路径的设计因素加以考虑，这可以从源头上解决配电线路感应电问题。但从设计角度来讲，高压架空线路设计时避免平行和接近于低压配电线路，给线路设计的勘察工作提出了更高的要求，会增加设计工作量，并且由于土地空间紧张，实现难度较大，仅适合部分区域开展。

优化低压线路路径即合理调整低压配电线路，使低压线路的路径尽量垂直于高压线路、减小线路间平行长度、增大平行线路之间的距离等。此措施相对投资较小，可有效减小感应电压，但不能完全消除，且由于配电线路数量庞大、输电走廊紧张的问题，同样只适合部分区域开展。

架空配电线路改直埋电缆是一种有效解决感应电压问题的措施，但单独实施的成本较大，且需做好防护措施，避免被农耕等活动破坏。此措施需结合具体线路改造的工程执行，对于感应电矛盾较大的地区也可考虑试点执行。

2.3 感应电自动消除设备设计

根据对配电线路感应电防治技术的研究，采用易行且有效的检修线路两端临时接地的思路，设计了一种智能化的感应电消除装置。

图5为低压配电线路感应电自动消除装置一相的结构示意图，装置包括配电箱I（电网侧）和配电箱II（用户侧），内部电路利用高耐压交流接触器进行电路逻辑控制。

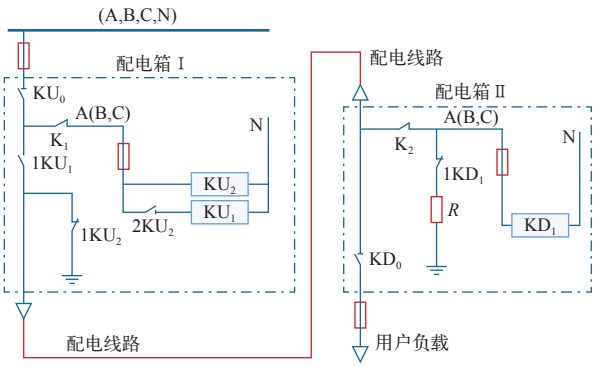


图5 感应电自动消除装置原理图（一相）

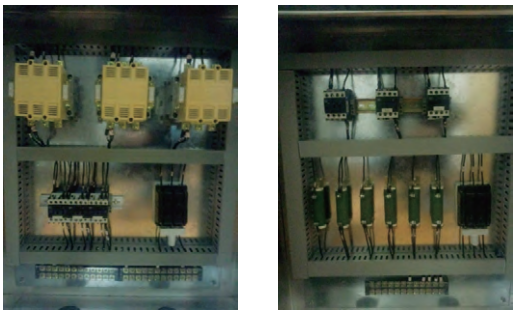
当配电线路需要断电检修时，三相开关KU_0断开，交流接触器KU_2和KU_1断电，常闭触点$1KU_1$和$2KU_2$打开，常开触点$1KU_2$闭合；同时交流接触器KD_1断电，常开触点$1KD_1$闭合。配电线路两端实现接地消除感应电压。

当配电线路结束检修需要恢复供电时，闭合三相开关KU_0，交流接触器KU_2通电，触点$1KU_2$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

打开解除接地，触点2KU_2闭合使KU_1恢复通电，1KU_1闭合使配电线路通电；交流接触器KD_1通电，触点1KD_1打开解除接地。由于接触器有一定的切换时间，所以KU_2触点1KU_2打开解除接地与KU_2触点1KU_1闭合使线路通电有先后顺序。配电线路通电后短暂经过电阻R接地后解除。

采用此装置替代传统的隔离开关，可在不增加检修人员工作量的情况下有效消除感应电压，具有便于操作、安全可靠的特点。设备的实物图如图6所示，其中图6a、图6b分别为配电箱I和配电箱II的内部电路。



（a）配电箱I　　（b）配电箱II

图6　感应电智能消除设备实物图

在实测试验中，采用RLC电路模拟长度为500 m、偏移500 kV线路50 m平行架设的配电线路，在对线路充电后使用装置将其两端接地，配电箱II中电阻R两端的电压波形如图7所示，经过约1.8 μs基本降为零。经过实测，此设备可自动、有效地消除感应电压，验证了设计方案的有效性。

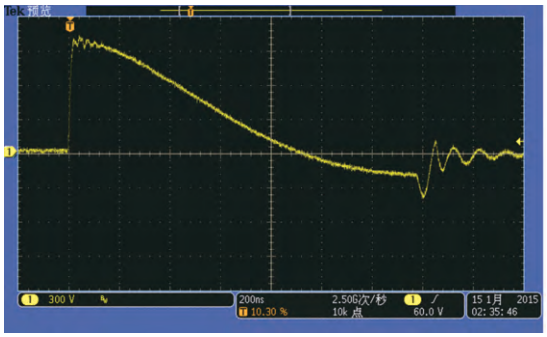


图7　配电箱II中电阻R的电压波形

3　结束语

1）在一种较严苛的工况下计算出超高压输电线路下方平行架设的配电线路在停电检修时的感应电压超过36 kV。

2）停运配线的电磁感应电压与高低压线路平行长度、超高压线路输送功率成正比关系；静电感应电压与高低压线路平行长度、超高压线路输送功率关系不大；感应电压大小随配电线路偏离500 kV线路杆塔截面中线距离的增大而减小；同塔双回500 kV线路相序排列对感应电压的影响比较明显，两回线路逆相序排列情况下配电线上感应电压最小。

3）采用检修配电线路接地、优化线路路径等措施可防治停运配线上的感应电压。本项目研制了低压配电线路感应电自动消除装置，替代传统的隔离开关，可在不增加检修人员工作量的情况下有效减小感应电压幅值。

参考文献

[1] 许小龙，张勤，朱小平．同塔双回输电线路感应电压的计算与分析 [J]．江西电力，2006，30 (3)：8-10．

[2] He Y，Wei B，Jiang A，et al．Study on assessment and countermeasures of induced voltage on distribution lines under EHV/UHV transmission lines [C]．2014 International Conference on Power System Technology，IEEE，2014：1582-1587．

[3] 袁野，王丽．500 kV同塔双回线路接地开关的选择研究 [J]．电气应用，2015，34 (3)：112-116．

[4] 李强，颜艳丽．同杆双回线路检修中“感应电”产生的原因与防范措施 [C]．中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十七届学术年会论文集，2011：1-4．

[5] 王身丽，韩浩，翁永春．500 kV架空输电线路感应电仿真计算方法 [J]．湖北电力，2009，33 (5)：40-41，55．

[6] Wang J G，Yu W，Peng X Y，et al．Induced Voltage of Overhead Ground Wires in 500 kV Single-Circuit Transmission Lines [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2014，29 (3)：1054-1062．

(下转第33页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

到平衡，而且波形为正弦波。图7c为补偿前后电网中性线的电流波形，其中绿色为补偿前电网中性线上的电流，黄色为补偿后的电网电流的波形。可以看出，经过三相四桥臂电流不平衡补偿样机补偿之后，电网中性线上电流为零。试验结果验证了所提控制策略的有效性。

5 结束语

三相四桥臂电流不平衡补偿系统作为一种有效的动态补偿装置，已经成为电力电子领域的研究热点。该系统可以实时检测、补偿低压微电网中的不平衡电流，具有良好的动态补偿功能。所研究的重点是三相四桥臂电流不平衡补偿系统的控制方法，主要结论如下。

1）根据三相四桥臂电流不平衡补偿系统的拓扑结构，分析了其工作原理，并针对各部分的功能进行详细研究，选择了基于瞬时无功功率理论的i_p-i_q运算方式作为不平衡电流检测模块的核心方法。

2）对三相四桥臂电流不平衡补偿系统的控制电路进行设计，实现负载不平衡电流的跟踪，并控制主电路功率器件的开关，生成补偿电流，保证电网电流的正弦。

3）对三相四桥臂电流不平衡补偿系统进行仿真建模，并基于TMS320F2812芯片进行控制系统设计。仿真和试验结果证明了所提电流不平衡补偿系统的正确性和有效性。

参考文献

[1] 王成山，武震，李鹏．微电网关键技术研究 [J]．电工技术学报，2014，29 (2)：1-12．

[2] 沈沉，吴翔宇，王志文，等．微电网实践与发展思考 [J]．电力系统保护与控制，2014，42 (5)：1-11．

[3] 罗奕，王钢，汪隆君．微网可靠性评估指标研究 [J]．电力系统自动化，2013，37 (5)：9-14．

[4] 白丹，蔡志开，彭力．三相逆变电源不平衡负载研究 [J]．电力系统自动化，2004，28 (9)：53-57．

[5] 张勇军，韩东昆，刘巍．受端电网静态/动态无功补偿综合优化 [J]．电力自动化设备，2009，29 (3)：32-36．

[6] 丁仁杰，刘建，赵玉伟．不平衡电路的瞬时功率分析及不对称负荷补偿方法 [J]．电工技术学报，2007，34 (1)：120-125．

[7] 王茂海，孙元章．通用瞬时功率理论在三相不平衡负载补偿中的应用 [J]．中国电机工程学报，2003，23 (11)：56-59．

[8] Lee S，Wu C．Reactive power compensation and load balancing for unbalanced three-phase four-wire system by a combined system of an SVC and a series active filter [J]．IEEE Proceedings：Electric Power Applications，2000，147 (6)：563-571．

（收稿日期：2016－03－21）EA

(上接第28页)

[7] 薛辰东，杨晓洪，崔鼎新，等．1 000 kV交流输电线路架空地线感应电压测试分析 [J]．高电压技术，2009，35 (8)：1802-1806．

[8] 王小凤．CDEGS软件在电力系统中的应用 [D]．杭州：浙江大学，2007．

[9] 冯桂宏，张炳义，王晓晖，等．500 kV同塔四回路生态环境影响分析 [J]．电网技术，2007，31 (23)：52-56．

[10] 张振泉，陈先勇，贺义平．750 kV输电线路下方感应电的原因分析及防范措施 [J]．电子世界，2013 (13)：73-74．

（收稿日期：2015－04－23）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net