

Simulation Analysis the Floating Voltage of Metal Sheath Layer Based on ATP-EMTP for High Voltage Cable Grounding Wire

Yang Gou, Ze Xiang, Guo Ma, Yongpeng Yang, Yuhang Guo, Huifang Guan, Chang Liu, Yuqi Chen, Ye Tian, Shiyang Wang

State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu Sichuan
Email: xiangze1987@163.com

Received: Dec. 3rd, 2018; accepted: Dec. 21st, 2018; published: Dec. 28th, 2018

Abstract

If the grounding system of the transmission cable is damaged, the floating voltage of the sheath layer of power cable will increase, even reaching the extremely high value of danger. High inductive voltage not only endangers workers safety, but also causes insulation layer breakdown, thus reducing the carrying capacity of cable, even breaking down the outer sheath insulation, causing cable line operation accident. In order to solve this problem, the electromagnetic transient analysis software ATP-EMTP is used to model and simulate the running transmission cable. By controlling the simulation parameters, the floating voltage of the sheath layer of power cable under different ground wire faults is calculated. The calculation shows that when the direct grounding wire or cross-connected grounding wire of one side of the cable is stolen, the inductive voltage on the metal sheath layer is still below the safe value when the disconnecting point is not too far from the other side of the direct grounding point. When the length of 110 kV cable is about 20 km and the length of 220 kV cable is about 10 km, the inductive voltage amplitude of metal sheath layer will exceed the specified value of national standard. When a piece of metal sheath layer is "suspended", that is, the direct grounding wire or cross-connected grounding wire on either side of the cable is stolen, the inductive voltage will rise to a very dangerous value, reaching tens of thousands of volts.

Keywords

Transmission Cable, ATP-EMTP Simulation, Induced Voltage of the Sheath Layer, Grounding System

基于ATP-EMTP高压电缆接地线金属护层悬浮电压仿真分析

苟杨, 向泽, 马果, 杨永鹏, 郭宇航, 关惠方, 刘畅, 陈昱圻, 田野, 王士营

国网成都供电公司, 四川 成都
Email: xiangze1987@163.com

收稿日期: 2018年12月3日; 录用日期: 2018年12月21日; 发布日期: 2018年12月28日

摘要

若输电电缆接地系统遭到破坏, 电缆金属护套对地电压将会升高, 可能达到极高的危险数值。过高的感应电压不仅危害人身安全, 还将造成绝缘层击穿, 进而降低电缆的载流量, 甚至击穿外护套绝缘, 引发电缆线路运行事故。针对这一问题, 本文利用电磁暂态分析软件ATP-EMTP对实际运行的输电电缆进行建模仿真, 通过控制参数变量计算了不同接地线故障情况下电缆金属护套可能出现的悬浮电位值。计算得知当某段电缆仅一侧的直接接地线或交叉互联线被盗, 若断开点距离另一侧直接接地点长度较短, 则其金属护套的感应电压仍在安全值以下; 但当单侧接地线被盗的110 kV电缆长度达到20 km左右(220 kV电缆长度达到10 km左右时), 其金属护套的感应电压幅值将超过国标规定值300 V; 当某段金属护套“悬浮”, 即该段电缆两侧的直接接地线或交叉互联线均被盗时, 其感应电压将上升到非常危险的数值, 达到数十千伏。

关键词

输电电缆, ATP-EMTP仿真, 护套感应电压, 接地系统

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

国内 110 kV、220 kV 单芯电缆的金属护套一般采用交叉互联双端接地或单端接地的运行方式。正常情况下电缆金属护套对地感应电压仅为几十伏, 但当高压电缆交叉互联线被破坏而外护套完全失去接地之后(如图 1 所示), 电缆金属护套上的悬浮电压将会上升至电缆外护套工频耐压容许值之上, 在这种情况下将导致外护套击穿或护套保护器烧毁而形成接地放电, 悬浮电压消失, 但因为无法实现有效良好接地, 在接地点处会有长期的放电存在或经外电极爬电连通到最近的金属支架或固定金具, 长期放电可能导致火灾, 进而会导致电网重大经济损失[1]。



Figure 1. Grounding wire stolen picture

图 1. 接地线被盗图片

近几年,英特尔、京东方、中电熊猫等高精尖企业陆续入住蓉城,以上企业对电源质量要求极高,一旦发生电缆故障,可能导致电压波动甚至生产设备停电,造成巨大经济损失,同时也对供电公司造成不良影响[2]。

本文针对 110 kV、220 kV 电缆系统接地线、交叉互联线、接地箱、交叉互联箱被破坏事件,通过调研,分析不同电缆接线的结构特点及运行状况、故障案例,根据实际电缆运行方式、敷设方式、电缆自身结构特点、电缆金属护套等因素,基于 ATP 电磁暂态分析软件平台,通过控制参数变量仿真分析计算不同接地线故障情况下电缆金属护套可能出现的悬浮电位值,研究分析各因素对计算值的影响,进一步分析不同接地线故障下可能存在的安全隐患。

2. 仿真模型的建立

2.1. 理论分析与建模方法

对于长距离的输电电缆线路,通过保护器接地一端的金属护套上会感应出一个很大的对地电压,因此单端接地方式多用于中低压电缆的短距离输电。目前,输电电缆广泛采用交叉互联接地方式,即将 3 段电缆线路的三相单芯电缆金属护套之间经同轴电缆、交叉互联箱进行交叉换位连接,同时尽量满足电缆三相等间距、3 段等段长的排列方式。在理想排列情况下,由于三相电缆护套上的感应电压相位相差 120° 且大小近似相等,通过三相电缆护套的串联即可使 3 段的感应电压相互中和,从而抑制高压电缆金属护套上的感应电压。交叉互联接地方式可以有效地减小和抑制金属护套上的感应电压(特别是对于长距离高压电缆输电线路),进而将接地电流控制在某一范围之内[3][4]。

以成都供电公司为例,其辖区的输电电缆多数采用隧道敷设的方式,电缆线路长度约 1~15 km 不等,包含一个或多个电缆单元,且每个单元包括三个分段。每段电缆单元长度约 400~600 m 不等,段与段之间进行交叉换位,并经保护器间接接地;每经过两次交叉换位后直接接地一次,从而构成一个电缆单元。

本章以 110 kV 输电电缆线路接地线被破坏情况为例介绍仿真模型建立过程。首先,根据线路中电缆敷设路径的等效分段情况,调研每段电缆敷设类型、各子缆敷设位置信息。接下来,根据电缆状态信息建立 ATP-EMTP 仿真模型,如图 2 所示,包括设置工频电压源模块、电缆模块及负载模块等,为后续接地线及交叉互联线被盗前后护套感应电压等计算奠定基础。

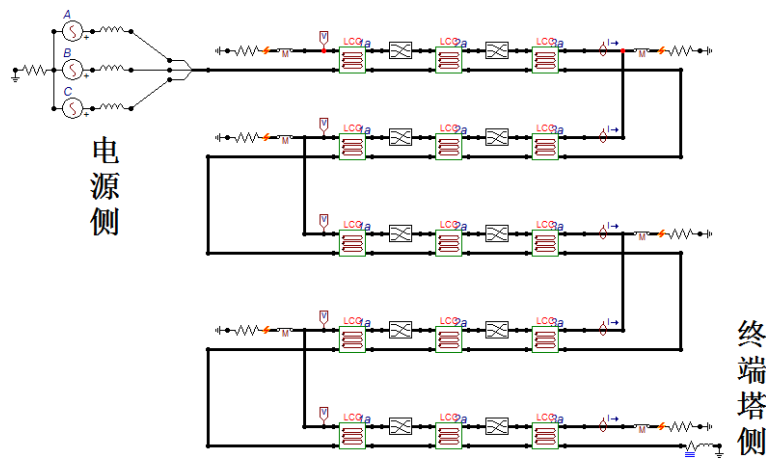


Figure 2. 6 km/110 kV high voltage single core cable ATP-EMTP simulation model

图 2. 6 km/110 kV 高压单芯电缆 ATP-EMTP 仿真模型

2.2. 工频电压源参数设置

工作电压是线路正常工作时加在电缆上的电压,本次计算直接选用 ATP-EMTP 的交流电压源模型。

由于本工程为 110 kV 系统，因此该三相交流电压源的相压峰值均设置为 $110 * \sqrt{2} * 1.05 / \sqrt{3} = 94.305$ kV，内自感设置为 $L = 12.5$ mH，具体参数设置见图 3 所示。三相电源尾端经星形连接后中性点直接接地，接地电阻变电站侧设为 0.5 ohm。

Component: ACSOURCE		
Attributes		
DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	94305
Frequency	Hz	50
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	1

(a)

Component: ACSOURCE		
Attributes		
DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	94305
Frequency	Hz	50
PhaseAngleA	degrees	-120
StartA	sec	-1
StopA	sec	1

(b)

Component: ACSOURCE		
Attributes		
DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	94305
Frequency	Hz	50
PhaseAngleA	degrees	120
StartA	sec	-1
StopA	sec	1

(c)

Figure 3. Power frequency voltage source module setting: (a) Voltage source parameters of phase A; (b) Voltage source parameters of phase B; (c) Voltage source parameters of phase C

图 3. 工频电压源模块设置; (a) A 相电压源参数; (b) B 相电压源参数; (c) C 相电压源参数

2.3. 输电电缆参数设置

利用 ATP-EMTP 中的 LCC 模块可较好地模拟输电电缆。根据电缆敷设的实际情况，将电缆分为三段，用 LCC 模块模拟。需要注意的是，由于模型中省去了连接终端塔及支架时各子电缆之间间距较大的部分，故在模型中的敷设长度都略小于现场的敷设长度[5]。

下面，以图 4 中 1a 号 LCC 模块为例说明 100 kV 输电电缆具体设置过程：首先，设定电缆种类及根数，选择“Single Core Cable”单芯电缆，因模拟 3 根子缆，故电缆数设置为 3，相数为 6 (含子缆护套)；其次，配置电缆环境参数及长度，根据成都地区土壤种类、温湿信息设置土壤电阻率为 30 ohm·m，工作频率 50 Hz，电缆长度 6 km，直接接触环境为空气(无论电缆沟还是排管敷设，电缆都并未直接接触土壤)；最后，设置电缆几何参数及敷设位置，可以输入所选 YJLW03-64/110-1 × 1000 mm²型号电缆的铜芯内、外径，护套内、外径，线缆外径等几何参数，铜芯、护套层的相对磁导率，内、外绝缘层的相对介电常数等电磁参数，以及每根线缆敷设的距地深度、相对间距等排布参数完成电缆建模，具体设置见图 4，敷设预览见图 5。另将原电缆所设两根回流缆直接并联使用，在模型中简化为单根回流缆，其中铜芯线径增大一倍，空间位置为原两根几何中心处[6]。

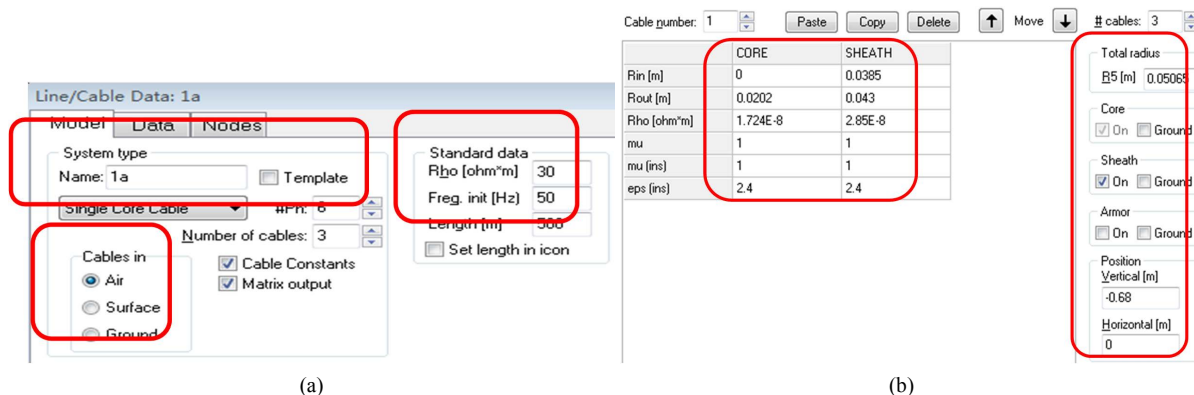


Figure 4. Dual cable module setting: (a) Cable simulation basic setting; (b) Configuration and location parameters of each sub-cable

图 4. 双拼电缆模块设置; (a) 电缆仿真基本设置; (b) 各子电缆结构及位置参数设置

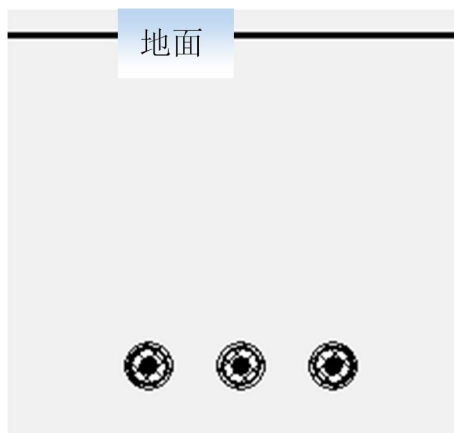


Figure 5. LCC module laying Preview Diagram

图 5. LCC 模块敷设预览图

电缆护套接地方式为一端三相护套经星型连接后直接接地，另一端三相分别经保护器后星形连接接地。但由于稳态运行时未接地端感应电压不致过高，保护器不会动作，故应按断路处理，故稳态模型中将其忽略。回流缆接地方式为双端直接接地，变电站侧接地电阻设为 0.5 ohm，终端塔一侧的接地电阻设为 1 ohm。

2.4. 负载参数设置

所选型号电缆在隧道中敷设时，其最大允许载流量为 1690A (有效值)。根据实际运行工况，通过设置负载参数使各子缆稳态载流量为最大允许量的 50%~80%，模拟重载情况。通过理论计算及仿真调试，确定设置为三相平衡弱感性负载，参数均为 $R = 40.5 \text{ ohm}$ ， $L = 37.5 \text{ mH}$ 。

3. 金属护套感应电压仿真计算

3.1. 正常情况下金属护套感应电压

正常情况下，由于采取了双端直接接地和金属护套交叉互联等措施，金属护套的感应电压较低，通过 ATP-EMTP 软件计算正常情况下电缆金属护套的感应电压，典型 A、B、C 三相金属护套感应电压波形如图 6 所示。由图可知，护套感应电压最大值为 66.280 V，满足安全要求。

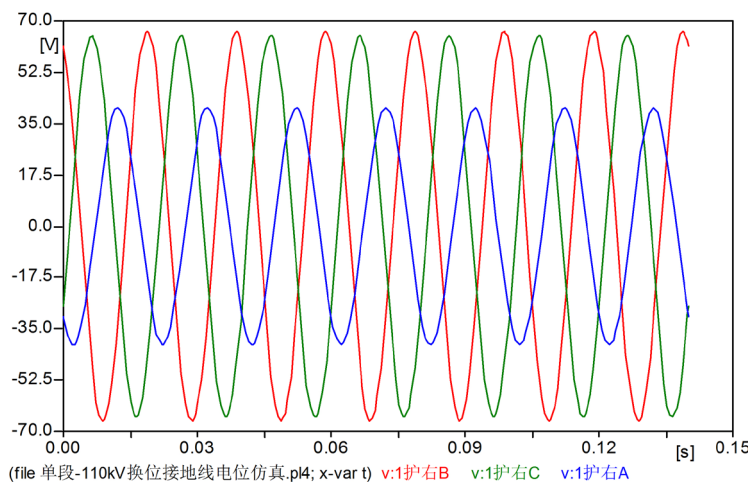


Figure 6. Inductive voltage waveform of metal sheath layer under normal condition

图 6. 正常情况下金属护套感应电压波形

3.2. 直接接地线被盗情况下金属护套感应电压

输电电缆一般采用双端接地运行模式，因此，直接接地线被盗的情况分为两种：一端接地线被盗与两端接地线同时被盗。

对于第一种情况，一端接地线被盗后，电缆改变为单端接地运行模式，而这也是为了避免环流较大、损耗过多而经常采用的正常运行模式，该情况下的电缆金属护套感应电压波形如图 7 所示，金属护套感应电压最大值为 68.38 V，与正常情况相比略有上升，但仍满足正常运行要求。

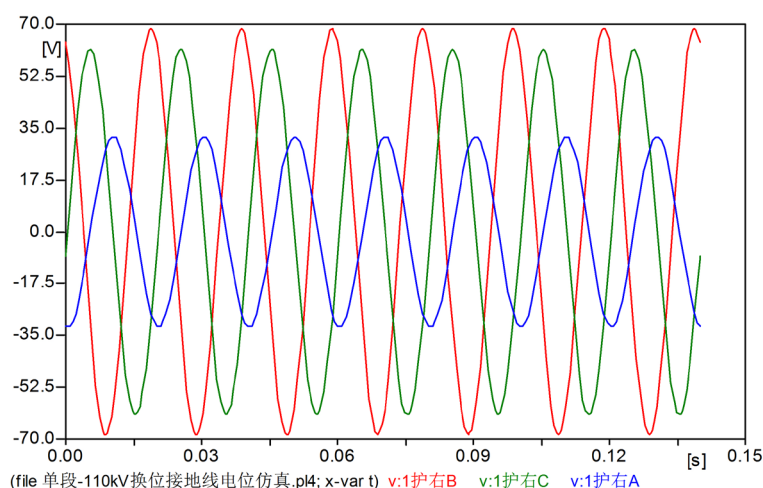


Figure 7. Inductive voltage waveform of metal sheath layer under condition of single side direct grounding wire stolen

图 7. 一端接地线被盗情况下金属护套感应电压

对于第二种情况，两端接地线均被盗后，整回电缆的金属护套相当于“悬浮”运行，仿真发现，此时金属护套全线的电位基本相同，为 1.10 kV，该等级的悬浮电压将威胁电网的人身设备安全。

3.3. 交叉互联线被盗情况下金属护套感应电压

在长度较大时，高压单芯电缆的金属屏蔽层均会采取交叉互联的方法使得电缆芯线电流对屏蔽层的感应电流相互抵消。与直接接地不同的是，金属屏蔽层完成交叉互联后经保护器间接接地。正常情况下，保护器是断路的，因此，交叉互联线是不接地的。当交叉互联线被盗后，随着长度的增加，金属屏蔽层上的感应电压将逐步抬升，最终有可能造成危险的后果。

根据建立的模型可知，每个电缆单元内有两组交叉互联线，分别被盗时，两者的情况类似。当单侧交叉互联线被盗后，通过 ATP-EMTP 软件计算的电缆金属护套感应电压分布结果如图 8 所示，最大值为 68.75 V。

此种情况下，虽然交叉互联线被盗，但是金属护套断开点距直接接地点的长度仍然较短，感应电压并未上升至危险值。但是此种情况仍应尽快修复，因为如果此时另一侧的交叉互联线也被盗或出现故障时，两组交叉互联线中间部分的金属屏蔽层将完全悬浮运行，其感应电压如图 9 所示。

由仿真结果可知，此种情况下，两组交叉互联线中间部分的金属护套在交叉互联线均被盗后达到了非常危险的 91.449 kV，如不及时修复，将对电缆运行及人员造成巨大威胁。

3.4. 直接与交叉互联线均被盗情况下金属护套感应电压

在实际运行中，也经常出现直接接地线与交叉互联线两者均被盗的情况，具体情况分为金属护套“悬浮”

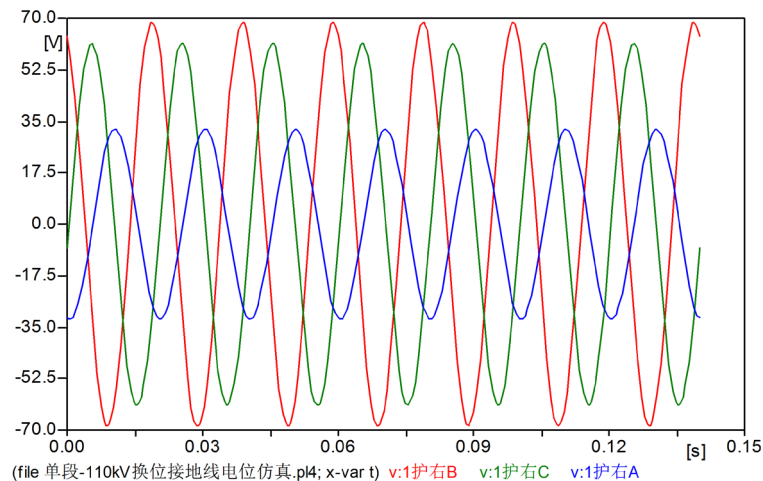


Figure 8. Inductive voltage waveform of metal sheath layer under condition of single side cross-connected grounding wire stolen

图 8. 单侧交叉互连带地线被盗情况下金属护套感应电压

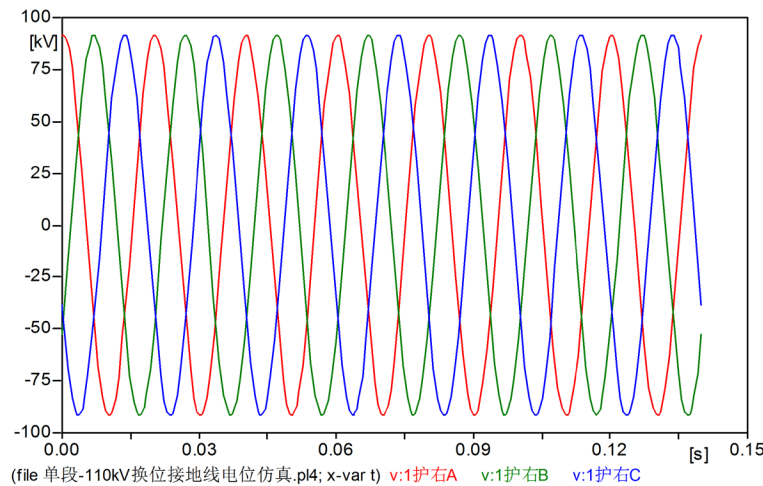


Figure 9. Inductive voltage waveform of metal sheath layer under condition of both side cross-connected grounding wire stolen

图 9. 两组交叉互连带均被盗后电缆金属护套感应电压波形

与“不悬浮”两种情况。

1) 当某段金属护套“不悬浮”时

该情况下，金属护套的感应电压随断开点到最近直接接地点距离的增大而增大。考虑最严重情况，即交叉互连线在最左侧断开，除整条线路两端外，其余直接接地点均被盗，此时金属护套的感应电压波形如图 10 所示。

可以看出随着断开点到最近直接接地点距离的不断增大，金属护套上的感应电压也在不断上升，如图所示。当电缆长度达到 12 km 时，金属护套的感应电压幅值达到 204.65 V；当电缆长度达到 21 km 时(对于 220 kV 电缆，则为 10 km 左右)，金属护套的感应电压幅值达到 323.41 V，此时，已经超过了国标要求。

2) 当某段金属护套“悬浮”时

当某段金属护套“悬浮”时，由于没有直接接地点可以释放感应电荷，其感应电压将上升到非常危险的数值，达到数十千伏，具体数值参考 3.3 节的仿真结果。

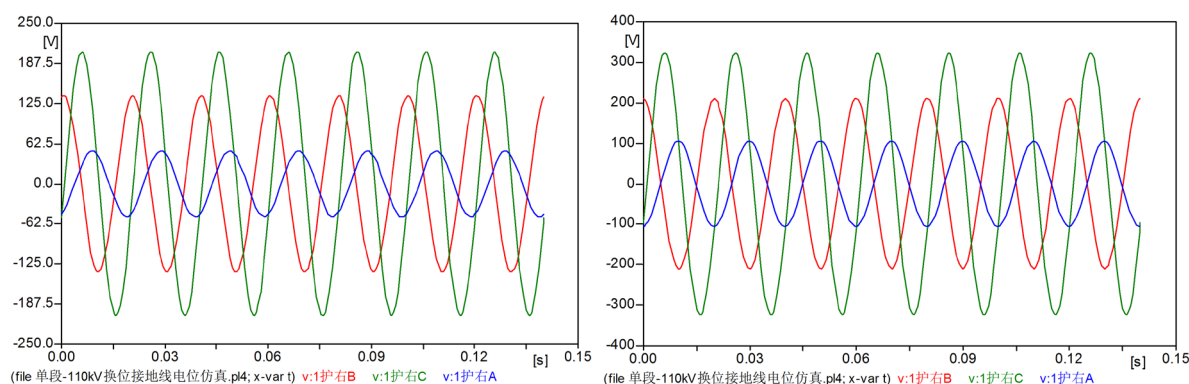


Figure 10. Inductive voltage waveform of metal sheath layer of “non-suspended” cable

图 10. 不同长度电缆的金属护套感应电压波形(金属护套“不悬浮”)

3.5. 仿真结果分析

由仿真结果可知,当某段电缆仅仅一侧的直接接地线或交叉互联线被盗,当断开点距离另一侧直接接地点长度较小时,其金属护套上的感应电压仍在安全值以下,但当 110 kV 电缆长度达到 20 km 左右时,金属护套的感应电压幅值仍将超过国标规定值 300 V。当某段电缆仅两端直接接地线被盗时,其金属护套层感应电压会上升至 1.1 kV。当某段金属护套“悬浮”,即该段电缆两侧的直接接地线或交叉互联线均被盗时,其感应电压将上升到非常危险的数值,达到数十千伏。不同被盗类型下金属护套感应电压最大幅值如表 1 所示。

Table 1. Induction voltage amplitude of metal sheath under different steal types

表 1. 不同被盗类型下金属护套感应电压幅值

被盗种类	无	单端直接接电线	两端直接接地线	单组交叉互联线	两组交叉互联线	直接接地线及交叉互联线
感应电压最大值/V	66.28	68.376	11072	68.478	91499	数十千伏
位置	1 右	1 右/2 左	所有点	2 左/2 右	2 左/2 右	悬浮点

4. 结论

1) 本文针对高压电缆金属护套感应电压进行了理论分析,建立了高压电缆电磁暂态仿真模型,并基于此模型进行了不同接地线被盗情况下的电缆金属护套感应电压计算。

2) 根据所建立的模型与仿真结果可知,当某段电缆仅仅一侧的直接接地线或交叉互联线被盗,在断开点距离另一侧直接接地点长度不是太大时,其金属护套上的感应电压仍在安全值以下。当 110 kV 电缆长度达到 20 km 左右,220 kV 电缆长度达到 10 km 左右时,金属护套的感应电压幅值将超过国标规定的 300 V。

3) 当某段金属护套“悬浮”时,即该段电缆两侧的直接接地线或交叉互联线均被盗,其感应电压将上升到非常危险的数值,达到数十千伏。一旦出现这种情况,需要立刻对该段电缆接地系统进行紧急修复。

参考文献

- [1] 王尉军, 杨远. 高压电缆金属护套接地系统被盗的危害及对策[J]. 贵州电力技术, 2016, 19(11): 53-56.
- [2] 朱双. 接地装置被盗引起的高压电缆故障分析[J]. 黑龙江科技信息, 2016(29): 109.

-
- [3] 丛光, 韩晓鹏, 周作春, 张文新, 李华春, 陈平. 高压单芯电缆接地系统破坏后的悬浮电压分析[J]. 供用电, 2009, 26(5): 61-64.
- [4] 刘伟光. 110 kV 电缆中间接头故障与交叉互联同轴电缆被盗的分析与对策[J]. 建材与装饰, 2017(38): 208-209.
- [5] 陈根, 唐焱, 王新桥. 基于 ATP 的高压电缆金属护套多点接地故障仿真[J]. 高压电器, 2014(4): 49-53 + 60.
- [6] 王亚楠, 丁卫东, 苟杨, 夏健, 闫家启, 王嘉琛, 李志兵. 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)接地问题探讨[J]. 高压电器, 2016(4): 98-102.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-1565, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: tdet@hanspub.org