

ICS 29.240.01

F 20

备案号: 60035-2017

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 401 — 2017

代替 DL/T 401 — 2002

高压电缆选用导则

Guide to the selection of high-voltage cables

2017-08-02 发布

2017-12-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 使用条件.....	2
5 电缆绝缘水平选择.....	5
6 电缆绝缘种类、导体截面和结构的选择.....	6
7 电缆附件的选择.....	7
8 环境因素.....	8
附录 A (资料性附录) 电缆系统监测.....	9
附录 B (资料性附录) 单芯电缆外护套过电压保护方案.....	10



前 言

本标准依据 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准是对 DL/T 401—2002《高压电缆选用导则》的修订，与 DL/T 401—2002 相比，除编辑性修改外，主要技术变化如下：

- 在范围的规定中，修改为“主要用于三相交流系统，额定电压在 1kV 以上的挤包绝缘电缆和电缆附件的选用原则”，不适用于海底电缆和油纸绝缘电缆的选用（见 1）；
- 在术语和定义中，增加了“使用电缆和附件的系统的电压”的定义（见 3.7）；
- 运行条件中，增加了对“屏蔽层互联与接地方式”“是否在强制冷却条件下运行”及“是否需要电缆线路开展监控”的要求（见 4.2）；
- “地下敷设”安装资料中，增加了“历年的环境温度典型值”“用于评估土壤干燥风险性（参见 IEC 60287）的气象资料”及“水分侵入和腐蚀的风险性”的要求（见 4.3.2）；
- 增加了对“水下敷设”安装资料的要求（见 4.3.4）；
- “绝缘种类选择”中删除了油纸绝缘电缆和充油电缆的条文，修改了聚氯乙烯绝缘电缆、乙丙橡胶绝缘电缆和交联聚乙烯电缆的条文（见 6.1）；
- 修改了导体截面选择应考虑的因素（见 6.2）；
- 径向防水层中增加了“平滑铝套”（见 6.3.2）；
- 第 7 章修改为“电缆附件的选择”，增加了“通则”（见 7.1）和“电缆接头的选择”（见 7.3）；
- 增加了环境因素（见第 8 章）；
- 按 GB/T 156—2007 修改了最高电压 U_m （见表 1）；
- 增加了资料性附录“电缆系统监测”（见附录 A）。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电力电缆标准化技术委员会（DL/TC 19）归口。

本标准主要起草单位：中国电力科学研究院有限公司。

本标准参加起草单位：中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、国网湖南省电力有限公司电力科学研究院、广州电力设计院、国网江苏省电力有限公司、普睿司曼电缆（上海）有限公司、深圳市沃尔核材股份有限公司、长缆电工科技股份有限公司。

本标准主要起草人：饶文彬、刘松华、杨建军、黄福勇、冯宾、欧阳本红、李鸿洋、王瑛、胡平、薛奇。

本标准发布后代替 DL/T 401—2002。

本标准历次发布版本为：

- DL 401—1991；
- DL/T 401—2002。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

高压电缆选用导则

1 范围

本标准规定了高压电缆和附件的选用原则、所必须的资料及应考虑的环境因素。

本标准适用于主要用于三相交流系统，额定电压在 1kV 以上的挤包绝缘电缆和电缆附件。

本标准不适用于海底电缆和油纸绝缘电缆。如果需要选用挤包绝缘电缆与已有的油纸绝缘电缆相连时，应对电缆附件和运行特性加以考虑。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 311.1—2012 绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则

GB/T 2952—2008 电缆外护层

GB/T 3956 电缆的导体

GB/T 11017 额定电压 110kV ($U_m=126kV$) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件

GB/T 12706 额定电压 1kV ($U_m=1.2kV$) 到 35kV ($U_m=40.5kV$) 挤包绝缘电力电缆及附件

GB/T 18890 额定电压 220kV ($U_m=252kV$) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件

GB/T 22078 额定电压 500kV ($U_m=550kV$) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件

GB/T 22381 额定电压 72.5kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备与充流体及挤包绝缘电力电缆的连接 充流体及试式电缆终端

GB/T 24001 环境管理体系 要求及使用指南

GB/T 26218.1—2010 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第 1 部分：定义、信息和一般原则

GB 50217 电力工程电缆设计规范

IEC 60287 电力电缆——载流量计算 (Electric cables—Calculation of the current rating)

IEC 60853 电缆周期性和事故电流定额的计算 (Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电缆系统 cable system

由电缆和安装在电缆上的附件所构成的系统。

3.2

额定电压 rated voltage U_0

设计时采用的电缆或附件的每一导体与屏蔽层或金属套之间的额定工频电压有效值。

3.3

额定线电压 rated voltage between conductors U

设计时采用的电缆或附件的不同相导体之间的额定工频电压有效值。



- 3.4 **最高电压 highest system voltage U_m**
设计时采用的电缆或附件的不同相导体之间的运行时最高工频电压有效值。
注： U_m 为在正常运行条件下在系统的任何时间和任何点上出现的电压的最高值，但不包括由于事故和突然负载所造成的暂态电压升高。
- 3.5 **雷电冲击绝缘水平 peak lightning impulse voltage U_{pl}**
设计时采用的电缆或附件的每一导体与屏蔽层或金属套之间的雷电冲击耐受电压的峰值。
- 3.6 **操作冲击绝缘水平 peak switching impulse voltage U_{ps}**
设计时采用的电缆或附件的每一导体与屏蔽层或金属套之间的操作冲击耐受电压的峰值。
- 3.7 **使用电缆和附件的系统的电压 voltages pertaining to the system on which cables and accessories are to be used**
3.7.1 **系统标称电压 nominal voltage of system**
用于表示或识别系统的合适而近似的电压值。
【GB 311.1—2012，定义 4.8】
- 3.7.2 **三相系统最高电压 highest voltage of three-phase system**
在正常运行条件下，系统中任一点在任一时刻所出现的相间最高运行电压的有效值。
【GB 311.1—2012，定义 4.9】
注：不包括暂态电压变化（如由于系统开关操作所引起）和系统在不正常运行条件下（如由于事故和突然负载引起）的暂态电压波动。
- 3.7.3 **雷电过电压 lightning overvoltage**
由于雷电放电或其他原因导致在系统的给定位置上发生的相对地或相对过电压，考虑绝缘配合时，可将其波形视为标准冲击波。
注：波形可参照 GB 311.1—2012 表 1 中的雷电冲击试验波形。
- 3.7.4 **操作过电压 switching overvoltage**
由于系统中的开关动作导致在系统的给定位置上发生的相对地或相对过电压。考虑绝缘配合时，可将其波形视为标准冲击波。
注：波形可参照 GB 311.1—2012 表 1 中的操作冲击试验波形。
- 4 **使用条件**
- 4.1 **总则**
为了确定某一特定工程所选用电缆是否合适，需要以下使用条件方面的资料，并应参阅使用条件的
的相关标准。
- 4.2 **运行条件**
包括以下运行条件：

- a) 系统标称电压。
b) 三相系统的最高电压。
c) 对于额定电压 110kV 及以上的高压系统（见表 1），除考虑雷电过电压外，还应考虑系统操作过电压。
d) 系统频率。
e) 系统的接地方式，以及当中性点非有效接地时，接地故障的最长允许持续时间和每年总的故障时间。
f) 屏蔽层互联与接地方式。
与屏蔽层多点直接接地相比，特殊互联方式（单点直接接地或交叉互联）可显著降低金属屏蔽层中的损耗（见 IEC 60287-1-1:2006），通常用于需要高输电容量的系统。特殊互联需要护层电压限制器等专用设备（以防止瞬态过电压破坏电缆护套和附件）或回流线。
g) 如果使用了终端，应给出环境条件，例如：
——超过 1000m 时的海拔；
——终端所处位置在户外或户内；
——预计是否有严重的大气污染（参照标准为 GB/T 26218.1—2010）；
——在 SF₆ 开关、变压器或金属封闭设备中敷设，具有特定朝向（参照标准为 GB/T 22381—2008）；
——电缆与变压器、断路器、电动机等设备连接时所采用的绝缘和设计的安全净距，例如应规定安全净距和周围的绝缘。
h) **最大额定电流**：
——持续运行时；
——周期运行时；
——事故紧急运行或超过额定负荷运行时，电缆应不超过允许的最高温度。
确定导体规格时，若考虑周期运行、紧急运行或过负荷运行条件，应提供负荷曲线。
i) 相向或相对地短路时预期流过的对称和非对称短路电流。
j) 短路电流最大持续时间。
k) 电缆线路压降。
l) 是否在强制冷却条件下运行。
m) 是否需要要对电缆线路开展监控（参照附录 A）。

表 1 电缆的额定电压 U_0/U 和 U_m 及冲击绝缘水平

额定电压 U_0	额定电压 U	最高电压 U_m	雷电冲击绝缘水平 U_{pl}	操作冲击绝缘水平 U_{ps}	kV
1.8/3	3	3.6	40	—	—
3.6/6	6	7.2	60	—	—
6	10	12	75	—	—
8.7/12	10	12	95	—	—
12	15	17.5	95	—	—
18	20	24	125	—	—
21	20	24	170	—	—
26	35	40.5	200	—	—
	35	40.5	250	—	—

表 1 (续)

额定电压 U_0	额定线电压 U	最高电压 U_m	雷电冲击绝缘水平 U_{50}	操作冲击绝缘水平 U_{50}
50	66	72.5	450	—
64	110	126	550	—
127	220	252	1050	—
190	330	363	1175	950
290	500	550	1550	1175

4.3 安装资料

4.3.1 一般资料

- 电缆线路的长度和横断面图。
- 敷设排列方式的详细资料(如平行或三角形排列)以及金属套接地的方式。
- 特殊敷设条件,如敷设在水中。

4.3.2 地下敷设

- 历年的环境温度典型值(参见 IEC 60287-3-1)。
- 安装条件的详细情况(如直埋、排管敷设、机械敷设等),用以确定金属套或护套的组成、铠装(如需要时)的型式和外护套的型式,如防腐、阻燃或防白蚁等。
- 埋设深度。
- 沿电缆线路的土壤种类(如沙土、黏土、回填土或特殊的回填材料)及其电阻系数,且需说明上述资料是实测还是假设定值,用于评估土壤干燥风险性(参见 IEC 60287)的气象资料。
- 在埋设深度上土壤的最高、最低和最热月平均地温。
- 附近带电的其他电缆(特别是有多少回平行线路时)或其他热源的情况。
- 电缆沟、排管或管线的长度,若有工井则包括工井之间的距离。
- 排管沟的详细资料,如有时,应包括排管或管线的数量、内径、数目超过一根时的间距、材料。
- 水分侵入和腐蚀的风险性(应选择合适的电缆设计)。

4.3.3 空气中敷设

- 所设定的最低、最高温度和最热月日最高温度平均值。
- 敷设方式(例如,直接敷设在墙上、支架上、孔洞中、槽盒中或可能充水等;单根或成组电缆;隧道、排管、竖井的尺寸等)。
- 敷设于户内、隧道或排管中的电缆的通风情况。
- 阳光是否直接照射在电缆上。
- 特殊条件,如火灾、有毒气体的风险性。

4.3.4 水下敷设

- 水深和水流资料。
- 安装和敷设技术。
- 运行过程中遭受捕鱼设备、挖沙设备、浮冰、摩擦等造成机械破坏的风险性(是否需要铠装、

加固和挖沟)。

- 登陆时固定、保护和敷设电缆的方式(卡箍、挖沟、套管、需要铠装等)。
- 水分侵入和腐蚀的风险性(应选择合理的电缆设计)。

5 电缆绝缘水平选择

5.1 引言

特定工程中,电缆的额定电压应与电缆所在电力系统运行条件相匹配。为方便电缆的选用,根据电力系统在接地故障条件下能够运行的时间,可将电力系统划分为三类。

5.2 电力系统种类

具体分类如下:

— A 类:

接地故障能尽可能快地被切除,但在任何情况下不超过 1min 的电力系统。

— B 类:

该类仅指在单相接地故障下能短时运行的电力系统。一般情况下,带故障运行时间不超过 1h,但是,如果有关电缆产品标准有规定时,则允许运行更长时间。

— C 类:

该类包括不属于 A 类或 B 类的所有电力系统。

为了使本标准的推荐适用于各种型式电缆,还应参照第 2 章所列有关电缆产品标准,如 GB/T 11017、GB/T 12706、GB/T 18890、GB/T 22078。

5.3 U 的选择

U 值应按等压级大于 3.7.1 中定义的系统标称电压选择。

5.4 U_m 的选择

U_m 值应按等压级大于 3.7.2 中定义的三相系统最高电压选择。

5.5 U_0 的选择

U_0 值应等于或大于从 GB 311.1—2012 中按线路绝缘水平、系统保护水平、架空线路及电缆线路的波阻抗、电缆长度及雷击点与终端的距离等所选定的雷电冲击耐受电压以及(如有时)操作冲击耐受电压。

5.6 外护套绝缘水平选择

对于采用金属套一端单点直接接地或三相金属套交叉互联接地的高压单芯电缆,当电缆线路所在系统发生短路故障或遭受雷电冲击和操作冲击电压作用时,在金属套的不接地端或交叉互联处会出现过电压,可能会使外护套绝缘发生击穿。为此需要装设保护层电压限制器,此时作用在外护套上的电压主要取决于保护层电压限制器的残压。外护套的雷电冲击耐受电压按表 2 选择。必要时可参照附录 B 进行验算。

表 2 电缆外护套雷电冲击耐受电压值

KV	
雷电冲击耐受电压	雷电冲击耐受电压
380—750	37.5
1050	47.5

表 2 (续)

雷电冲击耐受电压	雷电冲击耐受电压
1175~1425	62.5
1550	72.5

6 电缆绝缘种类、导体截面和结构的选择

6.1 绝缘种类选择

6.1.1 聚氯乙烯绝缘电缆的工作温度低,特别是允许短路温度低,因此载流量小,不经济,稍有超载或短路则绝缘易变形,不应选用。

6.1.2 乙丙橡胶绝缘(Ethylene-Propylene Rubber, EPR)电缆的柔软性好,耐水,不会产生水树枝,耐紫外线,阻燃性好,低烟无毒,但其价格昂贵,故在水底敷设或在核电站中使用时可考虑选用。

6.1.3 交联聚乙烯(XLPE)电缆电气性能和机械性能优良,施工简便。对绝缘较厚的电力电缆,不宜选用辐照交联而应选用化学交联生产的交联电缆。10kV及以上电力电缆应采用干法化学交联生产工艺。为了尽可能减小绝缘偏心的程度,对110kV及以上电压等级,一般宜选用在立塔(VCV)生产线或其他先进、保证绝缘偏心度好的生产线生产的交联电缆。

6.2 导体截面选择

导体截面应从有关的电缆产品标准中列出的标称截面中选取。如果所选的某种型式的电缆没有产品标准,则导体截面应从GB/T 3956中第2种导体的标称截面中选取。

在选择导体截面时应考虑下列因素:

a) 在正常运行和短路条件下电缆的最高允许温度[参见4.2中h)]。

注:IEC 60287和IEC 60853系列标准中规定了不同负载条件下载流量的详细计算方法。

b) 在电缆敷设、安装和运行过程中受到的机械负荷。

c) 绝缘表面的电场强度(特别是附件)。采用小截面电缆时由于导体直径小或绝缘较薄可能导致绝缘中产生不允许的高电场强度。

d) 综合考虑电缆线路的初始投资成本和寿命周期内的电能损耗成本的经济最优化。

e) 对于高输电容量线路的大截面电缆($S > 800\text{mm}^2$),应考虑趋肤效应和邻近效应的影响,应采用分割导体结构。此外,应采取适宜的方法测量交流电阻以核实计算值。

6.3 金属屏蔽层截面的选择

6.3.1 对于无金属套的挤包绝缘的金属屏蔽层,当导体截面为 240mm^2 及以下时可选用铜带屏蔽,但当导体截面大于 240mm^2 时宜选用铜丝屏蔽。金属屏蔽的截面应满足在单相接地故障或不同地点两相同时发生故障时短路容量的要求。

6.3.2 对于有径向防水要求的电缆应采用铅套、平滑铅套、皱纹铝套或皱纹不锈钢套作为径向防水层。其截面应满足单相或三相短路故障时短路容量的要求。如所选电缆的金属套不能满足要求时,应要求制造厂采取增加金属套厚度或在金属套下增加缠绕铜丝的措施。

6.4 交联电缆径向防水层的选择

敷设在干燥场合时可选用综合防水层作为径向防水层;敷设在潮湿场合、地下或水底时应选用金属套径向防水层。对于35kV及以下交联聚乙烯电缆一般不要求有径向防水层,但110kV及以上的交联电缆应具有径向防水层。

6.5 外护套材料的选择

在一般情况下可按正常运行时导体最高工作温度选择外护套材料,当导体最高工作温度为 80°C 时可选用PVC-S1(ST1)型聚氯乙烯外护套。导体最高工作温度为 90°C 时,应选用PVC-S2(ST2)聚氯乙烯或PE-S7(ST7)聚乙烯外护套。在特殊环境下如有需要可选用对人体和环境无害的防白蚁、鼠啃和真菌侵蚀的特种外护套。电缆敷设在有火灾危险场所时应选用防火阻燃外护套。在潮湿、含化学腐蚀环境或易受水浸泡的电缆应选用聚乙烯外护套。

6.6 电缆的使用环境

6.6.1 为了正确选择电缆的金属套和外护套,除上述6.4和6.5外,还要考虑电缆的使用环境。电缆的使用环境主要由金属套和外护套的性能决定,因此应符合GB 2952.2—2008中表1的规定。

6.6.2 以下金属护套电缆除适用于一般场所外,特别适用于下列场合:

- 铅套电缆。腐蚀较严重但无硝酸、醋酸、有机质(如泥煤)及强碱性腐蚀质,且受机械力(拉力、压力、振动等)不大的场所。
- 铝套电缆。腐蚀不严重和要求承受一定机械力的场所(如直接与变压器连接,敷设在桥梁上、桥墩附近和竖井中等)。
- 不锈钢套电缆。腐蚀较严重或要求承受机械力的能力比铝套更强的场所。

6.6.3 外护套适用的场所如下:

- 02型(PVC-S1和PVC-S2型聚氯乙烯)外护套主要适用于有一般防火要求和对外护套有一定绝缘要求的电缆线路。
- 03型(PE-S7型聚乙烯)外护套主要适用于对外护套绝缘要求较高直埋敷设的电缆线路。

7 电缆附件的选择

7.1 通则

电缆附件的设计取决于要求的工频和冲击耐受电压(可能与电缆的规定值不同)。工频和冲击耐受电压水平应在考虑了第5章和7.2.2后确定。

电缆附件应能耐受正常运行和短路电流条件下所有的机械和电动应力。应特别注意连接金具、线夹和系统应能保持热机械应力。

额定电压26/35kV及以下的电缆附件,其性能应符合GB/T 12706的规定。

额定电压26/35kV以上的电缆附件,其性能应符合GB/T 11017、GB/T 18890和GB/T 22078的规定。

新线路或老线路中更换的电缆接头和终端宜采用预制结构的附件。

高压附件的安装人员应接受系统性、强制性的培训,以获得并巩固必要的安装工艺和安装技能。

7.2 电缆终端的选择

7.2.1 通则

电缆终端的设计取决于大气污染程度(参见GB/T 26218.1)和所处位置的海拔高度。户外终端宜采用瓷套或复合套,室内和人员密集区优先选用硅橡胶复合套。

7.2.2 大气污染

大气污染程度决定了最小爬距以及电缆终端用绝缘套管型式。

7.2.3 海拔

在标准大气条件下能符合冲击耐受电压试验要求的终端均可在不低于 1000m 的任何海拔使用。为了确实在更高海拔处符合使用要求，应适当增加在正常条件下规定的空气净距。电缆终端的外绝缘爬距应按 GB 311.1 进行高海拔修正。

7.3 电缆接头的选择

应由敷设条件、安装时间、机械/电气经济属性和材料的兼容性来确定采用何种类型的电缆接头。在交叉互联系统中，需要考虑电缆设计的特殊性。对重要的线路，宜采用具有自测温功能的接头。

8 环境因素

为确保选用适宜的高压电缆，应从高压电缆系统规划的初始阶段起对环境因素加以考虑，随后在系统和产品生产的前期向设计人员提供明确的要求。

环境因素包括但不限于以下项目：

- 与电力系统所处位置相关的高压系统通用设计准则，例如对邻近区域景观和居民的影响，正常运行状态和故障条件下的安全作业，对大气的危害等；以及故障时可接受的定位和修复时间、安装期间造成的影响；
- 世界性的、区域性的或国内的管制物资的信息，在电缆的部件和组件中应不采用或尽可能少地采用此类物资；
- 避免使用有害的原材料，在生产过程和装配部件中如存在可替代的技术方案或者弃用后依然可以达到电缆的性能要求时，应避免使用有害的原材料（例如铅）。
- 节省材料消耗，在生产过程和系统设计过程中，应避免过大的与电缆运行环境相关的机械尺寸（例如应根据实际的而不是传统的外部风险水平来决定是否需要铠装）。
- 可见的生产信息，生产中所用材料的信息应可见，以便在其全寿命周期后可被进一步回收利用或进行无害化的能源废物处理。
- 选用可重复利用的运输材料，如可回收的电缆盘和附件包装；
- 引入环境管理标准，例如在系统和组件生产需求中参考 GB/T 24001 的要求。

附录 A (资料性附录) 电缆系统监测

对高压电缆线路的监控主要基于两个目的：

- 沿线路监测电缆温度，以优化或最大化线路的输送能力；
- 检测局部放电，以评估电缆系统的绝缘状态。

电缆温度监测可通过位于电缆结构内部（例如金属屏蔽层）的光纤和电缆接头内自测温装置，以运行适宜的软件以读取电缆温度数据的计算机来完成。如需要在电缆结构内部放置温度传感元件，则应在确定电缆类型和技术要求时专门规定对电缆温度传感元件开展温度监测的要求。在电缆实际运行的初期或后期，都可能存在对通过位置式温度传感元件开展温度监测的需求。

局部放电测量技术的监控电缆和电缆系统的状态，从而发现局部的缺陷。对电缆系统开展监控时，应测量其初始局部放电水平作为基准值。后期的局部放电测量值应和初始局部放电水平进行对比，以确认是否有变化。此外，在电缆敷设完毕后测量初始局部放电水平还可以检验安装过程的可靠性。

根据电缆监测的重要性，可考虑在线路中配置温度监测系统、局部放电监测系统，以实现载流量最优化或电缆系统状态调查。



shudianxianlu
公众号：福配电缆

附录 B
(资料性附录)

单芯电缆外护套过电压保护方案

B.1 电缆金属套一端互联接地, 另一端接电压限制器 (方案一)

电缆金属套一端互联接地如图 B.1 所示, 外护套所受电压计算公式见表 B.1。

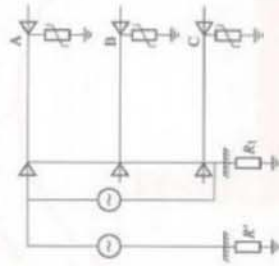


图 B.1 电缆金属套一端互联接线

表 B.1 电缆金属套一端互联接地时外护套所受电压

流经限制器的冲击电流	限制器所受工频电压	外护套所受电压		短路方式	计算公式
		工频	冲击		
$\frac{2U_m}{Z_1 + Z_2}$	U_A	U_A	KU_A	三相短路	$U_A = -I \left[-\frac{1}{2}(X_1 + Z_m - 2Z_0) + j\frac{3}{2}(X_1 - Z_m) \right]$
				A、C两相短路	$U_A = -I(X_1 - Z_m)$
				电缆头地网内短路 A相接地 地网外短路	$U_A = -(I_1 X_1 + I_2 R_1)$

注 1: 由于单相接地电流以大地为回路, 所以金属套两端将感应很高的电压 U_A 。
注 2: 加在外护套和限制器上的电压除金属套两端的感应电压 U_A 外, 还要叠加电网点电压 $I_1 R_1$ 。当流经地网短路电流较大时, 后者可达很高数值。
注 3: 由于三相和两相短路时短路电流不以大地为回路, 其感应电压很低, 故外护套和电压限制器所受工频电压取决于单相接地故障。

B.2 电缆金属套交叉互联, 电压限制器 Y0 接线 (方案二)

电缆金属套交叉互联, 电压限制器 Y0 接线如图 B.2 所示, 外护套所受电压计算公式见表 B.2。

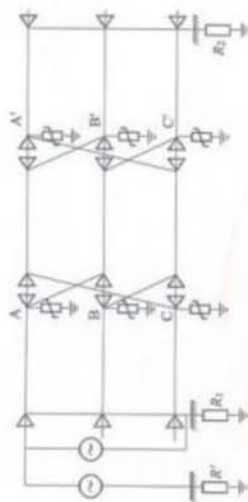


图 B.2 电缆金属套交叉互联, 电压限制器 Y0 接线

表 B.2 电缆金属套交叉互联电压限制器 Y0 接线外护套所受电压

流经限制器的冲击电流	限制器所受工频电压	外护套所受电压		短路方式	计算公式
		工频	冲击		
$\frac{2U_m}{Z_1 + Z_2}$	U_C 或 U'_C	U_C 或 U'_C	KU_C 或 KU'_C	三相短路	$U_C = -I \left[-\frac{1}{2}(X_1 + Z_m - 2Z_0) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(X_1 - Z_m) \right]$
				A、C两相短路	$U_C = -I(X_1 - Z_m)$
				电缆头地网内短路 A相接地	$U_C = -I Z_m + \frac{1}{Z_1 + R_2 + R_3} \times \left[(X_1 + R_2) \left(R_1 + \frac{Z_2}{3} \right) - R_1 \left(R_2 + \frac{2}{3} Z_1 \right) I_1 \right]$ $U'_C = I Z_m + R_2 - \frac{(X_1 + R_2) \left(R_2 + \frac{Z_2}{3} \right)}{Z_1 + R_2 + R_3} I_1$ $R_1 \left(R_2 + \frac{2}{3} Z_1 \right) \times I_1$
$\frac{2U_m}{Z_1 + Z_2}$	U_C 或 U'_C	U_C 或 U'_C	KU_C 或 KU'_C	地网外短路	$U_C = -I Z_m + \frac{1}{Z_1 + R_2 + R_3} \times \left[X_1 \left(R_1 + \frac{Z_2}{3} \right) I - R_1 \left(R_2 + \frac{2}{3} Z_1 \right) I_1 \right]$ $U'_C = -I Z_m - \frac{I X_1 + I_1 R_1}{Z_1 + R_2 + R_3} \left(R_2 + \frac{Z_2}{3} \right)$

注 1: 由于金属套两端电压和地网电压部分抵消, 因此 A 相接地时, C 相外护套和电压限制器所受工频电压要比 A 相高。
注 2: 单相接地时, 外护套和电压限制器所受工频电压和接地电阻 R_1, R_2 以及流经接地电阻的电流有关, 当电流很大时, 工频电压可达很高数值, 一般出现在单相电源网外接地和多电源网内接地的情况, 且首端 (I_1) 和末端 (I_2) 的电压不相等。
注 3: 网内单相电源时, 由于大部分电流将以金属套为回路, 外护套和电压限制器所受电压将大大降低, 此时应以两相接地故障故障。

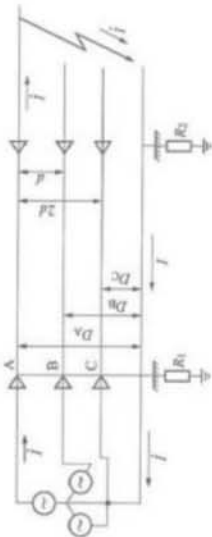
B.3 电缆金属套一端互联接地加回流线 (方案三)

B.3.1 接地电流以回流线为回路

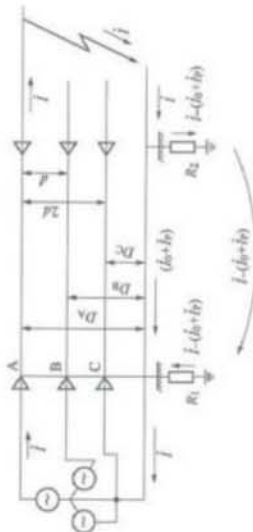
如图 B.3 所示, 金属套一端互联接地的电缆线路, 为了降低金属套电压, 通常在其旁边平行敷设

一根回流线(两端接地)。当系统三相接地发生在回流线接地的电网中时,接地电流的大部分通过回流线,若忽略入地部分的接地电流,此时电缆金属套相对于回流线的感应电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{aA} &= \left(R_p + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D_A^2}{r_p^2} \right) I \\ \dot{U}_{aB} &= \left(R_p + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D_A D_B}{r_p d} \right) I \\ \dot{U}_{aC} &= \left(R_p + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D_A D_C}{r_p 2d} \right) I \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$



(a) 接地电流以回流线为回路



(b) 部分接地电流以大地为回路

图 B.3 电缆金属套一端互联接地加回流线

B.3.2 部分接地电流以大地为回路

各相电缆金属套对回流线的感应电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{aA} &= I Z_{aA} - (I_a + I_p) Z_{aA} \\ \dot{U}_{aB} &= I Z_{aB} - (I_a + I_p) Z_{aB} \\ \dot{U}_{aC} &= I Z_{aC} - (I_a + I_p) Z_{aC} \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

B.4 符号说明

\dot{U}_{aA} 、 \dot{U}_{aB} 、 \dot{U}_{aC} ——分别为 A、B、C 相电缆金属套对回流线的电压, kV;
 I ——总的短路电流, kA;
 I_0 ——本变电站供给的短路电流, kA;

I_0 ——通过回流线直接回归的接地电流, kA;

I_p ——回流线上感应的电压所形成的以大地为回路的循环电流, $I_p = \frac{R_p + R_2 + Z_{aA}}{R_1 + R_2 + Z_{aA}} I - \frac{R_1 + R_2 + Z_{aA}}{R_1 + R_2 + Z_{aA}} I -$

频压值 (有效值);

R_1 、 R_2 ——电缆金属套两端接地电阻, Ω ;

U_m ——沿线路传来的雷波幅值, 等于线路的 50% 放电电压 ($U_{50\%}$);

K ——残工比, K = 电压限制器 10kA 冲击电流下的残压 (幅值) / 电压限制器 2s 工频耐压值 (有效值);

X_s ——电缆金属套的自感电抗, $X_s = j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{r_c}$, Ω ;

Z_{aA} ——A 相和边相金属的互感电抗, $Z_{aA} = j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{d}$, Ω ;

Z_{aB} ——边相和边相金属套的互感电抗, $Z_{aB} = j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{2d}$, Ω ;

Z_{aC} ——交叉互联的三相电缆金属套的等值电抗, $Z_{aC} = R_p + jX_s = R_p + j(X_s + Z_{aA} + Z_{aB})$, Ω ;

R_p ——电缆金属套电阻, Ω ;

Z_1 ——电缆导体对金属套的波阻抗, $Z_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{r_c}{r_1} \right) \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$, Ω ;

Z_1 ——架空线路波阻抗, Ω ;

R_p ——回流线总电阻, Ω ;

Z_{AA} ——A 相电缆金属套和发生接地故障的 A 相的导体之间以大地为回路的互感电抗, $Z_{AA} = R_p + j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{r_c}$, Ω ;

Z_{BA} 、 Z_{CA} ——分别为 B、C 相电缆金属套与接地的 A 相的导体之间以大地为回路的互感电抗, $Z_{BA} = R_p + j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{d}$, $Z_{CA} = R_p + j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{2d}$, Ω ;

Z_{pA} 、 Z_{pB} 、 Z_{pC} ——分别为回流线与 A、B 和 C 相金属套之间以大地为回路的互感电抗, $Z_{pA} = R_p + j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{D_A}$, $Z_{pB} = R_p + j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{D_B}$, $Z_{pC} = R_p + j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{D_C}$, Ω ;

Z_p ——回流线自感电抗, $Z_p = R_p + R_c + j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{r_c}$, Ω ;

R_c ——大地电阻, $R_c = R_c^* l$, 而 $R_c^* = \pi^2 f \times 10^{-7}$, Ω ;

r_c ——电缆金属套半径, mm;

r_1 ——电缆导体半径, mm;

r_p ——回流线等值半径, mm;

l ——电缆护套的长度, m;

d ——电缆间距离, m;

D ——地中等值电流的深度, $D = 660 \sqrt{\rho/f}$ (当 $f = 50\text{Hz}$ 时, $D = 90 \sqrt{\rho}$), m;

DL/T 401—2017

- ρ ——土壤电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;
 D_A 、 D_B 、 D_C ——分别为回流线至 A、B、C 相电缆的间距, m;
 μ ——电缆主绝缘的导磁系数, H/m;
 ϵ ——电缆主绝缘的介电常数, F/m.

