

中华人民共和国行业标准

DL401—91

高压电缆选用导则

中华人民共和国能源部 1991-03-08 批准

1991-08-01 实施

本导则参照采用国际电工委员会 IEC 183—1984 《高压电缆选用导则》。

1 主题内容与适用范围

本导则适用于交流 50Hz、额定电压 1kV 以上供输配电的各种类型电力电缆。本导则就电缆的使用条件、绝缘水平、结构型式、导体截面和终端等附件的选择提供指导。

2 定义

2.1 电缆和附件的电压值

2.1.1 U_0 ——设计时采用的电缆的每一导体与屏蔽或金属护套之间的额定工频电压。

2.1.2 U ——设计时采用的电缆的任何两个导体之间的额定工频电压。

2.1.3 U_m ——设计时采用的电缆的任何两个导体之间的工频最高电压。 U_m 应等于或大于在正常运行状态下电缆所在系统内，在任何时间内能持续在任何一点的工频最高电压，但不包括由于事故和突然甩负荷所造成的暂态电压升高。

2.1.4 U_{p1} ——设计时采用的电缆的每一导体与屏蔽或金属护套之间的雷电冲击耐受电压之峰值。

2.1.5 U_{p2} ——设计时采用的电缆的每一导体与屏蔽或金属护套之间的操作冲击耐受电压之峰值。

电缆的额定电压值列于表 1。

表 1 电缆的额定电压值

kV

| U | U_m | U_0 | |
|-----|-------|-------|--------|
| | | 第 I 类 | 第 II 类 |
| 3 | 3.6 | 1.8 | 3 |
| 6 | 7.2 | 3.6 | 6 |
| 10 | 12 | 6 | 8.7 |
| 15 | 17.5 | 8.7 | 12 |
| 20 | 24 | 12 | 18 |
| 35 | 42 | 21 | 26 |
| 63 | 72.5 | 37 | 48 |
| 110 | 126 | 64 | — |
| 220 | 252 | 127 | — |
| 330 | 363 | 190 | — |
| 500 | 550 | 290 | — |

厂址：湖北省武汉市汉口发展大道 26 号 邮编：430023

网址：www.sy750kv.com

联系电话：027-82667700、83511721 手机：13507122058

2.2 电缆绝缘材料的种类

2.2.1 油浸纸绝缘是用绝缘油对经过干燥的纸进行真空浸渍而成。油浸纸绝缘的绝缘性能主要决定于纸和浸渍剂(绝缘油)的性能以及生产制造工艺。

2.2.2 橡塑材料绝缘

a.热塑性材料。以聚氯乙烯或醋酸乙烯酯共聚物为基材用于额定电压 $U_0/U \leq 1.8/3\text{kV}$ 电缆的绝缘材料(简称PVC/A);以上述材料为基材用于额定电压 $U_0/U > 1.8/3\text{kV}$ 电缆的绝缘材料(简称PVC/B);以热塑性聚乙烯为基材的绝缘材料(简称PE)。

b.弹性材料或热固性材料。以乙丙橡胶或其它类似化合物(EPM 或 EPDM)为基材的绝缘材料(简称EPR);以交联聚乙烯为基材的绝缘材料(简称XLPE)。

3 使用条件

在选用电缆时,应考虑以下使用条件。

3.1 运行条件

3.1.1 系统额定电压。

为发电机出线选用电缆时,应按照我国发电机电压等级 13.8、15.75、8、20kV 选择其额定电压。

3.1.2 系统最高工作电压。

3.1.3 雷电冲击电压。

3.1.4 操作冲击电压。

3.1.5 系统频率。

3.1.6 系统的接地方式。

a.中性点非有效接地(包括中性点不接地和经消弧线圈接地),一次接地故障的最长允许持续时间。

b.中性点有效接地(包括中性点直接接地和经小电阻接地)。

3.1.7 电缆终端的环境条件。

如要求厂商同时提供电缆终端,需提出终端安装地点的海拔高度和大气污秽等级。

3.1.8 最大载流量。

应计及三种情况:持续运行载流量、周期运行(应考虑负荷曲线)载流量、事故紧急运行或过负荷运行时的载流量。

3.1.9 预期的相间或相对地短路时流过的对称和不对称的短路电流。

3.1.10 短路电流最长持续时间。

3.1.11 电缆线路压降。

3.2 敷设条件

3.2.1 一般资料

a.电缆线路的长度、走向、地形和高差;

b.城市规划部门确认的用地批准书和有关地下建筑物的资料及近期城市建筑用地计划;

c.电缆的排列方式和金属护套接地方式;

d.特殊敷设方式(如水下敷设)及个别线路的特殊要求;

e.敷设电缆时的可能最低环境温度。

3.2.2 地下敷设

a.为确定金属护套结构、铠装型式和外护套型式(如防腐、防鼠、防白蚁、防潮等)所需的敷设条件;

b.埋设深度;

c.沿电缆线路敷设的土壤种类(即沙土、粘土、人造回填材料)对其热阻系数,且需说明上述资料是实测值还是假设值;

d.在埋设深度上土壤的最高、最低和平均温度;

e.遇有热源(如热力管道)应尽量避免,若靠近热源或运行中的电缆线路,要附有说明;

f.电缆沟槽、排管或管线的长度以及工井之间的距离;

g.排管或管子的数量、内径和构成材料;

h.排管或管子之间的距离。

3.2.3 空气中敷设

a.最高和最低空气平均温度;

b.敷设方式(即直接敷设于墙上、支架上等;单根或成组;隧道、排管等);

c.对敷设于户内、隧道中或排管中的电缆的通风方式;

d.阳光直接照射在电缆上的情况;

e.特殊条件,如火灾危险以及防火措施。

4 电缆绝缘水平选择

4.1 U_0 类型的选择

正确地选择电缆的 U_0 值是确保电缆长期安全运行的关键之一,应严格按照下列规定选择。

4.1.1 当电缆所在系统中的单相接地故障能很快切除,在任何情况下故障持续时间不超过1min时,可选用第I类的 U_0 (见表1)。

4.1.2 当电缆所在系统中的单相故障持续时间在1min到2h之间,个别情况在2~8h之间时,必须选用第II类的 U_0 (见表1)。

4.1.3 对于110kV及以上电压等级的中性点直接接地系统,单相接地能迅速切除故障时, U_0 按第I类选择(见表1)。

4.2 U 的选择

U 值应按等于或大于电缆所在系统的额定电压选择。

4.3 U_m 的选择

U_m 值应按等于或大于电缆所在系统的最高工作电压选择。

4.4 U_{pl} 的选择

4.4.1 U_{pl} 应根据表2选取,其中220kV及以上电缆线路的 U_{pl} 有两个数值,可根据架空线路的冲击绝缘水平,避雷器的保护特性,架空线路和电缆线路的波阻抗以及雷击点远近等因素通过计算后参照确定。

4.4.2 U_{pl} 的选择和保护电缆线路的避雷器配置,应考虑电缆线路的冲击特性长度。

a.电缆长度等于其冲击特性长度时,电缆线路可不必增加其它保护措施, U_{pl} 与系统基本

绝缘水平相同；

表 2 电缆的雷电冲击耐受电压 kV

| | | | | | | |
|----------------------|-------|-----------|----------------|-------------|--------------|--------------|
| 额定电压 U_0/U | 3.6/6 | 6/6, 6/10 | 8.7/10, 8.7/15 | 12/20 | 21/35 | 26/35 |
| 雷电冲击耐受电压 U_{pl} | 60 | 75 | 95 | 125 | 200 | 250 |
| 额定电压 U_0/U | 37/63 | 48/63 | 64/110 | 127 /220 | 190/330 | 290/500 |
| 雷电冲击耐受电压 U_{pl} | 325 | 450 | 550 | 950 1050 | 1175 1300 | 1550 1675 |

b. 电缆线路长度大于其冲击特性长度时， U_{pl} 可比系统基本绝缘水平略低些，但选择时要极为慎重；

c. 电缆线路长度小于其冲击特性长度时， U_{pl} 应比系统基本绝缘水平高些，或对电缆另加保护措施，例如在电缆线路末端加装避雷器。

电缆线路的冲击特性长度的计算方法以及电缆线路上最大雷电冲击电压与其长度关系曲线，见附录 A。

4.5 U_{p2} 的选择

对于 190/330~290/500kV超高压电缆，应考虑操作冲击绝缘水平， U_{p2} 应与同电压级设备的操作冲击耐受电压相适应。表 3 列出电缆操作冲击耐受电压，供选择使用。

表 3 电缆操作冲击耐受电压值 kV

| U_0/U | 190/330 | 290/500 |
|----------|---------|---------|
| U_{p2} | 850 | 1050 |
| | 950 | 1240 |

4.6 护层绝缘水平选择

对于高压单芯电缆，采用金属护套一端互联接地或三相金属护套交叉换位互联接地。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，在金属护套的不接地端或交叉互联处会出现过电压，可能会使护层绝缘发生击穿。为此需在不接地端装设保护器，此时作用在护层上的电压主要取决于保护器的残压。护层绝缘水平应按表 4 选择，必要时可参照附录 B 进行验算。

表 4 电缆护层绝缘耐受电压值 kV

| 电缆额定电压 U_0/U | 1min 工频耐受 电压 | 雷电冲击耐 受 电压(峰值) | 电缆额定电 压 U_0/U | 1min 工频耐 受 电 | 雷电冲击耐 受 电压(峰值) |
|-------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| | | | | | |

| | | | | | |
|------------------------|----|------|---------|----|------|
| | | | | 压 | |
| 37/63,48/63, 64/110 | 24 | 37.5 | 190/330 | 24 | 62.5 |
| 127/220 | 24 | 47.5 | 290/500 | 24 | 72.5 |

5 电缆类型和导体截面选择

5.1 绝缘类型选择

5.1.1 油纸绝缘电缆具有优良的电气性能，使用历史悠久，一般场合下均可选用。对低中压(35kV 及以下)，如电缆落差较大时，可选用不滴流电缆；63kV、110kV 可选用自容式充油电缆；220kV 及以上优先选用自容式充油电缆。

5.1.2 由于聚乙烯绝缘电缆(PVC)介质损耗大，在较高电压下运行不经济，故只推荐用于 1kV 及以下线路。

5.1.3 对于 6~110kV 交联聚乙烯电缆(XLPE)，因有利于运行维护，通过技术经济比较后，可因地制宜采用；但对 220kV 及以上电压等级的产品，在选用时应慎重。

5.1.4 乙丙橡胶绝缘电缆(EPR)适用于 35kV 及以下的线路。虽价格较高，但耐湿性能好，可用于水底敷设和弯曲半径较小的场合。

5.2 导体截面选择

5.2.1 导体材料可根据技术经济比较选用铜芯或铝芯。

5.2.2 导体截面应根据输送容量从有关电缆结构给出的标准截面中选择，或向厂商提出特殊订货。

5.3 交联聚乙烯电缆金属屏蔽层截面选择

5.3.1 为了使系统在发生单相接地或不同地点两相接地时，故障电流流过金属屏蔽层而不至将其烧损，该屏蔽层最小截面宜满足表 5 要求。

表 5 交联聚乙烯电缆金属屏蔽层最小截面推荐值

| 系统额定电压 U kV | 6~10 | 35 | 63 | 110 | 220 | 330 | 500 |
|--------------------------|------|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 金属屏蔽层截面 mm^2 | 25 | 35 | 50 | 75 | 95 | 120 | 150 |

5.3.2 对于 110kV 及以上单芯交联聚乙烯电缆，为减少流经金属屏蔽层的接地故障电流，可加设接地回流线，该回流线截面应通过热稳定计算确定。

6 电缆终端的选择

6.1 终端额定电压选择

终端的额定电压等级及其绝缘水平，应不低于所连接电缆的额定电压等级及其绝缘水平。

6.2 户外终端的外绝缘选择

户外终端的外绝缘应满足所设置环境条件(如污秽、海拔高度等)的要求，并有一个合适的泄漏比距。

6.3 终端的结构型式选择

终端的结构型式，与电缆所连接的电气设备的特点必须相适应，与充油电缆连接的SF₆组合电器(简称GIS)终端应具有符合要求的接口装置。

6.4 对电缆终端的机械强度的要求

电缆终端的机械强度，应满足使用环境的风力和地震等级的要求，并考虑引线的载荷。

7 高压单芯电缆护层保护器选择

7.1 保护器选择的原则

7.1.1 保护器通过最大冲击电流时的残压乘以 1.4 后，应低于电缆护层绝缘的冲击耐压值(见表 4)。

7.1.2 保护器在最大工频电压作用下，能承受 5s 而不损坏。

7.1.3 保护器应能通过最大冲击电流累计 20 次而不损坏。

7.2 保护器通流容量的确定

7.2.1 在雷电冲击电压作用下，电缆金属护套一端接地另一端接保护器时，该保护器的通流容量可参照表 6 确定。

7.2.2 在操作过电压作用下，保护器通流容量可参照表 7 确定。在操作过电压作用下，流经保护器的电流有两个阶段，即换算到 8/20 μs 波形的 I''_m 和持续 2~3ms 的方波电流 I_c 。保护器应具有释放内过电压能量的通流能力。

7.2.3 比较雷电冲击电压和操作冲击电压作用下，保护器的通流容量 I_m 和 I'_m ，取最大者作为设计值。

7.3 保护器阀片数的确定

7.3.1 保护器阀片片数由护层所承受的工频过电压确定。保护器阀片片数为

表 6 保护器标准冲击电流波的通流容量 I_m

| 系统额定电压 U kV | 8/20 μs | | 20/40 μs | |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 保护器在电缆首 端 | 保护器在电缆末 端 | 保护器在电缆首 端 | 保护器在电缆末 端 |
| 110 | 5.1 | 0.28 | 3.0 | 0.1 |
| 220 | 10.0 | 0.44 | 6.0 | 0.3 |
| 330 | 15.0 | 1.25 | 8.0 | 1.0 |
| 500 | 20.0 | 3.10 | 12.0 | 1.8 |

表 7 电缆在操作波作用下保护器的通流容量 I'_m 和 I_c

| 电缆回路数 | 系统额定电压 U kV | | | | | | | |
|-------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| | 110 | | 220 | | 330 | | 500 | |
| | I'_m kA | I_c A | I'_m kA | I_c A | I'_m kA | I_c A | I'_m kA | I_c A |
| 2 | 6.9 | 1.7 | 8.6 | 3.3 | 9.1 | 5.6 | 10.7 | 23 |

| | | | | | | | | |
|---|------|-----|------|-----|------|------|------|------|
| 3 | 8.9 | 2.3 | 11.3 | 4.5 | 12.0 | 7.6 | 15.5 | 31.3 |
| 4 | 9.9 | 2.7 | 12.6 | 5.5 | 13.4 | 8.7 | 18.0 | 35.5 |
| 5 | 10.5 | 2.9 | 13.4 | 5.7 | 14.3 | 9.3 | 19.6 | 37.7 |
| 6 | 10.9 | 3.0 | 13.9 | 5.8 | 14.9 | 9.7 | 20.4 | 39.7 |
| 7 | 11.1 | 3.2 | 14.3 | 6.0 | 15.3 | 10.0 | 21.6 | 40.8 |

注：只有一回路的电缆，操作过电压值很低，故未列入表内。

$$m = \frac{U_s}{U'} \quad (1)$$

式中 m ——保护器阀片片数；

U_s ——护层工频过电压值，kV；

U' ——一片阀片所能承受的工频电压值(由保护器生产厂家提供)，kV。

7.3.2 应优先采用氧化锌阀片的保护器。

7.4 电缆金属护套与保护器连接的要求

7.4.1 连接导线应尽量短，宜采用同轴电缆。

7.4.2 连接导线截面应满足热稳定要求。

7.4.3 连接导线的绝缘水平与电缆护层绝缘水平相同。

7.4.4 保护器应配有动作记录器。

附录 A

电缆线路冲击特性长度和冲击耐受电压

(参 考 件)

A1 雷电冲击波在电缆线路中的传播

设一电缆线路一端与架空线相连，另一端与变压器相连，如图A1所示。当雷电冲击波在电缆线路中传播时，沿电缆长度方向各点电压值并不相等。由于架空线的波阻抗比电缆大得多，考虑B点的反射波，最高电压总是发生在电缆末端B点。如进入电缆的波为单指数衰减波，当电缆长度不大，且雷击点离电缆较远时，沿电缆脉冲波幅值的衰减可以忽略不计，

且只考虑电缆连接点的反射，B点的电压 $U_B(t)$ 为

$$\begin{aligned}
 U_B(t) &= U_{im} \exp\left[-a\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right] \left\{ a_{12}a_{23} + a_{12}a_{23}\beta_{12}\beta_{32} \exp(a-c) \right. \\
 &\quad \left. + a_{12}a_{23}\beta_{12}^2\beta_{32}^2 \exp(2a\tau) + \dots + a_{12}a_{23}\beta_{12}^{n-1}\beta_{32}^{n-1} \exp(n-1)a\tau \right\} \\
 &= U_{im}a_{12}a_{23} \left\{ \frac{1 - [\beta_{12}\beta_{32} \exp(a\tau)]^n}{1 - \beta_{12}\beta_{32} \exp(a\tau)} \right\} \exp\left[-a\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right] \quad (A1)
 \end{aligned}$$

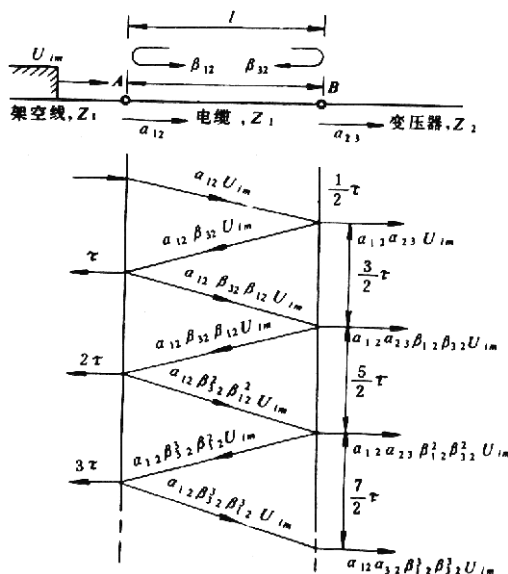


图 A1 雷电冲击波在电缆线路中的传播和折反射现象

$$\alpha_{12} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_l}$$

$$\alpha_{23} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_l}$$

$$\beta_{12} = \frac{Z_1 - Z_l}{Z_1 + Z_l}$$

$$\beta_{32} = \frac{Z_2 - Z_l}{Z_2 - Z_l}$$

$$\tau = \frac{2l}{v}$$

上五式中： $U_B(t)$ ——图A1 中B点的电压，kV；

U_{im} ——雷电冲击波 $u = U_{im} e^{-a\left(t-\frac{x}{v}\right)}$ 的幅值，kV；

t ——时间， μs ；

α_{12} ， α_{23} ——电缆线路两端的折射系数；

β_{12} ， β_{32} ——电缆线路两端的反射系数；

Z_1 ——架空线路波阻抗， Ω ；

Z_2 ——变压器波阻抗， Ω ；

- Z_1 ——电缆线路波阻抗, Ω ;
- τ ——冲击波沿电缆线路长度往返一次所需时间, μs ;
- l ——电缆线路长度, m ;
- v ——冲击波沿电缆线芯的传播速度, $m/\mu s$;
- a ——冲击波陡度, $kV/\mu s$;
- n ——折反射次数;
- x ——冲击波沿电缆芯线传播某一距离, m 。

t 应在 $\left(n + \frac{1}{2}\right)\tau > t \geq \left(n - \frac{1}{2}\right)\tau$ 范围内。因为电缆线路进入波为一衰减波, 所以只需分析 $t = \left(n - \frac{1}{2}\right)\tau$ 时 B 点的电压, 就可确定电缆线路上可能发生的最大冲击电压为

$$U_{Bm} = U_{im} a_{12} a_{23} \frac{(\beta_{12} \beta_{32})^n - \exp(-na\tau)}{\beta_{12} \beta_{32} - \exp(-a\tau)} \tag{A2}$$

将式(A2)对 n 微分, 并令 $\frac{dU_{Bm}}{dn} = 0$, 得

$$n = \frac{\ln\left(\frac{-a\tau}{\ln \beta_{12} \beta_{32}}\right)}{\ln(\beta_{12} \beta_{32}) + a\tau} \tag{A3}$$

时, B 点冲击电压有最大值。

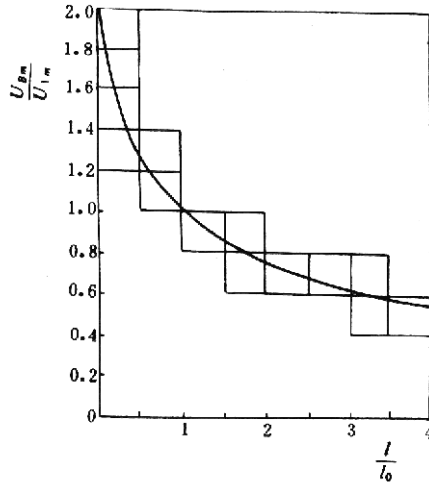
从上述分析不难看出, 当冲击波从架空线进入电缆时, 其峰值将大大降低。当进入波到达变压器时, 由于全反射而使波幅值增加一倍, 但此时变压器受到的冲击波幅值只有架空线上冲击波的几分之一, 所以在架空线与变压器间插入电缆后降低了变压器所承受的过电压。但是, 如果考虑多次反射, 情况就比这复杂。实际上, 当反射波的波头走向架空线时, 它将叠加到尚在向变压器前进的波尾部分, 然后在电缆与架空线连接处冲击波又反射回向变压器, 随后又在变压器处反射回架空线。这样重复往返, 每次均叠加在其本身波尾上。如冲击波波头走过电缆全长所需的时间小于本身波尾时间, 在波尾通过电缆以前将有多次反射叠加, 因此电缆和变压器承受的过电压有可能达到很高的数值。反之, 如果电缆长度大于波尾长度(波尾时间乘波速), 那末电缆和变压器的承受过电压将不会超过电缆入射波的两倍或架空线上入射波的几分之一。

A2 电缆线路的冲击特性长度和冲击耐受电压

由式(A2)可知, 当 $\frac{U_{Bm}}{U_{im}} = 1.0$, 则

$$a_{12} a_{23} \frac{(\beta_{12} \beta_{32})^n - \exp(-na\tau)}{\beta_{12} \beta_{32} - \exp(-a\tau)} = 1.0 \tag{A4}$$

且 $n = \frac{\ln\left(\frac{-a\tau}{\ln\beta_{12}\beta_{32}}\right)}{\ln(\beta_{12}\beta_{32}) + a\tau}$ 时, 电缆中受到的冲击电压不会超过架空线上入射波幅值。因为 $\tau = \frac{2l}{v}$, 联解式(A3)和式(A4), 则可得一电缆长度 l_0 。换言之, 当电缆长度 l 等于 l_0 时, 电缆中受到最大的冲击电压等于架空线上入射波幅值 U_{im} , 这个长度 l_0 称为电缆线路的冲击特性长度。



图A2 电缆实际长度与其特性长度之比 l/l_0 和 U_{Bm}/U_{im} 关系

电缆中可能受到最大冲击电压 U_{Bm} 和 U_{im} 比值与电缆长度的关系, 根据式(A2)和式(A3) 计算所得结果如表A1 和图A2 所示。

表A1 和图A2 所列的数值是根据 110kV 电缆波阻抗 $Z_l=30\Omega$, 架空线波阻抗 $Z_1=500\Omega$ 和 变压器波阻抗 $Z_2=\infty$ 计算出来的, 此时 $l_0=380m$ 。

同理可计算出 220kV 电缆波阻抗 $Z_l=30\Omega$ 架空线波阻抗 $Z_1=350\Omega$ 和变压器波阻抗 $Z_2=\infty$ 时, 电缆冲击特性长度 $l_0=430m$; 500kV 电缆波阻抗 $Z_l=30\Omega$, 架空线波阻抗 $Z_1=280\Omega$ 和 变压器波阻抗 $Z_2=\infty$ 时, 电缆冲击特性长度 $l_0=554m$ 。

表A1 电缆上 U_{Bm}/U_{im} 比与电缆长度的关系

| | | | | | | | | |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 电缆长度 l m | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 750 | 1000 | 1500 |
| U_{Bm}/U_{im} | 1.45 | 1.25 | 1.10 | 0.99 | 0.89 | 0.77 | 0.66 | 0.56 |
| 达到 U_{Bm} 时间 μs | 22.5 | 35 | 42 | 51 | 57.5 | 72 | 79 | 90 |

由图 A2 可见:

- a. 当电缆实际长度小于冲击特性长度时, 电缆的冲击绝缘水平必须取比系统较高值, 或对电缆另加保护措施, 如在电缆末端再加装一组避雷器保护。
- b. 当电缆实际长度等于冲击特性长度时, 电缆的冲击绝缘水平可与系统取相同值。
- c. 当电缆实际长度大于冲击特性长度时, 电缆的冲击绝缘水平可取比系统较低值。

附录 B
高压单芯电缆护层绝缘的保护方案
(参 考 件)

B1 电缆金属护套一端互联接地，另一端接保护器(方案一)

如图 B1 所示，护层所受电压计算公式见表 B1。

表 B1 电缆金属护套一端互联接地时护层所受电压

| 流经保护器的冲击电流 | 保护器所受工频电压 | 护层所受电压 | | 短路方式 | 计 算 公 式 |
|-----------------------------|-----------|--------|--------|----------------------------|---|
| | | 工频 | 冲击 | | |
| $\frac{2U_{im}}{Z_1 + Z_l}$ | U_A | U_A | KU_A | 三相短路 | $\dot{U}_A = -\dot{I} \left[-\frac{1}{2}(X_s + Z_{00} - 2Z_{01}) + j\frac{3}{2}(X_s - Z_{00}) \right]$ |
| | | | | A、C 两相短路 | $\dot{U}_A = -\dot{I}(X_s - Z_{00})$ |
| | | | | A 相接地 电缆头地网中短路 地网外短路 | $\dot{U}_A = -\left(\dot{I} X_s + \dot{I}_2 R_1 \right)$ |

注：①由于单相接地电流以大地为回路，所以金属护套两端将感应很高的电压 $\dot{I} X_s$ 。

②加在护层和保护器上的电压除金属护套两端的感应电压 $\dot{I} X_s$ 外，还要叠加地网

电位 $\dot{I}_2 R_1$ 。当流经地网短路电流大时，后者可达极高数值。

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，故护层和保护器所受工频电压取决于单相接地故障。

B2 电缆金属护套交叉互联，保护器Y₀接线(方案二)

如图 B2 所示，护层所受电压计算公式见表 B2。

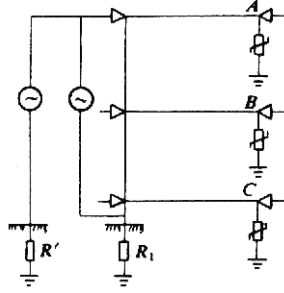
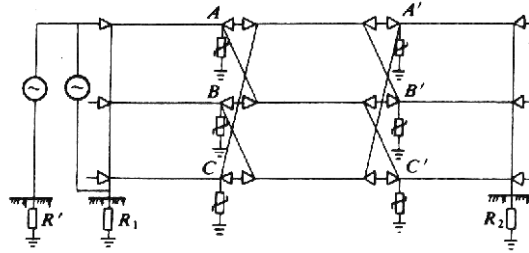


图 B1 电缆金属护套一端互联接地



图B2 电缆金属护套交叉互联，保护器Y₀接线

表B2 电缆金属护套交叉互联，保护器Y₀接线护层所受电压

| 流经保护器的冲击电流 | 保护器所受工频电压 | 护层所受电压 | | 短路方式 | 计算公式 |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------|---|
| | | 工频 | 冲击 | | |
| $\frac{2U_{im}}{Z_1 + Z_l}$ | U_c 或 U'_c | U_c 或 U'_c | KU_c 或 KU'_c | 三相短路 | $\dot{U}_A = -\dot{I} \left[-\frac{1}{2}(X_s + Z_{00} - 2Z_{01}) - j\frac{3}{2}(X_s -$ |
| | | | | A、C两相短路 | $\dot{U}_C = -\dot{I}(X_s - Z_{00})$ |

| | | | | | | |
|--|--|--|--|------------------|------|--|
| | | | | A 相 接 地 | 电缆头地 | $\dot{U}_c = -\dot{I}Z_{00} + \frac{1}{Z_a + R_2 + R_1} \left[(X_a + R_2) \times \left(R_1 + \frac{Z_a}{3} \right) \dot{I} - \right.$ |
| | | | | | 网中短路 | $\dot{U}_c = \dot{I}Z_{00} + \left[\frac{(X_a + R_2) \left(R_2 + \frac{Z_a}{3} \right)}{Z_a + R_2 + R_1} \right] \dot{I} - \frac{R_1 \left(R_2 + \frac{Z_a}{3} \right)}{Z_a + R_2}$ |
| | | | | | 地网外 | $\dot{U}_c = -\dot{I}Z_{00} + \frac{1}{Z_a + R_2 + R_1} \left[X_a \left(R_1 + \frac{Z_a}{3} \right) \dot{I} - R_1 \left(R_2 + \frac{Z_a}{3} \right) \dot{I} \right]$ |
| | | | | | 短路 | $\dot{U}_c = \dot{I}Z_{00} - \frac{\dot{I}X_a + \dot{I}_2 R_1}{Z_a + R_2 + R_1} \left(R_2 + \frac{Z_a}{3} \right)$ |

注：①由于金属护套两端压降和地网的压降部分抵消，因此 A 相接地时，C 相护层和保护器所受的工频电压要比 A 相高。

②单相接地时护层和保护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。当流经接地电阻的电流大时，工频电压可达很高数值。这种情况一般出现在单电源网外接地和多电源网内接地，此时护层和保护器所受工频电压取决于单相接地故障，且首端 (U'_c) 和末端 (U_c) 的电压是不相等的。

③网内单电源时，由于大部分电流将以金属护套为回路，所以护层和保护器所受电压将大大降低，此时护层和保护器所受工频电压将取决于两相接地故障。

④和保护器 Y 接线比较，由于保护器所受工频电压高，所以其残压及护层所受冲击电压随之升高。

B3 电缆金属护套交叉互联，保护器 Y 接线或△接线(方案三)

如图 B3 所示，护层所受电压计算公式见表 B3。

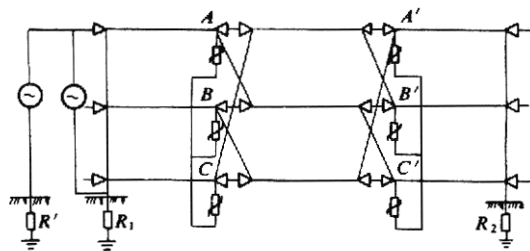


图 B3 电缆金属护套交叉互联，保护器 Y 接线

表 B3 电缆金属护套交叉互联，保护器 Y 接线护层所受电压

| 流经保护器的冲击电流 | 保护器所受工频电压 | 护层所受电压 | | 短路方式 | 计算公式 |
|------------|-----------|--------|----|------|------|
| | | 工频 | 冲击 | | |
| | | | | | |

| | | | | | |
|-----------------------------|--|----------------------|---------------------|-----------|--|
| $\frac{2U_{im}}{Z_1 + Z_l}$ | $\frac{U_{AC}}{2}$ (当保护器 Δ 接线时为 U_{AC}) | U_C 或 U'_C | $\frac{KU_{AC}}{2}$ | 三相短路 | U_C 同方案二 $\dot{U}_{AC} = -\dot{I}[j\sqrt{3}(X_s - Z_{00})]$ |
| | | | | A、C 两相短路 | U_C 同方案二 $\dot{U}_{AC} = -2\dot{I}(X_s - Z_{00})$ |
| | | | | A 相 接地 | 电缆头 地 网中短 路 \dot{U}_C 及 \dot{U}'_C 同方案二 |
| | | | | 地网外 短路 | $\dot{U}_{AC} = -\dot{I}(X_s - Z_{00})$ |

注：①由于保护器采用了 Y 接线，单相接地时，保护器所受工频电压和接地电阻以及流经接地电阻的电流无关，其值仅为两相短路电流的一半。保护器所受工频电压将由两相短路决定。

②由于保护器所受工频电压比方案二低得多，所以其残压及护层所受冲击电压比方案二要小得多。

③护层所受工频电压仍受接地电阻以及流经接地电阻的电流影响，可达很高数值。

④当三相绝缘接头距离较大时，为了减少引线上冲击压降的有害作用，可将保护器直接跨接在绝缘接头上，即采用 Δ 接法，此时保护器所受电压为 U_{AC} ，但护层所受冲击电压

仍为 $\frac{U_{AC}}{2}$ 不变。

B4 电缆金属护套一端互联接地加均压线(方案四)

如图 B4 所示，护层所受电压计算公式见表 B4。

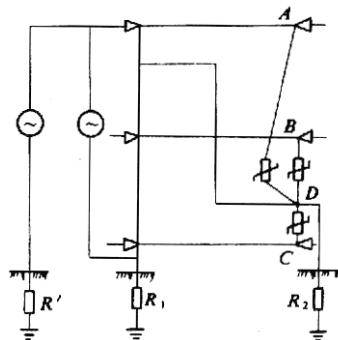


图 B4 电缆金属护套一端互联接地加均压线

表 B4 电缆金属护套一端互联接地加均压线护层所受电压

| | | | |
|------------|--------|-------------|---|
| 流经保 护器的 | 保 护 | 护层所受 电 压 | 计 算 公 式 (当 R 在 0 和 $6 Z_d $ 之间时用内差法计算) |
|------------|--------|-------------|---|

| | | | | | |
|-----------------------------|---------------------------------|----------|-----------|----------------------------------|--|
| 冲击电 流 | 器 所 受 工 频 电 压 | 工 频 | 冲击 | 短路方式 | 当 $R \geq 6 Z_d $ 时 |
| $\frac{2U_{im}}{Z_1 + Z_l}$ | U_{AD} | U_{AD} | KU_{AD} | 三相短路 | $U_{AD} = -\dot{I} \left[-\frac{1}{2}(X_s + Z_{00} - 2Z_{01}) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(X_s - Z_{00}) \right]$ |
| | | | | A、C 两相短路 | $U_{AD} = -\dot{I}(X_s - Z_{00})$ |
| | | | | A 相 接 地 电缆头地 网中短路 | $U_{AD} = -\dot{I}(X_s - Z_{ad}) - \frac{\dot{I}(Z_{ad} + R_2) + \dot{I}_2 R_1}{Z_d + R_1 + R_2} (Z_d - Z_{ad})$ |
| | | | | 地网外 短 路 | $U_{AD} = -\dot{I}(X_s - Z_{ad}) - \frac{\dot{I} Z_{ad} + \dot{I}_2 R_1}{Z_d + R_1 + R_2} (Z_d - Z_{ad})$ |

注：①均压线的存在使单相接地时护层和保护器所受工频电压与地网电位无关。

②由于均压线的存在，单相接地短路电流在AD两点的感应电压只与均压线和金属护套间的面积有关 [式中 $I(X_s - Z_{ad})$ 项]，和短路电流回路的远近无关。

③由于单相接地时部分短路电流以均压线为回路，在均压线上造成压降，增大了护层和保护器所受工频电压(式中第二项)。流经均压线的电流愈大，护层和保护器所受的电压愈高。

④当网外短路 $R_2 = \infty$ 时，由于没有短路电流流经均压线，护层和保护器所受工频电压可降到最低值 $I(X_s - Z_{ad})$ 。它将低于三相和两相短路时的数值，但当均压线对地泄漏电阻小时，效果将降低。

B5 电缆金属护套一端互联接地加回流线(方案五)

B5.1 接地电流以回流线为回路

如图 B5 所示，护套一端互联接地的电缆线路，为了降低护层电压，通常在其旁边平行敷设一根回流线(两端接地)。当系统单相接地发生在回流线接地的地网中时，接地电流的绝大部分通过回流线，若忽略入地部分的接地电流，此时电缆护套相对于回流线的感应电压为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \left(R_p + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D_A^2}{r_p r_s} \right) \dot{i} \\ \dot{U}_B &= \left(R_p + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D_A D_B}{r_p d} \right) \dot{i} \\ \dot{U}_C &= \left(R_p + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D_A D_C}{r_p 2d} \right) \dot{i} \end{aligned} \right\} \quad (B1)$$

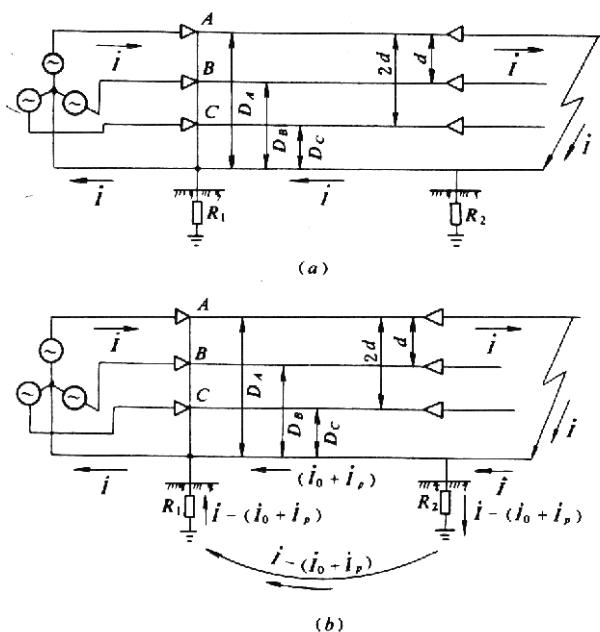


图 B5 电缆金属护套一端互联接地加回流线

(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

B5.2 部分接地电流以大地为回路

各相电缆护套对回流线的感应电压为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{i} Z_{AA} - (\dot{I}_0 + \dot{I}_p) Z_{pA} \\ \dot{U}_B &= \dot{i} Z_{BA} - (\dot{I}_0 + \dot{I}_p) Z_{pB} \\ \dot{U}_C &= \dot{i} Z_{CA} - (\dot{I}_0 + \dot{I}_p) Z_{pC} \end{aligned} \right\} \quad (B2)$$

B6 符号说明

\dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C ——分别为 A、B、C 相电缆护套对回流线的电压，kV；

\dot{I} ——总的短路电流，kA；

\dot{I}_2 ——本站供给的短路电流，kA；

\dot{I}_0 ——通过回流线直接回归的接地电流，kA；

\dot{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，kA，

$$I_p = \frac{R_1 + R_2 + Z_{pA}}{R_1 + R_2 + Z_{pP}} I - I_0$$

R_1, R_2 ——电缆护套两端接地电阻， Ω ；

U_{im} ——沿线路传来的雷电波幅值，等于线路的 50% 放电电压(u50%)；

K ——残工比，

$$K = \frac{\text{保护器10kA冲击电流下的残压(幅值)}}{\text{保护器2s工频耐压值(有效值)}}$$

X_s ——电缆金属护套的自感电抗， Ω ；

Z_{01} ——中相和边相金属护套的互感阻抗， Ω ，

$$Z_{01} = j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{d}$$

Z_{00} ——边相和边相金属护套的互感阻抗， Ω ，

$$Z_{00} = j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{2d}$$

Z_d ——均压线的自感阻抗， Ω ，

$$Z_d = R_d + j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{r_d}$$

R_d ——均压线的电阻， Ω ；

Z_{ad} ——均压线和电缆的互感阻抗， Ω ，

$$Z_{ad} = j2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D}{d}$$

d' ——电缆与均压线间的几何均距，m；

Z_a ——交叉互联的三相电缆护套的等值阻抗， Ω ，

$$Z_a = R_s + jX_s + Z_{01} + Z_{00}$$

R_s ——电缆金属护套电阻， Ω ；

Z_1 ——电缆芯线对护套的波阻抗, Ω ,

$$Z_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{r_s}{r_1} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \right)$$

Z_1 ——架空线路波阻抗, Ω ;

R ——均压线的总泄漏电阻(不包括 R_1 和 R_2), Ω ;

R_p ——回流线的电阻, Ω ;

Z_{AA} ——A相电缆护套和发生接地故障A相的线芯之间以大地为回路的互感阻抗, Ω ,

$$Z_{AA} = R_g + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D}{r_s}$$

Z_{BA} 、 Z_{CA} ——分别为B、C相电缆护套与接地的A相的线芯之间以大地为回路的互感阻抗,

Ω ,

$$Z_{BA} = R_g + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D}{d}$$

$$Z_{CA} = R_g + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D}{2d}$$

Z_{pA} 、 Z_{pB} 、 Z_{pC} ——分别为回流线与A、B和C相护套之间以大地为回路的互感阻抗, Ω ,

$$Z_{pA} = R_g + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D}{D_A}$$

$$Z_{pB} = R_g + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D}{D_B}$$

$$Z_{pC} = R_g + j2\omega \times 10^{-7} l \ln \frac{D}{D_C}$$

Z_{pP} ——回流线自感阻抗, Ω ;

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

r_s ——电缆金属护套半径, mm;

r_d ——均压线半径, mm;

r_1 ——电缆线芯半径, mm;

r_P ——回流线等值半径，mm；

l ——电缆的长度，m；

d ——电缆间距离，m；

D ——地中等值电流的深度， $D=94\rho$ ，m；

ρ ——土壤电阻率， $\Omega \cdot m$ ；

D_A 、 D_B 、 D_C ——分别为回流线至A、B、C相电缆的间距；

μ_r ——电缆主绝缘的导磁系数；

ε_r ——电缆主绝缘的介电系数。

附加说明：

本导则由能源部电力电缆标准化技术委员会提出和归口。

本导则主要起草人：江日洪、唐麓基。