DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.11.016

高压电缆护套环流分析

王雪佳， 蔡新景
（沈阳工业大学，沈阳 110000）

摘要：高压电缆的广泛应用使其金属护层的感应环流对电缆运行状况及使用寿命的影响得到了重视。为了抑制高压电缆金属护层环流，通过研究电缆的导体线芯与金属护套的关系图，对高压电缆环流的计算公式进行推导。提出了一种新的、更简单的、更具普遍性的高压电缆护套环流计算公式。其次使用MATLAB软件根据公式编写了相应计算程序，程序计算所得结果在误差范围(2%)之内。最后文中还讨论了高压电缆护套的各种主要影响因素，并根据各种因素的影响规律提出了相应的、可行的高压电缆金属护层环流的抑制措施。

关键词：高压电缆；护套环流；环流的抑制措施

Circulating Current Analysis of HV Cable Sheath

WANG Xuejia, CAI Xinjing
(Shenyang University of Technology, Shenyang 110000, China)

Abstract: With the widespread application of high-voltage cables, attention has been given to the influence of the induced circulating current in their metal sheath on operation and service life cable. For suppressing the circulatign current of the metal sheath of high-voltage cable, the calculation formula of high-voltage cable circulatiign current is derived by studying the relationship diagram between the conductor core and the metal sheath of the cable. First, a new, simpler and more universal calculation formula for the circulating current of high-voltage cable sheath is proposed. Then, the corresponding calculation program is written according to the formula using MATLAB software, and the result calculated by the program is within the error range(2%). Finally, the various main influencing factors of high-voltage cable sheath are discussed, and corresponding and feasible suppression measures for the circulating current of high-voltage cable metal sheath are proposed in accordance with the influence of various factors.

Key words: HV cable; sheath circulatiing current; suppression measures for circulating current

0 引言

针对高压电缆的特殊性，王敏[1]分析了两起10 kV单相电力电缆因金属屏蔽层中环流引起的故障[2-4]，利用红外测温来发现电缆的异常，针对不同故障提出了电缆安全运行的建议。

常见的电缆包括三芯电缆和单芯电缆，其基本结构见图1。为了研究交联聚乙烯单芯电缆的护套环流，牛海清等人[5-6]建立了单芯电缆金属护套两端互联直接接地以及交叉互联两端接地时的环流模型，提出了串入电阻可有效降低环流的思路。

目前针对单、双回路的单芯电缆金属护层环流的计算公式推导的研究较多。刘英[7]、罗志远[8]和黄顺建[9]通过等效电路推导了多回路电缆环流的计算公式，并通过编程验证了所推公式的正确性。同时提供了对应的环流抑制方法，以有效降低环流对电网的影响。

110 kV及以上电压等级的电缆通常使用单芯高压电缆，这种电缆的感应电压相对较大[10-11]。若继续用直接接地会产生较大的环流。郑光禄和张

收稿日期：2026-04-05； 修回日期：2026-06-11

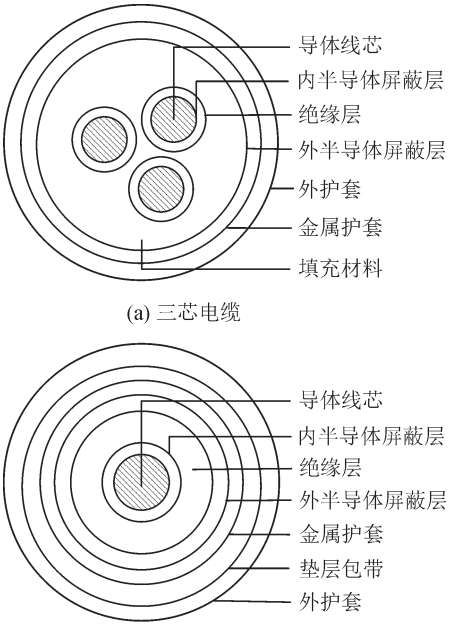


图1　三芯电缆和单芯电缆的基本结构

Fig. 1　The basic mechanism of three-core cable and single-core cables

涛[12]为了使电网系统更安全的运行，采用ATP仿真软件对电抗器抑制方法进行仿真，但他们提出的利用电抗器抑制环流的方法仍存在着较大的局限性。

但若将该电压等级的电缆金属护套三相进行完全换位，划分为3段等长度的电缆，采用交叉互联[13-15]。此时电缆金属护套的感应电压三相对称，抵消部分感应电压，将电缆金属护套产生的感应电压值控制在规定值以内，有效减小金属护层上的感应环流。

在实际电缆运行工作中对金属护层的环流大小产生影响的因素很多[16]。高压电缆护套接地电流过高会带来过大的损耗，将严重影响电缆的使用寿命。刘英，齐明泽等人提出建立高压电缆金属护套交叉互联方式下的等效电路模型，采用向量叠加[17-18]，并利用电缆运行载流量的修正计算公式或利用网孔电流法求解其等值电路的方法。秦小安等人利用该方法求出了高压金属护层的接地电流和三相的总损耗[19]，从其文中可知为了避免电流过大导致的电缆加速老化现象，应选择电阻率较大的半导体电护层材料。同时在电缆敷设的时候选择合适的分段比，更有利于减小电缆的金属护套环流[20-22]。

各种环流抑制方法的提出及利用电网中的电缆运行状况实例进行方法可行性的验证[23-27]为高压电缆线路交叉互联设计及改造提供了技术支持。文中设计了可计算三相任意排列的电缆金属护套环流的通用公式。讨论了高压电缆金属护套感应环流的影响因素，最后提出了减小感应环流的有效措施。

1　单金属护套环流计算

1.1　单金属护套环流计算方法

当电缆线路三相任意排列时，各相导体线芯与金属护套之间的关系可以简化为图2。

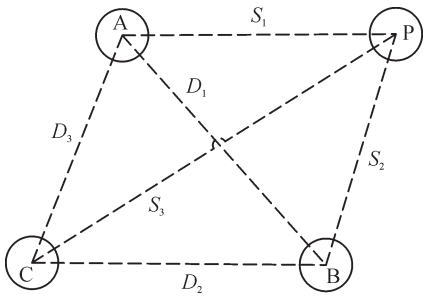


图2　导体线芯与金属护套关系图

Fig. 2　Layout diagram of conductor core and metal sheath

假设图2中的P为电缆三相中的任意一相的金属护套；A、B、C为三相导体线芯；S_1、S_2、S_3分别为P到A、B、C三相的距离；D_1、D_2、D_3为AB、BC、AC三相之间的距离。

设此电缆的A、B、C三相线芯中流过的电流有效值为I_A、I_B、I_C。则该电缆金属护层P与三相之间的磁通(Wb/m)计算公式

$$\begin{cases}\boldsymbol{\Phi}_{PA}=2\times10^{-7}\times I_A\ln\dfrac{S_1}{r_p}\\ \boldsymbol{\Phi}_{PB}=2\times10^{-7}\times I_B\ln\dfrac{S_2}{r_p}\\ \boldsymbol{\Phi}_{PC}=2\times10^{-7}\times I_C\ln\dfrac{S_3}{r_p}\end{cases}\tag{1}$$

式(1)中，r_p为护套的平均几何半径。

由此，可得护套P与电缆三相的线芯间的总磁通(Wb/m)计算式

$$\boldsymbol{\Phi}_P=2\times10^{-7}\times[I_A\ln\frac{S_1}{r_p}+I_B\ln\frac{S_2}{r_p}+I_C\ln\frac{S_3}{r_p}]\tag{2}$$

假设P为A相电缆金属护套时，即P与A重合，P、B距离为D_1、P、C距离为D_3，P、A距离即为A相线芯护套的平均几何半径r_p，$\boldsymbol{\Phi}_P$(Wb/m)为

$$\boldsymbol{\Phi}_P=2\times10^{-7}\times[I_B\ln\frac{D_1}{r_p}+I_C\ln\frac{D_3}{r_p}]\tag{3}$$

电缆三相对称并且正常工作时，电缆的电流可假设为

$$\begin{cases}\boldsymbol{I}_A=I\\ \boldsymbol{I}_B=(-\dfrac{1}{2}-\mathrm{j}\dfrac{\sqrt{3}}{2})I\\ \boldsymbol{I}_C=(-\dfrac{1}{2}+\mathrm{j}\dfrac{\sqrt{3}}{2})I\end{cases}\tag{4}$$

其(4)中，I为三相电流的有效值。

将式(4)代入式(3)可以得到$\boldsymbol{\Phi}_A$(Wb/m)为

$$\boldsymbol{\Phi}_A=2\times10^{-7}\times[(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2})I\times\ln\frac{D_1}{r_p}+(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2})I\times\ln\frac{D_3}{r_p}] \tag{5}$$

因此，A相电缆金属护套的感应电压(V/m)计算式为

$$\boldsymbol{U}_A=\frac{d\boldsymbol{\Phi}_A}{dt}=-j2\omega\times10^{-7}I\times\left(\frac{1}{2}\ln\frac{D_1D_3}{r_p}+\frac{\sqrt{3}}{2}j\ln\frac{D_3}{D_1}\right) \tag{6}$$

采取同样的方法，可得到B相与C相电缆护套的感应电压。

假设P为B相金属护套，即P、B重合，则P、A距离$S_1=D_1$、P、C距离$D_2=S_3$、$S_2=0$代入式(2)，可以求得B相的磁通(Wb/m)及感应电压(V/m)。

$$\boldsymbol{\Phi}_B=2\times10^{-7}\times\left(I_A\ln\frac{D_1}{r_p}+I_C\ln\frac{D_2}{r_p}\right) \tag{7}$$

将式(4)代入式(7)可得到计算式(8)

$$\boldsymbol{U}_B=-j2\omega\times10^{-7}\times I\times[\ln\frac{D_1}{r_p}+(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2})\ln\frac{D_2}{r_p}] \tag{8}$$

假设P为C相金属护套，P、A距离$S_1=D_3$、P、B距离$S_2=D_2$、$S_3=0$代入式(2)可以得到C相磁通(Wb/m)及感应电压(V/m)。

$$\boldsymbol{\Phi}_C=2\times10^{-7}\times\left(I_A\ln\frac{D_3}{r_p}+I_B\ln\frac{D_2}{r_p}\right) \tag{9}$$

将式(4)代入

$$\boldsymbol{U}_C=-j2\omega\times10^{-7}\times I[\ln\frac{D_3}{r_p}+(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2})\ln\frac{D_2}{r_p}] \tag{10}$$

综上，当电缆三相任意排列，正常运行的情况下，其各相感应电压的一般计算式为

$$\begin{cases}\boldsymbol{U}_A=-j2\omega\times10^{-7}\times I\times\left(\frac{1}{2}\ln\frac{D_1D_3}{r_p^2}+\frac{\sqrt{3}}{2}j\ln\frac{D_3}{D_1}\right)\\ \boldsymbol{U}_B=-j2\omega\times10^{-7}\times I\times[\ln\frac{D_1}{r_p}+(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2})\ln\frac{D_2}{r_p}]\\ \boldsymbol{U}_C=-j2\omega\times10^{-7}\times I\times[\ln\frac{D_3}{r_p}+(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2})\ln\frac{D_2}{r_p}]\end{cases} \tag{11}$$

当高压电缆的三相线芯摆放按图3所示时可将式(11)进行化简。

①当电缆三相水平排列时：$D_1=D_2=D$、$D_3=2D$，感应电压单位为V/m。

$$\boldsymbol{U}_A=2\omega\times10^{-7}I\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\ln2+j\ln\frac{D}{r_p}+j\ln2\right) \tag{12}$$

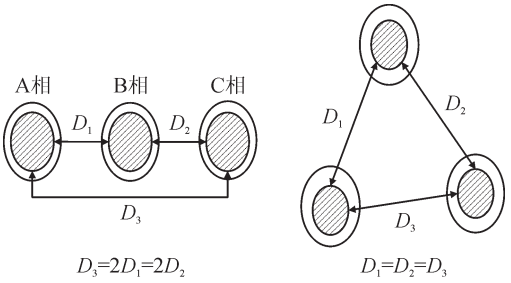


图3　三相电缆特殊摆放位置

Fig. 3　Special placement of three-phase cables

$$\boldsymbol{U}_B=2\omega\times10^{-7}I\times\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{D}{r_p}-j\frac{1}{2}\ln\frac{D}{r_p}\right) \tag{13}$$

$$\boldsymbol{U}_C=2\omega\times10^{-7}I\times[(-\frac{\sqrt{3}}{2}-\frac{1}{2})\ln\frac{D}{r_p}-j\ln2] \tag{14}$$

②当电缆品字形排列时：$D_1=D_2=D_3=D$，感应电压单位为V/m。

$$\boldsymbol{U}_A=j2\omega\times10^{-7}I\ln\frac{D^2}{r_p^2} \tag{15}$$

U_A、U_B、U_C有效值相等，则

$$|\boldsymbol{U}_A|=|\boldsymbol{U}_B|=|\boldsymbol{U}_C|=j2\omega\times10^{-7}I\ln\frac{D^2}{r_p^2} \tag{16}$$

1.2　单金属护套环流计算公式正确性检验

用下面实例1来证明上述所推论的公式正确性。电缆敷设见图4，电缆参数800 A/220 kV；截面积2 500 mm²；金属护套的平均几何半径68 mm；电缆总长度1 200 m；三相间距$D_3=2D_1=2D_2=0.4$ m；大地电阻率0.049 3 mΩ/m；单相电缆的护层电阻0.041 5 mΩ/m，接地电阻5 Ω。

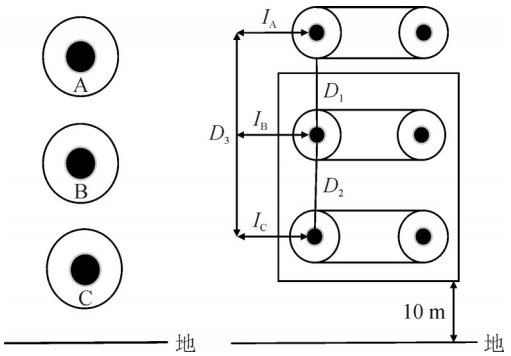


图4　电缆接地等效图

Fig. 4　Equivalent diagram of cable grounding

将该实例所给的各种条件代入1.1节中推出的当电缆线芯任意排列时的金属护套的三相感应电压计算公式，计算出A相的金属感应护套环流值约为12.51 A；B相金属感应护套环流值约为14.44 A；C相环流值约为12.54 A。

验证得，该公式的计算结果符合实际感应电压及感应电流的取值范围，且与文[5]中所得数据相近。

使用MATLAB编写的程序计算得到的结果见

图5。由图5可知，该程序的计算结果误差不大，数值均在通常情况下环流可达到的取值范围(2%)内。

```
» [U_A, U_B, U_C, I_A, I_B, I_C]=Untitled3(314,0.2,0.2,0.4,0.68,800,5,1 200)
U_A=
        36.19-52.885i
U_B=
       -63.894+36.889i
U_C=
        63.894-4.899i
 I_A=
        7.238-10.577i
 I_B=
       -12.779+7.377 9i
 I_C=
        12.779-0.979 79i
```

图5　MATLAB程序计算结果图

Fig. 5　Calculation result of MATLAB program

在实际电缆运用中，很多线路的环流都在几十安以上，甚至部分电缆环流可超过线芯电流的50%~80%。

2　双回金属护套环流计算

当电缆回路周围有其他平行电缆回路时(如常见的双回路输电电缆)，它的金属护套将会受到另一回路电流产生的磁场影响，所以计算多回路电缆金属护套的感应电流时不能再使用单回路的环流计算公式。

双回路电缆任意排列时，各相电缆线芯的中心距离的比率表示法见图6。由图6可知一共有12个间距和3个线芯距。

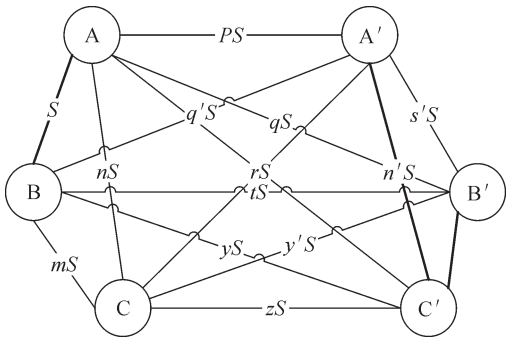


图6　双回路电缆任意排列时，各相电缆线芯的中心距离的比率表示法

Fig. 6　Ratio representation of the center distance between arbitrarily arranged two-circuit phase cables

这种情况的护套电压与另一回路的不同排列方式也有很大差异。对此时的感应电压计算公式作以下推导。

假设双回路电路任意排列时，各相线路间的中心距见图6，则可计算出A相护套的总磁通(Wb/km)

$$\boldsymbol{\Phi}'_{\mathrm{P}}=2\times10^{-7}\left(I'_{\mathrm{A}}\times\ln\frac{p'S}{r_{\mathrm{S}}}+I'_{\mathrm{B}}\times\ln\frac{qs}{r_{\mathrm{S}}}+I'_{\mathrm{C}}\times\ln\frac{rS}{r_{\mathrm{S}}}\right)\tag{17}$$

假设所有电缆回路的电流平衡，且有I_{A}与I'_{A}相等，则式(17)可表示为

$$\boldsymbol{\Phi}'_{\mathrm{P}}=2\times10^{-7}\left(\frac{1}{2}\ln\frac{p^2}{qr}-\mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{q}{r}\right)\tag{18}$$

因此由于周围增加的回路在A相金属护套上产生的感应电压

$$E'_{\mathrm{SA}}=-\mathrm{j}\omega I\varphi'_{\mathrm{p}}=2\omega I\times10^{-7}\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{nr}{q}-\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{p^2}{qr}\right)\tag{19}$$

由下面的单回路感应电压计算公式可推导双回路的电缆金属护套环流

$$\begin{cases}E_{\mathrm{SA}}=-\mathrm{j}\omega I\varphi_{\mathrm{p}}=2\omega I\times10^{-7}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\ln n+\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{ns^2}{r_{\mathrm{S}}^2}\right)\\ E_{\mathrm{SB}}=-\mathrm{j}\omega I\varphi_{\mathrm{p}}=2\omega I\times10^{-7}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{ms}{r_{\mathrm{S}}}-\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{s}{m\times r_{\mathrm{S}}^2}\right)\\ E_{\mathrm{Sc}}=-\mathrm{j}\omega I\varphi_{\mathrm{p}}=2\omega I\times10^{-7}\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{ms}{r_{\mathrm{S}}}-j\frac{1}{2}\ln\frac{n^2s}{m\times r_{\mathrm{S}}^2}\right)\end{cases}\tag{20}$$

将单回路电缆推算的A相感应电压的计算式与式(18)相加可知双回路电缆的A相金属护套的感应电压大小：

$$E_{\mathrm{SA}}=2\omega I\times10^{-7}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\ln n-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{nr}{q}+\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{ns^2}{r_{\mathrm{S}}^2}-\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{p^2}{qr}\right)=2\omega I\times10^{-7}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{q}{r}+\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{nqrs^2}{(p\times r_{\mathrm{S}})^2}\right)\tag{21}$$

$$E'_{\mathrm{SB}}=2\omega I\times10^{-7}\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\times\ln\frac{msy}{t\times r_{\mathrm{S}}}-\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{q^2}{yt}\right)\tag{22}$$

将式(22)与式(18)相加可得双回路B相护套的感应电压

$$E_{\mathrm{SB}}=2\omega I\times10^{-7}[(-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{msy}{t\times r_{\mathrm{S}}}+\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{ms}{r_{\mathrm{S}}})-(\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{q^2}{yt}+\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{s}{m\times r_{\mathrm{S}}^2}]=2\omega I\times10^{-7}[\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{t}{y}-\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{q^2s}{(mty\times r_{\mathrm{S}}^2)}]\tag{23}$$

同理得C相的感应电势

$$E'_{\mathrm{SC}}=2\omega I\times10^{-7}\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{y}{z}-\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{r^2}{yz}\right)\tag{24}$$

将式(24)与式(19)相加可得两回路C相护套的感应电压

$$E_{SC}=2\omega I\times10^{-7}[(-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{msy}{z\times r_S}-\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{n^2r^2s}{myz\times r_S^2}] \tag{25}$$

综上,双回路护套的感应电压计算式为

$$\begin{cases}E_{SA}=2\omega I\times10^{-7}[\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{q}{r}+\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{nqrs^2}{(p\times r_S)^2}]\\ E_{SB}=2\omega I\times10^{-7}[\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{t}{y}-\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{q^2s}{(mty\times r_S^2)}]\\ E_{SC}=2\omega I\times10^{-7}\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\ln\frac{msy}{z\times r_S}-\mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{n^2r^2s}{myz\times r_S^2}\right)\end{cases} \tag{26}$$

3　电缆金属护套环流的影响因素

3.1　电缆排列方式

在实际高压电缆的运用中,高压电缆长度一般较长。

以220 kV、长1 200 m、r_p=68 mm、$R_{总}$=$R_{地}$=0.749 9 Ω的电缆为例,其电缆金属护套的感应环流计算结果见表1。

表1　环流计算值表

Table 1　Table of circulating current calculation values

长度/m	最大相环流/A	
	两端直接接地	交叉互联两端接地
800	90.8	28.5
1 200	136.2	42.8

由表1可知,在电缆较长时其金属护套会产生感应电压,当护套环流较大。应采用交叉互联且两端接地的接线方式,以减小电缆护套的感应环流。

3.2　负荷电流大小

以广州一个发电厂为例。110 kV/500 mm²的XLPE单芯电缆。电缆总长度970 m,电缆金属护套的一端直接接地,另一端采用经保护器接地。环流值变化图见图7。

由图7可知,当电缆的结构和长度相同时,电缆流过的负荷电流越大,其产生的感应电压越大,对应的护套环流也越大。

3.3　交叉互联接线方式

3.3.1　相序组合

以下述单回路电缆线路为例。电缆各参数为:金属护套阻值0.117 2 Ω,接地电阻R_1=R_2=1 Ω,三相之间距离400 mm,大地电阻率为900 Ω·m,电缆几

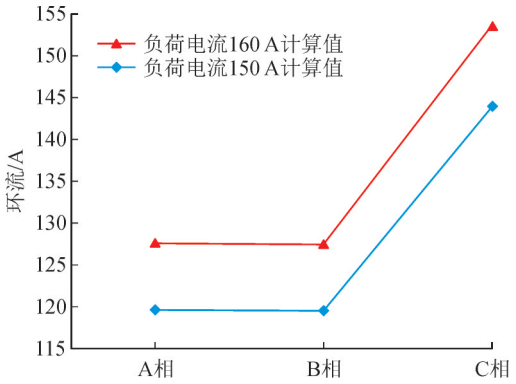


图7　环流值变化图

Fig. 7　Change plot of circulating current values

何平均半径为44.5 mm,电缆负荷电流262 A,采用交叉互联接线方式且3段等长为650 m。环流计算值见图8。

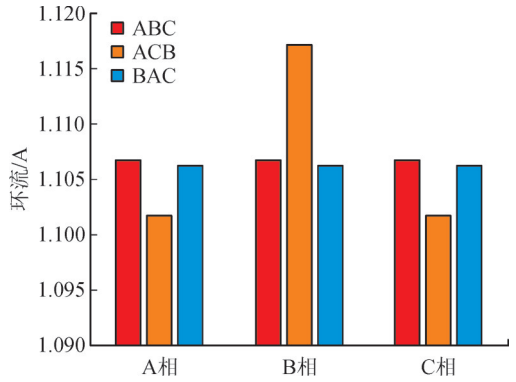


图8　不同相序组合下的单回路电缆环流值

Fig. 8　Single-loop cable circulating current values under different phase sequence combinations

由图8可以看出,单相回路中的护层采用交叉互联的接地方法且电缆平行排列时,改变电缆的相序会影响三相电缆的环流大小。

但所有相序组合方式中三相环流大小基本相等,数值大约为1.11 A。不同相序组合下的环流大小的改变大多是mA级别的。因此,对于单回路而言,敷设中可以不用特别注意三相电缆的排列位置,直接敷设即可。

当其为双回路线路时且两回均为正三角形敷设时,计算两回电缆各相的护套环流值见表2。

由表2可得,当电缆的双回路采用不同相序的组合时,不同回路中的环流大小都相差不大,除ACB-BAC相序组合外,环流大小在1.3 A左右,与其他相的金属护套环流差在0.2~0.3 A之间。

因此,双回路的电缆需要计算采用不同相序组合的金属护套环流的大小,再通过对不同相序组合下双回路中环流值的大小进行对比,找出环流值最小的敷设组合,优化电缆的敷设方式,由此减小电缆金属护套中的环流。

表2　多回路不同排列方式下的环流计算值

Table 2　Calculation values of multi-loop circulating current with different arrangement modes　A

回路	排列方式	I_1	I_2	I_3
第1回	ABC	2.601 4	2.601 4	2.605 5
第2回	ABC	1.655 8	1.646 2	1.646 2
第1回	ABC	0.687 8	0.687 8	0.707 9
第2回	ACB	2.992 1	2.987 6	2.987 6
第1回	ABC	3.014 2	3.014 3	3.010 2
第2回	BCA	2.163 2	2.155 8	2.155 8
第1回	ABC	1.245 1	1.245 1	1.231 8
第2回	CAB	2.122 6	2.130 7	2.130 6
第1回	ABC	1.804 2	1.804 2	1.790 8
第2回	CBA	2.003 7	2.011 4	2.011 4
第1回	ACB	1.316 4	1.316 5	1.305 2
第2回	BAC	1.351 8	1.363 1	1.363 0
第1回	CAB	0.687 8	0.687 8	0.707 9
第2回	CBA	2.992 1	2.987 6	2.987 6

3.3.2　段长分段情况

当线路总长相同的交叉互联电缆非均匀分段时，一个交叉互联中的3小段的感应电压只能抵消一部分，使护套环流较大。

假设采用交叉互联的等长110 kV高压电缆，其中有两组均匀分段且每小段长度都为500 m(标准长度)，另一组电缆每一小段长度依次为300、400、600、700 m。分段不均的电缆，其环流值见表3。

表3　分段不均时环流计算值

Table 3　Calculated values of circulating current when the segment is uneven

标称截面/mm²	金属护套接地环流/A			
	300 m	400 m	600 m	700 m
240	147	69	59	111
300	170	80	68	128
400	199	93	80	150
800	323	151	130	45
1 000	404	189	162	306
1 600	545	255	219	413

由表3可知，当高压电缆分段不均匀长度超过标准长度20%时，高压电缆金属护套环流会大幅增加。因此，高压电缆的分段长度要求尽量均匀。

3.3.3　交叉互联出错

在高压电缆的应用过程中经常会出现因为各种原因造成的接线错误。例如电缆交叉互联出错，电缆三相的感应环流会大幅增加，具体计算公式需要根据故障发生的类型有所改变。

假设此电缆发生了同一相的两个“羊角”反接，则其等值电路见图9。

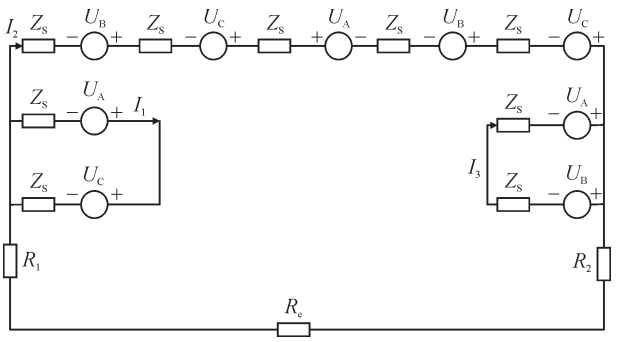


图9　同一相的两个“羊角”反接等值电路图

Fig. 9　Equivalent circuit diagram of two“horns” connection of the same phase

根据其等值电路图可推出此时的感应电流计算式：

$$I_1=\frac{-U_A+U_C}{2Z_S}=\frac{\sqrt{3}U_A\times e^{j150^\circ}}{2Z_S} \tag{27}$$

$$I_2=\frac{-U_B-U_C+U_A-U_B-U_C}{5Z_S+R_1+R_2+R_e}=\frac{3U_A}{5Z_S+R_1+R_2+R_e} \tag{28}$$

$$I_3=\frac{-U_A+U_B}{2Z_S}=\frac{\sqrt{3}U_A\times e^{-j150^\circ}}{2Z_S} \tag{29}$$

以一条500 mm²单芯XLPE电缆为例，电缆采用交叉互联两端接地的接线方式，电缆分段等长为500 m。正常情况下，当电缆线芯通过的负荷电流为175 A时，它的三相金属护套的环流实测值与计算值的对比见表4。

表4　三相护套环流实测值与计算值

Table 4　Measured and calculated values of three-phase sheath circulating current

相别	环流大小/A	
	实测值	计算值
A	11.2	8.6
B	13.8	9.9
C	4.5	5.8

当施工或者运行维护时不小心造成交叉互联发生错误，因此根据以上公式，此时高压电缆的交叉互联可分成3个回路，利用推导计算公式计算得到的环流值大小见表5。

表5　交叉互联出错环流值

Table 5　Circulating current values of wrong cross-interconnection

相别	环流大小/A	
	正常交叉互联	错误交叉互联
A	8.6	116
B	9.9	81
C	5.8	86

由表5对比，可以明确地看出，交叉互联接线不

出错时的环流比接线发生错误时的电缆金属护套环流小很多。因为当电缆采用交叉互联的接线方式时，需要严格地按照标准要求来接线，避免出现接线错误。

4 结论

文中主要对单回路以及多回路高压电缆的金属护套环流的计算公式进行了推论及讨论。进行了相应的实例计算，提出了以下几点感应环流的影响因素以及环流的抑制方法：

1)由欧姆定律可知，电缆金属护套的感应电压与电缆的负荷电流成正比。电缆负荷电流越大，其感应电压越大。因此，高压电缆的负荷电流不宜过大。

2)由文中计算可知，电缆两端直接接地的方法只适用于长度较短和工作电压较小的线路。因此，针对长线路的高压电缆，提出了交叉互联的接线方法，能有效减小长线路高压电缆输送较大负荷电流时其金属护层产生的感应环流。

3)由文中计算可知，两端直接接地的电缆不同相序组合对环流值影响不大，电缆金属护层产生的三相环流大小基本相等。但当采用交叉互联的接地方法且电缆三相平行排列时，若改变电缆的相序还是会影响三相电缆金属护套的感应环流。且当电缆分布不均匀长度超过标准长度20%或交叉互联出错时，高压电缆金属护套环流会大幅增加。因此，电缆分段长度应尽量均匀。

参考文献：

[1] 王 敏. 10 kV单相电力电缆屏蔽层的感应电压和环流[J]. 高电压技术，2002，28(5)：30-32.
Wang Min. The induced voltage and circulating current in the metal shield of 10 kV single phase electrical cables[J]. High Voltage Engineering，2002，28(5)：30-32.

[2] 郑大白，龙治华，王凤凯. 大长度高压电力电缆在海底电缆登陆段的设计与应用[J]. 电线电缆，2021(1)：10-13.
Zheng Dabai，Long Zhihua，Wang Fengkai. Design and application of large length high voltage power cable in landing section of submarine cable[J]. Wire & Cable，2021(1)：10-13.

[3] 高 飞，黄 磊，张 蕾，等. 高压输电线缆增加敷设段长研究[J]. 电气应用，2021，40(1)：35-41.
Gao Fei，Huang Lei，Zhang Lei，et al. Research on increasing the segmented length in the high-voltage cable[J]. Electrotechnical Application，2021，40(1)：35-41.

[4] 梁 铖，罗 建，李昆晟，等. 计及护层结构的高压电缆外护套破损点在线定位方法[J]. 电力系统保护与控制，2026，54(4)：130-141.
Liang Cheng，Luo Jian，Li Kunsheng，et al.Online localization method for outer sheath damage points in high-voltage cables considering sheath structure[J]. Power System Protection and Control，2026，54(4)：130-141.

[5] 牛海清，王晓兵，蚁泽沛，等. 110 kV单芯电缆金属护套环流计算与试验研究[J]. 高电压技术，2005，31(8)：15-17.
Niu Haiqing，Wang Xiaobing，Yi Zepei，et al. Study on circulating current of 110 kV single-core cable[J]. High Voltage Engineering，2005，31(8)：15-17.

[6] 陈科技，齐 炜. 混合排列方式对双回路XLPE电缆护层环流的影响[J]. 高电压技术，2018，44(11)：3736-3742.
Chen Keji，Qi Wei. Effect of mixed arrangement on current in sheaths of two-circuit arranged XLPE cables[J]. High Voltage Engineering，2018，44(11)：3736-3742.

[7] 刘 英，王 磊，曹晓珑. 双回路电缆护套环流计算及影响因素分析[J]. 高电压技术，2007，33(4)：143-146.
Liu Ying，Wang Lei，Cao Xiaolong. Calculation of circulating current in sheaths of two-circuit arranged cables and analyses of influencing factors[J]. High Voltage Engineering，2007，33(4)：143-146.

[8] 罗致远，詹威鹏，邬 韬，等. 多回路电缆金属护套环流计算软件的开发与应用[J]. 电线电缆，2014(2)：36-40.
Luo Zhiyuan，Zhan Weipeng，Wu Tao，et al. Multi-loop cable metal sheath circulation calculation software development and application[J]. Wire & Cable，2014(2)：36-40.

[9] 黄顺建. 多回路电缆环流影响分析及优化研究[J]. 能源与节能，2018(9)：88-92.
Huang Shunjian. Influence analysis and optimization research of circulating current of multi-loop cable[J]. Energy and Conservation，2018(9)：88-92.

[10] Klement K，Timborabadi H，El-deib A，et al. Closed loop control of a pulsed series parallel resonant converter with current doubler [C]//2010 IEEE International Power Electronics Conference(IPEC)，2010：238-243.

[11] 李瑞芳，胡 豪，曹晓斌，等. 单芯电缆耦合电路等效模型及无功损耗影响因素研究[J]. 高压电器，2021，57(7)：119-126.
Li Ruifang，Hu Hao，Cao Xiaobin，et al. Study on equivalent model of coupled circuit of single-core cable and influencing factors of reactive power loss[J]. High Voltage Apparatus，2021，57(7)：119-126.

[12] 郑光禄，张 涛. 110 kV单芯高压电缆护套环流抑制措施[J]. 船电技术，2015，35(10)：12-16.
Zheng Guanglu，Zhang Tao. Control method for ring current of 110 kV single core high voltage cable sheath[J]. Marine Electric & Electronic Technology，2015，35(10)：12-16.

[13] 杨 超. XLPE电力电缆护套感应电压与绝缘监测研究[D]. 长沙：长沙理工大学，2017.
Yang Chao. Research on induced voltage and insulation monitoring of XLPE power cable sheath[D]. Changsha：Changsha University of Science and Technology，2017.

[14] 杨明嘉，夏成军，赖胜杰，等. 基于线芯—护层过渡电阻无功特性的交叉互联电缆故障测距[J]. 电工技术学报，2024，39(5)：1372-1389.
Yang Mingjia，Xia Chengjun，Lai Shengjie，et al. Fault location of cross-connected cables based on reactive power characteristics of core-sheath transition resistance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(5)：1372-1389.

[15] 周莎莎，王 航，杨 斌，等. 地下交叉互联高压电缆分布式护

层电流传感系统的时滞控制方法[J]. 电工技术学报，2024，39(4)：1234-1244.
Zhou Shasha，Wang Hang，Yang Bin，et al. Time delay control method for distributed sheath current sensing system of underground cross-bonding high voltage cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(4)：1234-1244.

[16] Klement K，Dawson F，Thorpe S. Resonant converters for pulsed applications[C]//2009 13th IEEE European Conference on Power Electronics and Applications，2009：1-8.

[17] 刘　英，肖　阳，苏　宇，等. 单芯交流海缆不同接地方式下的损耗计算及对载流量的影响研究[J]. 高压电器，2018，54(10)：56-62.
Liu Ying，Xiao Yang，Su Yu，et al. Loss calculation and influence on ampacity of single-core AC submarine cable under different grounding modes[J]. High Voltage Apparatus，2018，54(10)：56-62.

[18] 齐明泽，庞　丹，于坤生，等. 单回路高压电缆金属护套最优分段比[J]. 东北电力大学学报(自然科学版)，2021，41(5)：119-125.
Qi Mingze，Pang Dan，Yu Kunsheng，et al. Optimal segmentation ratio of single-circuit high-voltage cable metal sheath[J]. Journal of Northeast Dianli University(Natural Science Edition)，2021，41(5)：119-125.

[19] 秦小安，冯　艳，万淑娟，等. 电缆金属护套环流计算分析[J]. 大众用电，2017(8)：44-45.
Qin Xiaoan，Feng Yan，Wan Shujuan，et al. Calculation and analysis of cable metal sheath circulation flow[J]. Popular Utilization of Electricity，2017(8)：44-45.

[20] Sheng H，Pei Y，Yang X，et al. Frequency tracking control for a capacitor-charging parallel resonant converter with phase-locked loop[C]//APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition，2007：1287-1292.

[21] 周　欣，夏向阳，夏君山，等. 基于护层电流构建新型判据的高压输电电缆在线监测[J]. 中国电力，2021，54(9)：45-54.
Zhou Xin，Xia Xiangyang，Xia Junshan，et al. On-line monitoring of HV transmission cables based on a new criterion established with sheath current[J]. Electric Power，2021，54(9)：45-54.

[22] 胡学良. 考虑中间井接地电阻的高压单芯电缆护套环流计算方法[J]. 电工技术，2008(6)：74-77.
Hu Xueliang. Calculation method of high-voltage single-core cable circulation considering the grounding resistance of intermediate wells[J]. Electric Engineering，2008(6)：74-77.

[23] Hanna M A，Chikhani A Y，Salama M M A. Thermal analysis of multi-layered soil-part 2：practical considerations[J]. IEEE Transactions on PowerDelivery，1993，8(3)：772-777.

[24] 杨健锐. 高压电缆金属护套环流分析[J]. 现代工业经济和信息化，2018，8(18)：134-135.
Yang Jianrui. Analysis of metal sheath circulation of high voltage cable[J]. Modern Industrial Economy and Informationization，2018，8(18)：134-135.

[25] 刘　博，郭　卫，及洪泉，等. 高压电缆外护层破损演进与护层环流相关性研究[J]. 电网与清洁能源，2025，41(5)：22-29.
Liu Bo，Guo Wei，Ji Hongquan，et al. A study on the correlation between damage evolution of outer protective layer and sheath circulation of high voltage cables[J]. Power System and Clean Energy，2025，41(5)：22 -29.

[26] 杨玉新，王劲松，朱永利，等. 海上风电单芯海缆接地环流影响因素分析[J]. 南方电网技术，2024，18(3)：56-64.
Yang Yuxin，Wang Jinsong，Zhu Yongli，et al. Analysis of influence factors on grounding circulating current of singlecore submarine cable of offshore wind power[J]. Southern Power System Technology，2024，18(3)：56-64.

[27] Sukhi Y，Jeyashree Y，Analysis and implementation of series parallel resonant converters for regulated power supply[J]. Joural of the Institution of Engineers India，2010，90(4)：18-22.

王雪佳(1998—)，女，硕士，主要研究方向为开关设备关断、绝缘性能及智能化(通信作者)(E-mail：1786266559@qq. com)。

(上接第127页)

nonlinear electrical response of a nano p - SiC/silicone rubber composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2010，17(6)：1687-1696.

[23] Ozawa K，Kumada A，Hidaka K，et al. Influence of temperature gradient on charge accumulation phenomena of GIS spacer under DC field[C]//2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics(ICD)，2018：1-4.

[24] Zhang Boya，Qi Zhe，Zhang Guixin. Thermal gradient effects on surface charge of HVDC spacer in gas insulated system[C]//2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP)，2016：703-706.

[25] 陈　新，李文鹏，李震宇，等. 高压直流XLPE绝缘材料及电缆关键技术展望[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1577-1585.
Chen Xin，Li Wenpeng，Li Zhenyu，et al. Prospect on key technology of the XLPE insulation materials and HVDC cables[J]. High Voltage Engineering，2020，46(5)：1577-1585.

[26] 万子剑，张　伟，谭　笑，等. 110 kV电缆附件EPDM绝缘的理化性能及电荷特性研究[J]. 高压电器，2026，62(3)：144-152.
Wan Zijian，Zhang Wei，Tan Xiao，et al. Study on physicochemical and charge characteristics of EPDM insulation for 110 kV cable accessories[J]. High Voltage Apparatus，2026，62(3)：144-152.

[27] 易姝慧，王亚林，吴建东，等. 不同界面状态的交联聚乙烯/三元乙丙橡胶双层介质电导特性研究[J]. 电气工程学报，2018，13(11)：71-78.
Yi Shuhui，Wang Yalin，Wu Jiandong，et al. Research on conduction characteristics of double - layered XLPE/EPDM with different interface states[J]. Journal of Electrical Engineering，2018，13(11)：71-78.

柳　杰(1995—)，男，博士，工程师，研究方向为电缆技术及新型电工材料(通信作者)(E-mail：372612677@qq.com)。

惠宝军(1988—)，男，博士，高级工程师，研究方向为电缆安全运行与诊断技术(E-mail：huibj@csg.cn)。