

# 同通道敷设多回单芯电缆金属 护套感应电压与环流计算模型研究

刘科<sup>1,2</sup> 张亮平<sup>2</sup> 温晓舫<sup>2</sup>

(1. 国网成都供电公司电力经济技术研究所 四川 成都 610041;

2. 四川锦能电力设计有限公司 四川 成都 610041)

**摘要:** 随着城市电缆通道资源的日益紧缺,多回电缆同通道敷设成为电缆线路建设和运行必然面对的问题。目前尚缺乏对多回单芯电缆线路同通道敷设时金属护套感应电压与环流进行研究。根据单芯电缆交叉互联单元的等值电路,分析了单回路电缆金属护套感应电压与环流的计算模型。结合电缆敷设的实际情况,考虑了线芯电流不平衡、交叉互联单元内段长和敷设间距以及排列方式不同等因素的影响,推导出多回电缆同通道敷设时金属护套感应电压与环流的计算模型。

**关键词:** 单芯电缆;交叉互联单元;感应电压;护套环流

**Abstract:** With the increasing shortage of cable channel resources in the cities, multi-circuit cables laying in the same cable channel is the inevitable problem in the construction and operation of cable lines. There is short of the researches on the calculation model of induced voltage and circulating current in metallic sheaths for multi-circuit cables laying in the same cable channel at present. According to the equivalent circuit of single-core cable with cross-bonding connection unit, the calculation model of induced voltage and circulating current in metallic sheaths is analyzed. In accordance with the actual situation of cable laying, the calculation model of induced voltage and circulating current in metallic sheaths of multi-loop cable laying in the same cable channel is deducted, considering the imbalance of conductor current and the influences of cross-bonding connection unit with different segment length, laying spacing and arrangement etc.

**Key words:** single-core cable; cross-bonding connection unit; induced voltage; circulating current in sheaths

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)01-0023-03

单芯电缆线路正常运行时,线芯电流产生的交变磁场将在电缆金属护套上产生感应电压,为保证维护人员的人身安全和电缆安全稳定运行,电缆线路的设计和运行规程中均对电缆金属护套感应电压的幅值做出限制。电缆采用交叉互联接地方式成为有效控制金属护套感应电压和环流的有效方法。但在电缆实际敷设过程中,由于现场条件的限制,交叉互联单元内各段电缆敷设方式和段长无法保证完全一致,从而时常出现金属护套感应电压和环流过大的现象。护套内产生的环流不仅造成能量损耗,还将影响电缆线路的载流量和电缆寿命。因此交叉互联单元内电缆金属护套感应电压与环流计算引起了设计和运行人员的高度关注<sup>[1-3]</sup>。当前关于同相并联单芯电缆、敷设间距和段长变化等对电缆护套感应电压与环流计算的影响,成为研究热点<sup>[4-10]</sup>。随着城市电缆通道资源的日益紧缺,多回路电缆同

通道敷设成为电缆线路建设和运行必然面对的问题,目前尚缺乏对多回路单芯电缆线路同通道敷设时产生金属护套感应电压与环流进行研究。下面从单回路电缆交叉互联单元等值电路出发,考虑电缆在一个完整的交叉互联单元内出现排列布置方式不同、段长不均匀以及多回电缆间相互影响等因素,推导出同通道敷设多回路单芯电缆金属护套感应电压与环流的计算模型。

## 1 单回路电缆感应电压与环流计算模型

### 1.1 等值电路图及参数说明

图1中参数说明:  $R_1$ 、 $R_2$  分别为护套首端和末端接地电阻的测量值,  $R_c$  为大地漏电阻,  $\Omega$ ;  $Z_{0i}$  为各段电缆护套的自阻抗 ( $i$  分别取 1、2、3, 对应交叉互联的第 1、2、3 段电缆),  $\Omega$ ;  $E_{SAi}$ 、 $E_{SBi}$ 、 $E_{SCi}$  为每段电缆线芯电流引起的感应电压,  $V$ ;  $E_{HAi}$ 、 $E_{HBi}$ 、 $E_{HCi}$  为每段

基金项目: 四川省电力公司 2015 年群众性创新科技项目  
(5219041406B9)

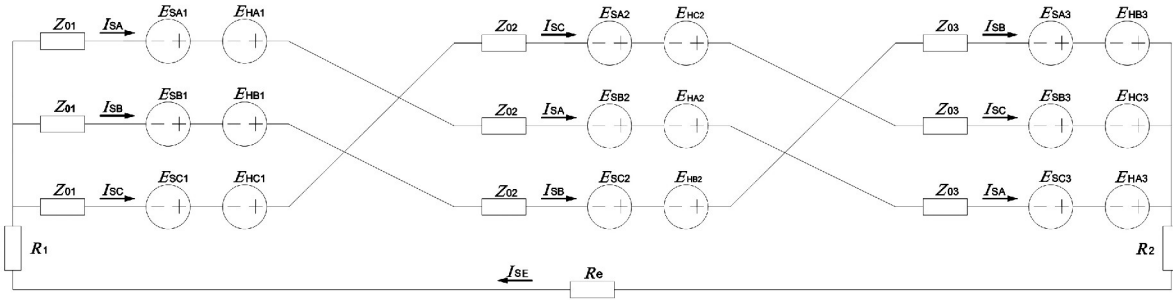


图1 单回电缆金属护套交叉互联单元等值电路图

电缆护套感应电流和大地漏电流引起的感应电压， $V$ ； $I_{SA}$ 、 $I_{SB}$ 、 $I_{SC}$ 分别为A、B、C三相金属护套感应电流； $I_{SE}$ 为大地漏电流。

$Z_{0i}$ 和 $R_e$ 的计算可参考文献[8]此处不再赘述。

### 1.2 线芯负荷电流引起的护套感应电压

对第*i*段电缆，设有 $n_i$ 种敷设方式，则A、B、C各相电缆线芯电流在金属护套上产生的感应电压分别为

$$\begin{cases} E_{SAi} = \sum_{p=1}^{n_i} U_{SAip} \times L_{ip} \\ E_{SBi} = \sum_{p=1}^{n_i} U_{SBip} \times L_{ip} \\ E_{SCi} = \sum_{p=1}^{n_i} U_{SCip} \times L_{ip} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $U_{SAip}$ 、 $U_{SBip}$ 、 $U_{SCip}$ 为第*i*段A、B、C三相电缆对应于第*p*种排列方式时对应的线芯电流产生的感应电势； $L_{ip}$ 为第*i*段电缆种的第*p*种排列方式时的电缆长度， $\mu\text{m}$ 。

$U_{SAip}$ 、 $U_{SBip}$ 、 $U_{SCip}$ 的计算可参考文献[8]，此处不再赘述。

### 1.3 护套感应电流与大地漏电流引起的感应电压

对第*i*段电缆，设其排列方式有 $n_i$ 种，则A、B、C各相电缆护套感应电流及大地漏电流引起的金属护套上感应电压分别为

$$\begin{cases} E_{HAi} = I_{SB} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{abip} \times L_{ip}) + I_{SC} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{acip} \times L_{ip}) - X_{he} \times I_{SE} \times L_i \\ E_{HBi} = I_{SA} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{abip} \times L_{ip}) + I_{SC} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{bcip} \times L_{ip}) - X_{he} \times I_{SE} \times L_i \\ E_{HCi} = I_{SA} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{acip} \times L_{ip}) + I_{SB} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{bcip} \times L_{ip}) - X_{he} \times I_{SE} \times L_i \end{cases} \quad (2)$$

式中： $X_{abip}$ 、 $X_{bcip}$ 、 $X_{acip}$ 分别为第*i*段电缆第*p*种排列方式时A相与B相、B相与C相、C相与A相护套的互感抗； $X_{he}$ 为大地电流对护套的互感抗， $\Omega$ ； $L_i$ 为

第*i*段电缆的段长， $\text{m}$ 。

$X_{abip}$ 、 $X_{bcip}$ 、 $X_{acip}$ 和 $X_{he}$ 的计算参照文献[8]，此处不再赘述。

### 1.4 护套环流计算

根据图1的等值电路可得出单回路电缆存在如下方程：

$$\begin{cases} (Z_{01} + Z_{02} + Z_{03}) I_{SA} - (E_{HA1} + E_{HA3} + E_{HA3}) + (R_1 + R_2 + R_e) I_{SE} = E_{SA1} + E_{SB2} + E_{SC3} \\ (Z_{01} + Z_{02} + Z_{03}) I_{SB} - (E_{HB1} + E_{HB3} + E_{HB3}) + (R_1 + R_2 + R_e) I_{SE} = E_{SB1} + E_{SC2} + E_{SA3} \\ (Z_{01} + Z_{02} + Z_{03}) I_{SC} - (E_{HC1} + E_{HC3} + E_{HC3}) + (R_1 + R_2 + R_e) I_{SE} = E_{SC1} + E_{SA2} + E_{SB3} \end{cases} \quad (3)$$

令式(3)中：

$$\begin{cases} E_{SA总} = E_{SA1} + E_{SB2} + E_{SC3} \\ E_{SB总} = E_{SB1} + E_{SC2} + E_{SA3} \\ E_{SC总} = E_{SC1} + E_{SA2} + E_{SB3} \end{cases} \quad (4)$$

结合式(3)和式(4)可以建立电缆金属护套感应电压与环流的矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SA} \\ I_{SB} \\ I_{SC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{SA总} \\ E_{SB总} \\ E_{SC总} \end{bmatrix} \quad (5)$$

上述矩阵中各系数分别为

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z_{01} + Z_{02} + Z_{03} + R_1 + R_2 + R_e + X_{he} (L_1 + L_2 + L_3) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Z_{ab} = Z_{ba} = & Z_{01} + Z_{02} + Z_{03} + R_1 + R_2 + R_e + X_{he} (L_1 + L_2 + L_3) \\ & - \left( \sum_{i=1}^{n_1} (X_{abi} \times L_{1i}) + \sum_{i=1}^{n_2} (X_{bc2i} \times L_{2i}) \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^{n_3} (X_{ac3i} \times L_{3i}) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Z_{ac} = Z_{ca} = & Z_{01} + Z_{02} + Z_{03} + R_1 + R_2 + R_e + X_{he} (L_1 + L_2 + L_3) \\ & - \left( \sum_{i=1}^{n_1} (X_{ac1i} \times L_{1i}) + \sum_{i=1}^{n_2} (X_{ab2i} \times L_{2i}) \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^{n_3} (X_{bc3i} \times L_{3i}) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$Z_{bc} = Z_{cb} = Z_{01} + Z_{02} + Z_{03} + R_1 + R_2 + R_e + X_{he} (L_1 + L_2 + L_3)$$

$$\begin{aligned}
 & - \left( \sum_{i=1}^{n_1} (X_{bc1i} \times L_{1i}) + \sum_{i=1}^{n_2} (X_{ac2i} \times L_{2i}) \right. \\
 & \left. + \sum_{i=1}^{n_3} (X_{ab3i} \times L_{3i}) \right) \quad (9)
 \end{aligned}$$

## 2 多回路电缆感应电压与环流计算模型

### 2.1 线芯负荷电流引起的护套感应电压

假设多回路电缆同通道敷设时, 每回电缆的第  $i$  段有  $n_i$  种敷设方式, 则 A、B、C 各相电缆线芯电流在金属护套产生的上感应电压的计算同式(1)所述。

### 2.2 多回路电缆敷设时护套感应电流、大地漏电流引起的感应电压

假设多回路电缆同通道敷设时, 每回电缆的第  $i$  段有  $n_i$  种敷设方式, 则每回电缆的 A、B、C 各相电缆护套感应电流及大地漏电流引起的金属护套感应电压分别为

$$\begin{aligned}
 E_{HA,i} &= I_{SB_t} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{a,b,ip} \times L_{ip} + I_{SC_t}) \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{a,c,ip} \times L_{ip}) \\
 & - X_{be_t} \times I_{SE_t} \times L_i^t \\
 & + \sum_{h=1, h \neq 1}^N (I_{SA_h} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{a,a,h,ip} \times L_{ip})) \\
 & + \sum_{h=1, h \neq 1}^N (I_{SB_h} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{a,b,h,ip} \times L_{ip})) \\
 & + \sum_{h=1, h \neq 1}^N (I_{SC_h} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{a,c,h,ip} \times L_{ip})) \\
 E_{HB,i} &= I_{SA_t} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{a,b,ip} \times L_{ip} + I_{SC_t}) \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{b,c,ip} \times L_{ip}) \\
 & - X_{be_t} \times I_{SE_t} \times L_i^t \\
 & + \sum_{h=1, h \neq 1}^N (I_{SA_h} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{b,a,h,ip} \times L_{ip})) \\
 & + \sum_{h=1, h \neq 1}^N (I_{SB_h} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{b,b,h,ip} \times L_{ip})) \\
 & + \sum_{h=1, h \neq 1}^N (I_{SC_h} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{b,c,h,ip} \times L_{ip})) \\
 E_{HC,i} &= I_{SA_t} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{a,c,ip} \times L_{ip} + I_{SB_t}) \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{b,c,ip} \times L_{ip}) \\
 & - X_{be_t} \times I_{SE_t} \times L_i^t \\
 & + \sum_{h=1, h \neq 1}^N (I_{SA_h} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{c,a,h,ip} \times L_{ip})) \\
 & + \sum_{h=1, h \neq 1}^N (I_{SB_h} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{c,b,h,ip} \times L_{ip})) \\
 & + \sum_{h=1, h \neq 1}^N (I_{SC_h} \times \sum_{p=1}^{n_i} (X_{c,c,h,ip} \times L_{ip}))
 \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $E_{HA,i}$ 、 $E_{HB,i}$ 、 $E_{HC,i}$  分别为同通道敷设的多回路电缆护套感应电压及大地漏电流在第  $t$  回电缆 A、B、C 三相电缆金属护套上产生的感应电压, V;  $X_{a,a,ip}$ 、

$X_{a,b,ip}$ 、 $X_{a,c,ip}$  分别对应第  $t$  回电缆 A 相在第  $i$  段电缆第  $p$  种排列方式时分别与第  $h$  回电缆的 A 相、B 相、C 相之间的互感抗, 回路其余相的表达式含义类似,  $\Omega$ ;  $L_i^t$  为第  $t$  回电缆在第  $i$  段的段长;  $N$  为同通道敷设回路数。

### 2.3 多回路电缆金属护套环流计算

多回路电缆通道敷设时, 根据式(4)和式(8)可得出  $N$  回电缆存在如下方程。

$$\begin{bmatrix} Z_{a_1a_1} & Z_{a_1b_1} & Z_{a_1c_1} & \cdots & Z_{a_1a_N} & Z_{a_1b_N} & Z_{a_1c_N} \\ Z_{a_1b_1} & Z_{b_1b_1} & Z_{b_1c_1} & \cdots & Z_{b_1a_N} & Z_{b_1b_N} & Z_{b_1c_N} \\ Z_{a_1c_1} & Z_{b_1c_1} & Z_{c_1c_1} & \cdots & Z_{c_1a_N} & Z_{c_1b_N} & Z_{c_1c_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{a_1a_N} & Z_{a_1b_N} & Z_{a_1c_N} & \cdots & Z_{a_Na_N} & Z_{a_Nb_N} & Z_{a_Nc_N} \\ Z_{a_1b_N} & Z_{b_1b_N} & Z_{b_1c_N} & \cdots & Z_{b_Na_N} & Z_{b_Nb_N} & Z_{b_Nc_N} \\ Z_{a_1c_N} & Z_{b_1c_N} & Z_{c_1c_N} & \cdots & Z_{a_Nc_N} & Z_{b_Nc_N} & Z_{c_Nc_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SA_1} \\ I_{SB_1} \\ I_{SC_1} \\ \vdots \\ I_{SA_N} \\ I_{SB_N} \\ I_{SC_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{SA_1总} \\ E_{SB_1总} \\ E_{SC_1总} \\ \vdots \\ E_{SA_N总} \\ E_{SB_N总} \\ E_{SC_N总} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: 第  $t$  ( $t=1, 2, 3, \dots, N$ ) 回电缆 A 相、B 相、C 相线芯电流产生的金属护套上感应电压  $E_{SA_t总}$ 、 $E_{SB_t总}$  和  $E_{SC_t总}$  的计算方式同式(4); 第  $t$  回电缆  $Z_{a,a,t}$ 、 $Z_{b,b,t}$ 、 $Z_{c,c,t}$  的计算方法同式(6);  $Z_{a,b,t}$  和  $Z_{b,a,t}$ 、 $Z_{a,c,t}$  和  $Z_{c,a,t}$ 、 $Z_{b,c,t}$  和  $Z_{c,b,t}$  的计算方法分别依次同式(7)~式(9)。

式(11)中第  $t$  回电缆与第  $h$  回电缆之间(其中  $t \neq h$ ) 的互阻抗的计算公式分别为

$$\begin{cases} Z_{a_t a_h} = Z_{a_h a_t} = \sum_{i=1}^3 \left( \sum_{p=1}^{n_i} (X_{a,a,h,ip} \times L_{ip}) \right) \\ Z_{a_t b_h} = Z_{b_h a_t} = \sum_{i=1}^3 \left( \sum_{p=1}^{n_i} (X_{a,b,h,ip} \times L_{ip}) \right) \\ Z_{a_t c_h} = Z_{c_h a_t} = \sum_{i=1}^3 \left( \sum_{p=1}^{n_i} (X_{a,c,h,ip} \times L_{ip}) \right) \\ Z_{b_t c_h} = Z_{c_h b_t} = \sum_{i=1}^3 \left( \sum_{p=1}^{n_i} (X_{b,c,h,ip} \times L_{ip}) \right) \end{cases} \quad (12)$$

对式(11)而言, 首先可以根据回路各相线芯电流计算出式(11)右边金属护套上的感应电压, 再根据高斯列主元素消去法即可求解出各回路电缆金属护套环流。

## 3 结 论

在城市电缆通道资源日益紧缺的条件下, 多回路电缆同通道敷设成为电缆线路建设与运行维护必然要面对的问题, 分析与控制通道内各回路电缆金属护套感应电压与环流, 成为电缆线路设计和运维人员重要的工作内容。 (下转第 72 页)

[6] 赵渊,张煦,杨清. 基于可靠性成本/效益分析的电网计划检修周期优化[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):54-59.

[7] Orfanos G A,Georgilakis P S,Hatziaargyriou N D. Transmission Expansion Planning of Systems with Increasing Wind Power Integration[J]. IEEE Trans. Power Syst., 2013,28(2):1355-1362.

[8] MCD Rochaa JT Saraivab. A Multiyear Dynamic Transmission Expansion Planning Model Using a Discrete Based EPSSO Approach[J]. Electric Power Systems Research, 2012(93):83-92.

[9] Garver L L. Transmission Network Estimation Using Linear Programming[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System,1970(7):1688-1697.

[10] Sánchez I G,Romero R,Mantovani J R S, et al. Transmission-expansion Planning Using the DC Model and Nonlinear-programming Technique[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.,2005,152(6):763-769.

[11] Rider M J,Garcia A V,Romero R. Power System Transmission Network Expansion Planning Using AC

Model[J]. IET Gener. Transm. Distrib.,2007,1(5):731-742.

[12] Choi J,Billinton R,Futuhi-Firuzabed M. Development of a New Nodal Effective Load Model Considering of Transmission System Element Unavailabilities[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.,2005,152(1):79-89.

[13] Romero R, Monticelli A, Garcia A, et al. Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.,2002,149(1):27-36.

[14] Jabr R A. Optimization of AC Transmission System Planning[J]. IEEE Trans. Power Syst., 2013,28(3):2779-2787.

[15] Löfberg J. YALMIP: A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB[C]. Proceedings of the CACSD Conference,2004,Taipei,Taiwan.

作者简介:

李成鑫(1976)博士,主要从事电网规划和主动配电网研究。

(收稿日期:2015-11-05)

(上接第25页)

首先根据电缆交叉互联单元的等值电路,分析了单回路电缆金属护套感应电压与环流的计算过程。结合电缆线路敷设的实际情况,推导出多回电缆同通道敷设时金属感应电压与环流的计算模型。在模型推到过程中,考虑了回路电缆线芯三相电流不平衡、交叉互联单元内各段段长和敷设间距以及排列方式变化等因素的影响。

所推导得出的计算模型为关于护套环流的常系数线性方程组,可以采用高斯列主元素消去法进行求解。

参考文献

[1] 牛海清,王晓兵,蚁泽沛,等. 110kV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.

[2] 张全胜,王和亮,周作春. 110kV XLPE 电缆金属护套交叉互联接地探讨[J]. 高电压技术,2005,31(11):71-73.

[3] 王敏. 10kV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.

[4] 贾欣,喻明. 三回路单芯电缆护套感应电势的计算[J]. 高电压技术,2000,26(5):61-62.

[5] 徐欣,陈彦. 单芯高压电力电缆金属护套感应电流的研究之一——感应电流的计算和预控[J]. 电线电缆,2010(5):42-46.

[6] 徐欣,陈彦. 单芯高压电力电缆金属护套感应电流的研究之二——计算程序的编制和应用[J]. 电线电缆,2010(6):34-37.

[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.

[8] 郑肇骧,王焜明. 高压电缆线路[M]. 北京:水利电力出版社,1983.

[9] 樊友兵,赵健康,钱康,等. 单芯电力电缆同相多根并联运行方式分析与优化[J]. 高电压技术,2010,36(10):2607-2612.

[10] 田金虎,刘渝根,赵俊光,等. 多回同相多根并联高压电力电缆电流分布及金属护套环流计算[J]. 高电压技术,2014,40(1):153-159.

作者简介:

刘科(1973)高级工程师,从事电力系统规划与设计方面的研究;

张亮平(1984)工程师,从事输电线路设计方面的研究;

温晓舫(1968)高级工程师,从事输电线路设计方面的研究。

(收稿日期:2015-12-07)