第 50 卷 第 2 期：765-775 高电压技术 Vol.50, No.2: 765-775
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220762

考虑泄漏电流及层间耦合的高压电缆金属护套环流计算与分析

赖胜杰[1,2]，夏成军[1,2]，池梓斌[1,2]，纪焕聪[1,2]，陈晓儒[3]，黄龙毅[3]
（1. 华南理工大学电力学院，广州 510640；2. 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室，广州 510663；3. 广东电网有限责任公司惠州供电局，惠州 516001）

摘　要：高压电缆线芯与金属护套间存在泄漏电流，当前护套环流的分析与计算中未准确计及其影响，为此提出了考虑泄漏电流及层间耦合的高压电缆金属护套环流计算方法。首先，建立了基于电缆双 π 集中参数模型的护套环流等值计算模型，在分析泄漏电流影响时，考虑线芯与护套、护套与护套之间的电磁感应作用；然后，运用叠加原理，推导了考虑泄漏电流及层间耦合的监测点与任意位置护套环流计算过程；最后，基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件，搭建了不同排列方式及段长组合下的仿真模型，并结合工程案例进行结果验证，在此基础上，分析了负荷电流、段长组合以及排列方式对护套环流的影响。结果表明：采用该方法所得环流与仿真值的误差大都在 1%以内，实例分析亦验证了其准确性；此外，工程中需注意轻载环流超标现象以及段长组合对护套环流的重要影响。以上方法及分析结果对电缆设计、运行监测、故障诊断与定位有一定的借鉴意义。

关键词：高压电缆；双 π 模型；交叉互联；层间耦合；泄漏电流；护套环流

Calculation and Analysis of Circulating Current in Metal Sheath for HV Cable Considering Leakage Current and Interlayer Coupling

LAI Shengjie[1,2], XIA Chengjun[1,2], CHI Zibin[1,2], JI Huancong[1,2], CHEN Xiaoru[3], HUANG Longyi[3]
(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Province New Energy Power System Intelligent Operation and Control Enterprise Key Laboratory, Guangzhou 510663, China; 3. Huizhou Power Supply Bureau, CSG Guangdong Power Grid Corporation, Huizhou 516001, China)

Abstract: There is leakage current between the core and the metal sheath in high voltage (HV) cables. The current analysis and calculation of sheath circulating current has not accurately accounted for its influence. Therefore, we propose a calculation method for circulating current of metal sheath in HV cables considering leakage current and interlayer coupling. Firstly, the equivalent calculation model of sheath circulating current based on the double π model of the cable with lumped parameter is established. When analyzing the effect of leakage current, the electromagnetic induction between the core and sheath and between different sheaths is considered. Then, the calculation process of sheath circulating current at the monitoring point and any position considering leakage current and interlayer coupling is deduced by the superposition principle. Finally, the simulation models under different arrangements and segment length combinations are built based on PSCAD/EMTDC, and calculation results are verified combined with an engineering cases. On this basis, the influences of load current, segment length combination and arrangement on circulating current of sheath are analyzed. The results show that the deviation between sheath circulating current obtained by this method and simulation value is mostly within 1% and the engineering case analysis also verifies its accuracy; in addition, attention should be paid to the phenomenon that circulating current exceeds the standard at light load and the important influence of segment length combination to sheath circulating current in projects. The above methods and analysis results have certain reference significance for cable design, operation detection, fault diagnosis and location.

Key words: HV cable; double π model; cross-bonding; interlayer coupling; leakage current; circulating current of sheath

基金资助项目：南方电网公司科技项目(031300KK52200003)；广东省重点领域研发计划(2019B111109001)。
Project supported by Science and Technology Project of Southern Power Grid Corporation (031300KK52200003), Key-area Research and Development Program of Guangdong Province (2019B111109001).

0 引言

随着城市电网的快速发展，高压电缆由于其占地面积小、供电可靠性高、利于城市美化等优点，在城市电网建设中得到了越来越广泛的应用[1-5]。但护套环流问题也随之而来，过大的护套环流会造成电缆过热，降低线芯的载流量，严重影响电缆的安全稳定运行[6]，工程上通常采用交叉互联接地方式来减小护套环流[7]。但由于电缆敷设方式多变、分段不均、外护套破损、交叉互联箱故障等情况难以避免，护套环流超标的情况仍时有发生，给电力系统运行埋下安全隐患[8]。因此，准确计算金属护套环流对了解高压电缆实际运行状况、开展故障诊断与定位分析工作具有十分重要的现实意义。

对于高压电缆护套环流的理论分析，已有不少学者做了相关研究。文献[9-11]分析了单回路交叉互联接地方式下护套感应电压及接地环流的计算。文献[12-14]研究了多回电缆线路中，金属护套环流的计算方法与特点。文献[15]通过对双回电缆金属护套环流的计算进行分析，研究了混合排列方式对双回路电缆护套环流的影响。文献[16-17]针对多回电缆同相并联运行工况，提出考虑各回电缆负荷电流分配不均问题的护套感应电压与护套环流的计算方法。以上文献从不同角度对单回路及多回路护套环流展开分析，但在护套环流的计算中均未考虑电缆线芯与金属护套间的泄漏电流作用，计算模型不够完善。实际上，对于 110 kV 以上的高压电缆，泄漏电流成分可达数安培每千米，且随电压等级的升高而增大，对护套环流影响较大[18-19]。文献[19-23]在计算护套环流时，考虑了电缆泄漏电流的作用，基于阻抗分流法计算泄漏电流在金属护套中的分布，但是忽略了线芯中的泄漏电流分量对护套的电磁感应作用，计算结果依然存在较大误差。同时，现有文献缺少对金属护套任意位置护套环流的分析与计算。

针对目前电缆金属护套环流计算上的不足，本文将泄漏电流作用纳入护套环流计算之中，此外，在分析泄漏电流影响时，计及线芯与护套、护套与护套之间的电磁感应作用，建立了基于电缆双 π 集中参数模型的金属护套环流等值计算模型。在该模型的基础上，提出了考虑泄漏电流及层间耦合的监测点与任意位置金属护套环流计算方法，并通过 PSCAD/EMTDC 软件仿真与现场实测数据，验证了本文所提模型与计算方法的准确性，在此基础上，研究了负荷电流、段长组合以及排列方式对护套环流的影响。

1 模型的建立

1.1 护套环流的组成

高压电缆通常为单芯结构，如图 1 所示。由于线芯与护套之间电磁感应作用的存在，当护套与大地构成闭合回路时，必然会产生感应电流。同时，电缆中还存在由线芯经主绝缘流向金属护套以及由金属护套经外护套流向大地的纵向电流，即泄漏电流[20]。泄漏电流包括容性和阻性成分，通常容性泄漏电流与护套感应电流同数量级(安培级)，而阻性泄漏电流只为毫安级，远远小于容性泄漏电流。故计算中可忽略阻性泄漏电流，即金属护套环流为感应电流与容性泄漏电流共同作用的结果。

1.2 泄漏电流对护套环流的影响

由图 1 可知，单芯电缆通常包含 2 层导体，采用双π模型可以准确表示线芯与金属护套之间的耦合关系[24]。由于护套环流计算属于稳态计算范畴，故采用双π集中参数模型来计及泄漏电流的影响。

图 2 为一段电缆的双 π 集中参数模型，由于阻性泄漏电流可忽略不计，故双 π 模型中不含电导。图中，R_c、L_c 分别为线芯总电阻和总电感；R_s、L_s

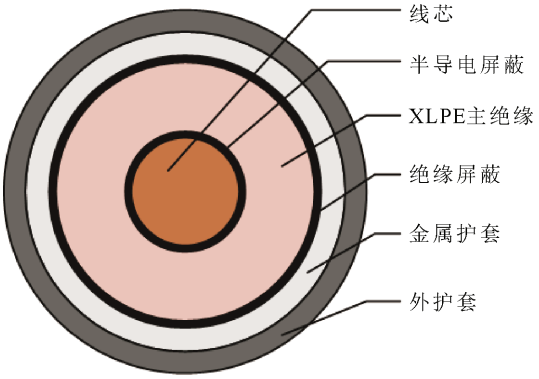


图 1 常见高压电缆结构

Fig.1 Common high voltage cable structure

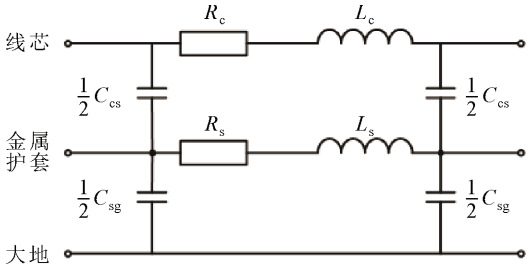


图 2 电缆双 π 集中参数模型

Fig.2 Double π model of cable with lumped parameter

分别为金属护套总电阻和总电感；C_{cs} 为线芯与金属护套间的总电容；C_{sg} 为金属护套对地总电容。

图 3 所示为交叉互联接地方式，各直接接地箱和交叉互联箱为护套环流监测点[25]。由于护套两端接地，金属护套与大地之间的电位差远远小于线芯与金属护套之间的电位差，故由金属护套经外护套流向大地的容性泄漏电流非常小，在计算中可以忽略。由此，可以得到三相电缆交叉互联接地系统的等效模型，如图 4 所示(图中的电感具有互感作用)，每个护套回路都由 3 个 π 型等效电路组成。

图 4 中，$\boldsymbol{U}_A$、$\boldsymbol{U}_B$、$\boldsymbol{U}_C$ 分别为三相线芯电压相量；$\boldsymbol{I}_A$、$\boldsymbol{I}_B$、$\boldsymbol{I}_C$ 分别为三相线芯负荷电流相量(下文中的电压和电流均为相量，不再赘述)；$\boldsymbol{I}_{sai}$、$\boldsymbol{I}_{sbi}$、$\boldsymbol{I}_{sci}$(i=1，2，3)为流过各护套回路第 i 段的总护套环流；$\boldsymbol{I}_{cai}$ 为 A 相第 i 段电缆两端等效电容的泄漏电流；$\boldsymbol{I}_{Lai}$ 为流过 A 相第 i 段电缆线芯的总电流(包括泄漏电流)；$\boldsymbol{I}_{g11}$、$\boldsymbol{I}_{g12}$、$\boldsymbol{I}_{g13}$ 与 $\boldsymbol{I}_{g21}$、$\boldsymbol{I}_{g22}$、$\boldsymbol{I}_{g23}$ 分别为左右两侧直接接地箱中的三相护套环流；$\boldsymbol{I}_{c11}$、$\boldsymbol{I}_{c12}$、$\boldsymbol{I}_{c13}$ 与 $\boldsymbol{I}_{c21}$、$\boldsymbol{I}_{c22}$、$\boldsymbol{I}_{c23}$ 分别为 2 个交叉互联箱中的三相护套环流；R_{d1}、R_{d2} 为护套两端接地电阻；R_{cai}、L_{cai} 分别为 A 相第 i 段电缆线芯的集中电阻和电感；R_{sai}、L_{sai} 分别为 A 相第 i 段电缆金属护套的集中电阻和电感；C_{ai} 为 A 相第 i 段电缆线芯与护套间的集中电容；B、C 两相其他参数含义与 A 相类似。其中，C_{ai}、C_{bi}、C_{ci}[19-20]的计算式为：

$$C_{ai}=C_{bi}=C_{ci}=C_0L_i=\frac{2\pi\varepsilon_r\varepsilon_0}{\ln\left((D_c+2\delta)/D_c\right)}L_i \quad (1)$$

式中：C_0 为单位长度电容；L_i 为第 i 段电缆长度；ε_r 为相对介电常数；ε_0 为真空介电常数；D_c 为线芯直径；δ 为主绝缘厚度。

则泄漏电流为：

$$\boldsymbol{I}_{cai}=\frac{1}{2}\mathrm{j}\omega C_{ai}\boldsymbol{U}_A \quad (2)$$

式中：j 为虚数单位；ω为角频率。

当电缆末端断开，相当于线芯负荷电流成分为 0，此时，流过电缆金属护套中的环流完全是由泄漏电流作用所产生。泄漏电流对护套环流的影响主要有 2 个方面：(1)线芯与护套间的泄漏电流通过阻抗分流作用，在各护套段上形成环流；(2)线芯中的泄漏电流通过电磁感应作用也会在各护套段上形成环流。这 2 部分环流都会通过金属护套之间的互感形

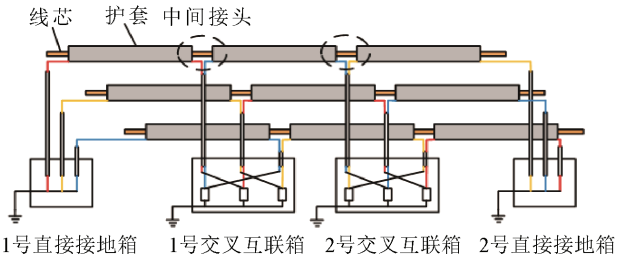


图 3 电缆交叉互联接地方式

Fig.3 Cross-bonding grounding method of cable

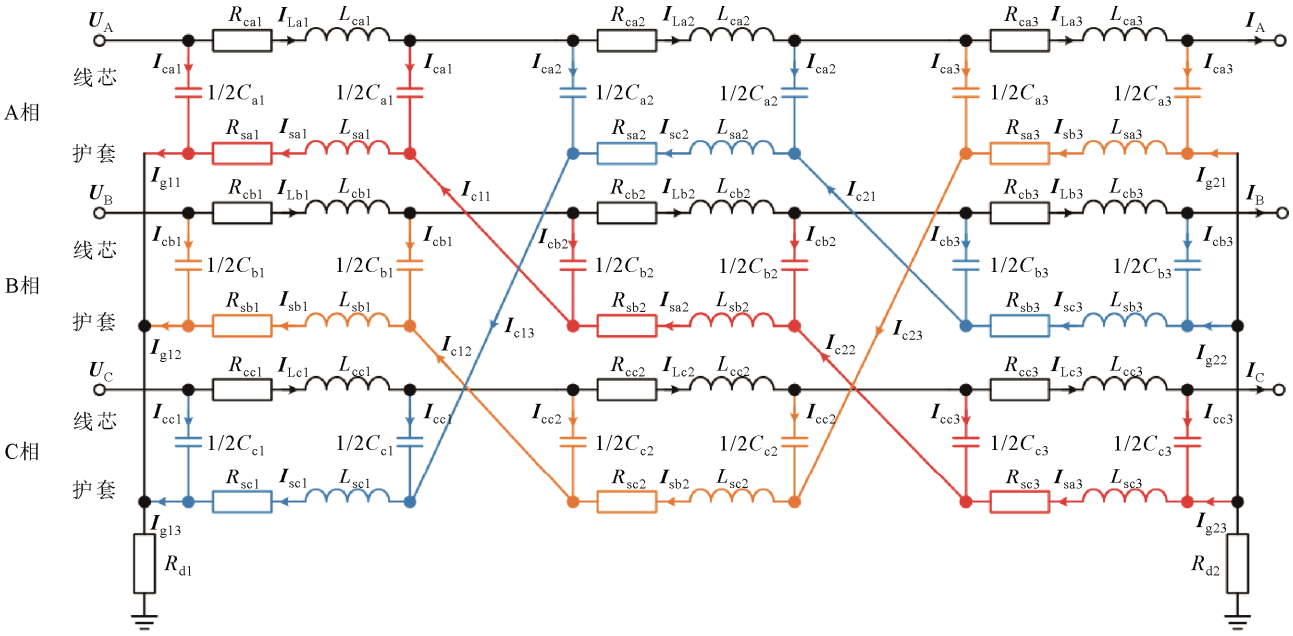


图 4 电缆交叉互联接地系统等效模型

Fig.4 Equivalent model of cable cross-bonding grounding system

成感应电压，进而产生新的环流，金属护套中的总环流即为上述环流的叠加。当电缆正常运行时，线芯中的电流包含负荷电流与泄漏电流，此时金属护套中的环流为线芯负荷电流与各泄漏电流共同作用产生。

1.3 护套环流等值计算模型

考虑到电缆长度不大，一条电缆首末端线芯电压相差很小，可认为整条电缆线芯电压等于首端线芯电压，故每段电缆线芯与护套间泄漏电流保持恒定，可等效为理想电流源。同时，流过电缆各段线芯中的电流以及各段护套环流在电磁感应作用下，会在金属护套中产生感应电压。由此，可得考虑泄漏电流及层间耦合的护套环流等值计算模型，如图 5 所示。

图 5 中，$\boldsymbol{E}_{ai}$、$\boldsymbol{E}_{bi}$、$\boldsymbol{E}_{ci}$(i=1，2，3)为图 4 各线芯中的电流在第 i 段金属护套上产生的感应电压；$\boldsymbol{U}_{ai}$、$\boldsymbol{U}_{bi}$、$\boldsymbol{U}_{ci}$ 分别为各相第 i 段金属护套上由其他相护套中的总护套环流所产生的感应电压；$\boldsymbol{Z}_{si}$ 为电缆第 i 段金属护套总阻抗；R_e 为大地等值电阻。

2 基于叠加原理的护套环流计算

2.1 监测点护套环流

由图 5 可知，最终流过 4 个监测点的护套环流为各电压源与电流源共同作用的结果。由于电流源的存在，直接按照常规回路电流法求解较为困难，本文采用叠加原理进行求解。分别求得仅在电流源及电压源作用时的护套环流，将所得结果叠加即可。其等值电路分别如图 6、图 7 所示。

图 6 中，$\boldsymbol{I}_{scai}$、$\boldsymbol{I}_{scbi}$、$\boldsymbol{I}_{scci}$(i=1，2，3)为电流源作用时各护套回路第 i 段的护套环流。图 7 中，$\boldsymbol{I}_{sca}$、$\boldsymbol{I}_{scb}$、$\boldsymbol{I}_{scc}$ 为电压源作用时各护套回路的护套环流；$\boldsymbol{U}'_{ai}$、$\boldsymbol{U}'_{bi}$、$\boldsymbol{U}'_{ci}$ 为图 6 中护套环流在金属护套上所产生的感应电压；$\boldsymbol{U}''_{ai}$、$\boldsymbol{U}''_{bi}$、$\boldsymbol{U}''_{ci}$ 为图 7 中护套环流在金属护套上所产生的感应电压，即 $\boldsymbol{U}_{ai}=\boldsymbol{U}'_{ai}+\boldsymbol{U}''_{ai}$，$\boldsymbol{U}_{bi}=\boldsymbol{U}'_{bi}+\boldsymbol{U}''_{bi}$，$\boldsymbol{U}_{ci}=\boldsymbol{U}'_{ci}+\boldsymbol{U}''_{ci}$。以下分别求解图 6 和图 7 中的护套环流。

仅在电流源作用时，考虑到护套两端接近地电位，且金属护套各段阻抗与段长成正比，则根据阻抗分流原则易得金属护套各段环流值，以 A-B-C 护套回路为例，有：

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_{sca1}=(\boldsymbol{I}_{ca1}+\boldsymbol{I}_{cb2})\dfrac{L_2+L_3}{L}+(\boldsymbol{I}_{cb2}+\boldsymbol{I}_{cc3})\dfrac{L_3}{L} \\ \boldsymbol{I}_{sca2}=-(\boldsymbol{I}_{ca1}+\boldsymbol{I}_{cb2})\dfrac{L_1}{L}+(\boldsymbol{I}_{cb2}+\boldsymbol{I}_{cc3})\dfrac{L_3}{L} \\ \boldsymbol{I}_{sca3}=-(\boldsymbol{I}_{ca1}+\boldsymbol{I}_{cb2})\dfrac{L_1}{L}-(\boldsymbol{I}_{cb2}+\boldsymbol{I}_{cc3})\dfrac{L_1+L_2}{L} \end{cases} \tag{3}$$

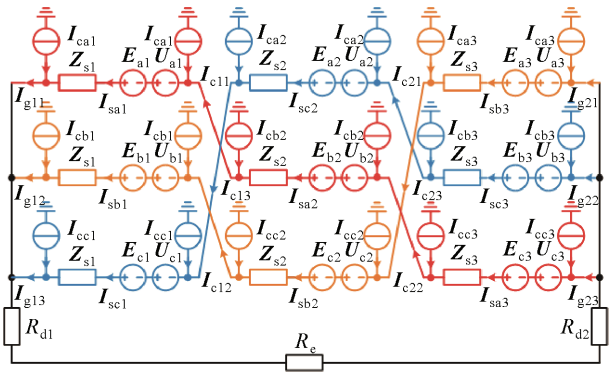


图 5 护套环流等值计算模型

Fig.5 Equivalent calculation model of circulating current in sheath

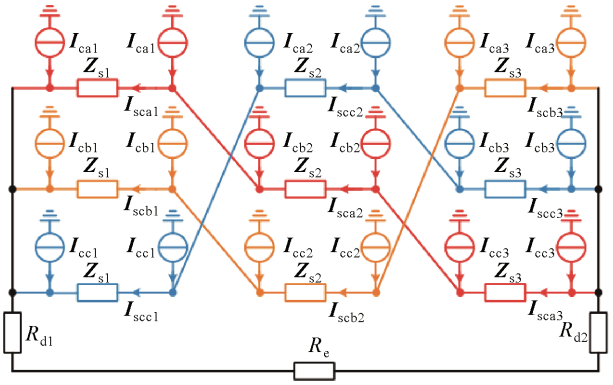


图 6 电流源作用时的等值电路

Fig.6 Equivalent circuit under the action of current sources

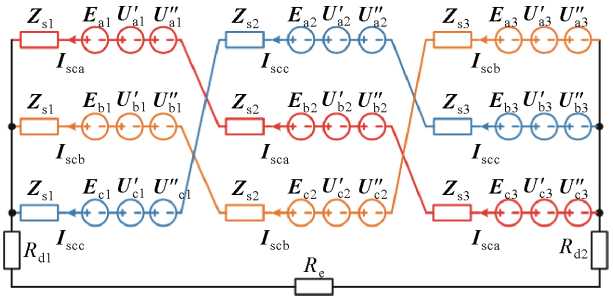


图 7 电压源作用时的等值电路

Fig.7 Equivalent circuit under the action of voltage sources

式中：L_1、L_2、L_3 分别为交叉互联各段长度；L 为 3 段总长。

仅在电压源作用时，可采用回路电流法进行分析。在常规求解中，每相线芯各段中的电流是不变的，而此处各段线芯电流不同，故 $\boldsymbol{E}_{ai}$、$\boldsymbol{E}_{bi}$、$\boldsymbol{E}_{ci}$ 求解有所区别。由图 4 易知 $\boldsymbol{I}_{La1}$、$\boldsymbol{I}_{La2}$、$\boldsymbol{I}_{La3}$ 为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_{La1}=\boldsymbol{I}_{ca1}+2\boldsymbol{I}_{ca2}+2\boldsymbol{I}_{ca3}+\boldsymbol{I}_{A} \\ \boldsymbol{I}_{La2}=\boldsymbol{I}_{ca2}+2\boldsymbol{I}_{ca3}+\boldsymbol{I}_{A} \\ \boldsymbol{I}_{La3}=\boldsymbol{I}_{ca3}+\boldsymbol{I}_{A} \end{cases} \tag{4}$$

同理，可得 B、C 两相各段线芯电流。根据电磁学理论，$\boldsymbol{E}_{ai}$、$\boldsymbol{E}_{bi}$、$\boldsymbol{E}_{ci}$，$\boldsymbol{U}'_{a1}$、$\boldsymbol{U}'_{a2}$、$\boldsymbol{U}'_{a3}$ 以及 $\boldsymbol{U}''_{a1}$、$\boldsymbol{U}''_{a2}$、$\boldsymbol{U}''_{a3}$ 的计算式为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{E}_{ai}=10^{-7}\omega\boldsymbol{I}_{Lai}L_i\left(\sqrt{3}\ln\dfrac{S_{ac}}{S_{ab}}+\mathrm{j}\ln\dfrac{S_{ab}S_{ac}}{R_{av}^2}\right)\\ \boldsymbol{E}_{bi}=10^{-7}\omega\boldsymbol{I}_{Lai}L_i\left(\sqrt{3}\ln\dfrac{S_{bc}}{R_{av}}-\mathrm{j}\ln\dfrac{S_{ab}^2}{S_{bc}R_{av}}\right)\\ \boldsymbol{E}_{ci}=10^{-7}\omega\boldsymbol{I}_{Lai}L_i\left(-\sqrt{3}\ln\dfrac{S_{bc}}{R_{av}}-\mathrm{j}\ln\dfrac{S_{ac}^2}{S_{bc}R_{av}}\right)\end{cases}\tag{5}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{U}'_{a1}=-\left(\mathrm{j}X_{ab}\boldsymbol{I}_{scb1}+\mathrm{j}X_{ac}\boldsymbol{I}_{scc1}\right)L_1\\ \boldsymbol{U}'_{a2}=-\left(\mathrm{j}X_{ab}\boldsymbol{I}_{sca2}+\mathrm{j}X_{ac}\boldsymbol{I}_{scb2}\right)L_2\\ \boldsymbol{U}'_{a3}=-\left(\mathrm{j}X_{ab}\boldsymbol{I}_{scc3}+\mathrm{j}X_{ac}\boldsymbol{I}_{sca3}\right)L_3\end{cases}\tag{6}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{U}''_{a1}=-\left(\mathrm{j}X_{ab}\boldsymbol{I}_{scb}+\mathrm{j}X_{ac}\boldsymbol{I}_{scc}\right)L_1\\ \boldsymbol{U}''_{a2}=-\left(\mathrm{j}X_{ab}\boldsymbol{I}_{sca}+\mathrm{j}X_{ac}\boldsymbol{I}_{scb}\right)L_2\\ \boldsymbol{U}''_{a3}=-\left(\mathrm{j}X_{ab}\boldsymbol{I}_{scc}+\mathrm{j}X_{ac}\boldsymbol{I}_{sca}\right)L_3\end{cases}\tag{7}$$

类似可得 $\boldsymbol{U}'_{bi}$、$\boldsymbol{U}'_{ci}$ 以及 $\boldsymbol{U}''_{bi}$、$\boldsymbol{U}''_{ci}$。式中：S_{ab}、S_{bc}、S_{ac} 分别为电缆 AB 相、BC 相、AC 相的相间距；R_{av} 为金属护套的几何平均半径；X_{ab}、X_{bc}、X_{ac} 为单位长度不同相金属护套间的互感抗。

根据 KVL，有如下矩阵方程：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{Z}_{11}&\boldsymbol{Z}_{12}&\boldsymbol{Z}_{13}\\ \boldsymbol{Z}_{21}&\boldsymbol{Z}_{22}&\boldsymbol{Z}_{23}\\ \boldsymbol{Z}_{31}&\boldsymbol{Z}_{32}&\boldsymbol{Z}_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{sca}\\ \boldsymbol{I}_{scb}\\ \boldsymbol{I}_{scc}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{E}_a+\boldsymbol{U}'_a\\ \boldsymbol{E}_b+\boldsymbol{U}'_b\\ \boldsymbol{E}_c+\boldsymbol{U}'_c\end{bmatrix}\tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{Z}_{11}=\boldsymbol{Z}_{22}=\boldsymbol{Z}_{33}=Z_{s1}+Z_{s2}+Z_{s3}+R_{d1}+R_{d2}+R_e$；$\boldsymbol{Z}_{12}=\boldsymbol{Z}_{21}=R_{d1}+R_{d2}+R_e-\mathrm{j}X_{ab}L_1-\mathrm{j}X_{bc}L_2-\mathrm{j}X_{ac}L_3$；$\boldsymbol{Z}_{13}=\boldsymbol{Z}_{31}=R_{d1}+R_{d2}+R_e-\mathrm{j}X_{ac}L_1-\mathrm{j}X_{ab}L_2-\mathrm{j}X_{bc}L_3$；$\boldsymbol{Z}_{23}=\boldsymbol{Z}_{32}=R_{d1}+R_{d2}+R_e-\mathrm{j}X_{bc}L_1-\mathrm{j}X_{ac}L_2-\mathrm{j}X_{ab}L_3$；$\boldsymbol{E}_a=\boldsymbol{E}_{a1}+\boldsymbol{E}_{b2}+\boldsymbol{E}_{c3}$；$\boldsymbol{U}'_a=\boldsymbol{U}'_{a1}+\boldsymbol{U}'_{b2}+\boldsymbol{U}'_{c3}$；$\boldsymbol{E}_b$、$\boldsymbol{U}'_b$、$\boldsymbol{E}_c$、$\boldsymbol{U}'_c$ 含义类似。求解式(8)即可得到 $\boldsymbol{I}_{sca}$、$\boldsymbol{I}_{scb}$、$\boldsymbol{I}_{scc}$。

实际上，在计算 $\boldsymbol{I}_{sca}$、$\boldsymbol{I}_{scb}$、$\boldsymbol{I}_{scc}$ 时，$\boldsymbol{U}'_a$、$\boldsymbol{U}'_b$、$\boldsymbol{U}'_c$ 所贡献的护套环流很小，本文忽略其影响，以下进行简要分析。

假设三相电缆采用品字排列，则各相金属护套之间的互感抗 X_{ab}、X_{bc}、X_{ac} 相等，那么根据式(3)以及 $\boldsymbol{U}'_{ai}$、$\boldsymbol{U}'_{bi}$、$\boldsymbol{U}'_{ci}$ 的表达式，可求得在任意段长组合下，$\boldsymbol{U}'_a$、$\boldsymbol{U}'_b$、$\boldsymbol{U}'_c$ 均恒等于 $\boldsymbol{0}$，即图 7 中的 $\boldsymbol{U}'_{ai}$、$\boldsymbol{U}'_{bi}$、$\boldsymbol{U}'_{ci}$ 没有贡献护套环流。虽然在电缆实际敷设中，还存在其他排列方式，如一字型和直角型，在这些非对称排列方式下，X_{ab}、X_{bc}、X_{ac} 不完全相等，但差别微小，在各种情况下式(8)中的 $\boldsymbol{U}'_a$、$\boldsymbol{U}'_b$、$\boldsymbol{U}'_c$ 对计算精度影响不大，可以忽略。

将 $\boldsymbol{I}_{scai}$、$\boldsymbol{I}_{scbi}$、$\boldsymbol{I}_{scci}$ 与 $\boldsymbol{I}_{sca}$、$\boldsymbol{I}_{scb}$、$\boldsymbol{I}_{scc}$ 叠加，即可求得考虑泄漏电流及层间耦合的总护套环流 $\boldsymbol{I}_{sai}$、$\boldsymbol{I}_{sbi}$、$\boldsymbol{I}_{sci}$。由 KCL 易得图 5 各直接接地箱和交叉互联箱中的护套环流，以 1 号直接接地箱为例，有：

$$\begin{cases}\boldsymbol{I}_{g11}=\boldsymbol{I}_{ca1}+\boldsymbol{I}_{sa1}\\ \boldsymbol{I}_{g12}=\boldsymbol{I}_{cb1}+\boldsymbol{I}_{sb1}\\ \boldsymbol{I}_{g13}=\boldsymbol{I}_{cc1}+\boldsymbol{I}_{sc1}\end{cases}\tag{9}$$

2.2 任意位置护套环流

第 2.1 小节分析了 4 个监测点的护套环流计算方法，本节进行三段金属护套中任意位置的护套环流计算。假设 X、Y、Z 分别为三段金属护套中的任意位置，如图 8 所示。图中，L_X、L_Y、L_Z 分别为 X、Y、Z 与本段金属护套首端之间的长度。为便于表述，将 L_X/L_1、L_Y/L_2、L_Z/L_3 定义为 X、Y、Z 的位置系数 α_X、α_Y、α_Z($0\le\alpha_X$、α_Y、$\alpha_Z\le1$)，利用位置系数可以表示 X、Y、Z 的具体位置。

以 X 处的护套环流计算为例，由于要求解金属护套内部的环流，则图 4 中的等效模型需作相应修改。在 X 处将第 1 段电缆一分为二，分别求出左右两段电缆的 型集中参数电路，第 2、3 段电缆处理方式不变，则每个护套回路由 4 个 π 型等效电路组成，图 5 中的计算模型也作相应修改，相当于每个护套回路增加了 2 个电流源。

同样采用叠加原理求解，对于电压源产生的护套环流，不管分成多少个 π 型等效电路，一个护套回路中所有电压源的总电压不变，故其区别在于电流源产生的分流，则 X 处护套环流求解公式为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{I}_{Xa}=\boldsymbol{I}_{sca}-\boldsymbol{I}_{ca1L}\dfrac{\alpha_X L_1}{L}+\boldsymbol{I}_{ca1R}\dfrac{L-\alpha_X L_1}{L}+\\ \quad\left(\boldsymbol{I}_{ca1R}+\boldsymbol{I}_{cb2}\right)\dfrac{L_2+L_3}{L}+\left(\boldsymbol{I}_{cb2}+\boldsymbol{I}_{cc3}\right)\dfrac{L_3}{L}\\ \boldsymbol{I}_{Xb}=\boldsymbol{I}_{scb}-\boldsymbol{I}_{cb1L}\dfrac{\alpha_X L_1}{L}+\boldsymbol{I}_{cb1R}\dfrac{L-\alpha_X L_1}{L}+\\ \quad\left(\boldsymbol{I}_{cb1R}+\boldsymbol{I}_{cc2}\right)\dfrac{L_2+L_3}{L}+\left(\boldsymbol{I}_{cc2}+\boldsymbol{I}_{ca3}\right)\dfrac{L_3}{L}\\ \boldsymbol{I}_{Xc}=\boldsymbol{I}_{scc}-\boldsymbol{I}_{cc1L}\dfrac{\alpha_X L_1}{L}+\boldsymbol{I}_{cc1R}\dfrac{L-\alpha_X L_1}{L}+\\ \quad\left(\boldsymbol{I}_{cc1R}+\boldsymbol{I}_{ca2}\right)\dfrac{L_2+L_3}{L}+\left(\boldsymbol{I}_{ca2}+\boldsymbol{I}_{cb3}\right)\dfrac{L_3}{L}\end{cases}\tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{I}_{Xa}$、$\boldsymbol{I}_{Xb}$、$\boldsymbol{I}_{Xc}$ 分别为 X 处 A、B、C 相的护套

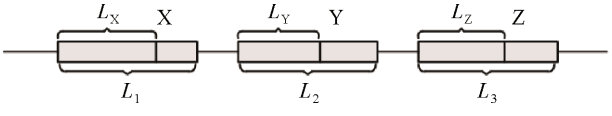


图 8 三段金属护套任意位置

Fig.8 Any position of the three-segment metal sheath

环流；$\dot{I}_{ca1L}$ 与 $\dot{I}_{ca1R}$ 分别为 X 左右两侧 A 相电缆 π 型等效电路的电容泄漏电流，且 $\dot{I}_{ca1L}=\alpha_X\dot{I}_{ca1}$，$\dot{I}_{cb1L}$、$\dot{I}_{cb1R}$、$\dot{I}_{cc1L}$、$\dot{I}_{cc1R}$ 含义类似。当α_X=0 时，所求即为 1 号直接接地箱处的护套环流；当α_X=1 时，所求为 1 号交叉互联箱处的护套环流。同理，可以求出 Y、Z 2 处的护套环流。

3 算例验证与分析

3.1 计算方法验证

为验证本文所提模型及计算方法的有效性，在 PSCAD/EMTDC 中分别搭建了水平排列、直角排列、品字排列的单回路电缆仿真模型，将本文方法计算值及现有方法计算值与仿真值进行对比。

PSCAD/EMTDC 中的电缆模型有 3 种类型：Bergeron 模型、频率相关模态域模型、频率相关相域模型，其中，频率相关相域模型在 3 种模型中具有最高精确度并具有良好的鲁棒性，故本文的电缆仿真模型采用频率相关相域模型。选用 YJLW03-64/110-1×800 型电缆，其参数如表 1 所示，按照表 1 中的参数在 PSCAD/EMTDC 中搭建电缆仿真模型(保留半导电屏蔽层)。

其他参数为：系统线电压为 110 kV，电缆线芯负荷电流为 200 A，金属护套两端接地电阻为 0.5 Ω，各种排列方式下的相间距如图 9 所示，图 9 中 3 种排列方式下，A 相电缆的埋地深度为 0.68 m。

由于电缆半导电屏蔽层的存在，利用式(1)计算线芯与金属护套间的等效电容时，需要稍加修改。半导电屏蔽层具有一定的导电性，且与线芯等电位，故可将半导电屏蔽层归为线芯的一部分[20]，即式(1)中的线芯外径修改为半导电屏蔽层外径。

首先，对监测点护套环流计算方法进行验证。改变交叉互联段的段长，得到不同段长组合下的仿真模型，限于篇幅，本文只列出了 2 种不同段长组合下的数据。表 2 为品字排列时各方法计算的监测

表 1 电缆仿真参数

Table 1 Cable simulation parameters

电缆参数	数值	电缆参数	数值
线芯外径/mm	34.2	金属护套内径/mm	78.6
半导电屏蔽层厚度/mm	2	金属护套外径/mm	82.6
绝缘厚度/mm	16	XLPE 相对介电常数	2.3
电缆外径/mm	94	大地电阻率/(Ω·m)	100
线芯电阻率/(Ω·m)	1.68×10^{-8}	护套电阻率/(Ω·m)	2.8×10^{-8}

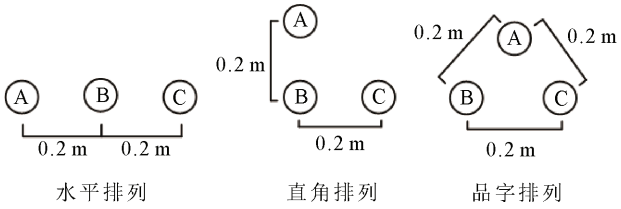


图 9 各种排列方式的相间距

Fig.9 Phase spacing of various arrangements

表 2 品字排列时各方法计算的监测点环流及仿真结果对比

Table 2 Comparison of circulating current at monitoring points calculated by various methods and simulation results when arranged in equilateral triangle

段长/m	采用方法	1 号直接接地箱			1 号交叉互联箱			2 号交叉互联箱			2 号直接接地箱		
		I_{g11}/A	I_{g12}/A	I_{g13}/A	I_{c11}/A	I_{c12}/A	I_{c13}/A	I_{c21}/A	I_{c22}/A	I_{c23}/A	I_{g21}/A	I_{g22}/A	I_{g23}/A
730、650、770	方法 1	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63	8.63
	方法 2	9.96	9.96	9.96	6.98	6.98	6.98	9.15	9.15	9.15	9.80	9.80	9.80
	方法 3	11.45	11.45	11.45	8.46	8.46	8.46	10.54	10.54	10.54	11.30	11.30	11.30
	仿真值	11.46	11.46	11.46	8.47	8.47	8.47	10.59	10.59	10.59	11.28	11.28	11.28
	方法 1 误差/%	24.69	24.69	24.69	1.89	1.89	1.89	18.51	18.51	18.51	23.49	23.49	23.49
	方法 2 误差/%	13.09	13.09	13.09	17.59	17.59	17.59	13.60	13.60	13.60	13.12	13.12	13.12
	方法 3 误差/%	0.09	0.09	0.09	0.12	0.12	0.12	0.47	0.47	0.47	0.18	0.18	0.18
700、700、700	方法 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	方法 3	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
	方法 4	3.08	3.08	3.08	0.88	0.88	0.88	2.23	2.23	2.23	3.08	3.08	3.08
	仿真值	3.07	3.07	3.07	0.87	0.87	0.87	2.23	2.23	2.23	3.07	3.07	3.07
	方法 1 误差/%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	方法 2 误差/%	44.63	44.63	44.63	95.40	95.40	95.40	23.77	23.77	23.77	44.63	44.63	44.63
	方法 3 误差/%	0.33	0.33	0.33	1.15	1.15	1.15	0	0	0	0.33	0.33	0.33

点护套环流与仿真结果对比，水平排列及直角排列的环流数据见附录 A 表 A1 和表 A2。

其中，方法 1 为文献[9-11]中不考虑泄漏电流的护套环流计算方法，方法 2 为文献[19-23]中仅考虑泄漏电流阻抗分流的护套环流计算方法，方法 3 为本文所提计算方法。表 2 中的误差数据均为各方法计算值与仿真值相对误差的绝对值，下文同理。

由表 2、表 A1 和表 A2 可知：

1）当电缆采用品字排列且 3 段等长时，采用方法 1 所得护套环流值为 0，说明此时护套环流中感应电流成分为 0，但仿真结果并不为 0，证明了护套环流中泄漏电流成分的存在，且不能忽略。

2）段长为 730、650、770 m 时，方法 1 计算各种排列方式下的护套环流，误差多在 20%~30%区间附近；方法 2 误差大都在 10%~20%之间；方法 2 误差大都在 1%以下。段长为 700、700、700 m 时，方法 1 与方法 2 所得各种排列方式下的护套环流误差都较大，方法 1 基本在 50%以上，方法 2 也多在 40%以上；而方法 3 的误差仍基本在 1%以内。由于方法 1 在计算护套环流时没有考虑泄漏电流的作用，所得同一护套回路的各段电流大小是恒定的，与实际情况不符。方法 2 考虑了泄漏电流的分流作用，与方法 1 相比有一定的改进，但是依然存在不小的误差。总体来看，方法 1 与方法 2 在分段较不均匀时，其相对误差尚在可接受范围，但在分段较为均匀时，其相对误差过大，存在一定的局限性。方法 3 在分段均匀与分段不均时计算各种排列方式下的护套环流，其相对误差均较小，验证了本文所提模型及监测点护套环流计算方法的准确性。

为验证任意位置护套环流计算方法的正确性，以 X 处护套环流计算为例，在水平排列、段长 730、650、770 m 条件下，计算了α_X为 0.4 和 0.8 时的护套环流，并与仿真结果进行对比，结果见表 3。

由表 3 可知，金属护套不同位置的环流不尽相同，利用本文方法计算金属护套任意位置的护套环流，其误差大都在 1%以内，验证了本文任意位置护套环流计算方法的准确性。

为进一步验证本文计算模型及方法的有效性，以下结合实际工程案例进行分析。

110 kV 熙卓甲线由 220 kV 熙龙站 GIS 终端至 110 kV 卓越站 GIS 终端，由 2 个完整的交叉互联系统组成，其中 1 个交叉互联系统 3 小段长度分别为 479、454、496 m。电缆型号为 FY-YJLW03-Z-64/110 kV-1×1200，线芯外径为 42.6 mm，半导电屏蔽层厚度为 2 mm，绝缘厚度为 16 mm，金属护套内径为 93.6 mm，金属护套外径为 98.2 mm，电缆外径为 110 mm。三相电缆采用水平排列，相间距为 0.3 m，现场测量的负荷电流为 7.9 A。以电缆一侧直接接地箱中护套环流的计算值及现场测量值为例进行分析，计算及测量结果记录在表 4 中。

由表 4 可知，采用本文模型与计算方法所得护套环流值与实际测量值更为接近，验证了本文模型及方法的有效性。但计算值与实测值之间仍有一定差距，主要是由于工程现场往往比较复杂，计算时一些参数通常会进行相应的简化(如大地电阻率、护套两端接地电阻等都是近似参数)，难以做到计算参数和工程现场高度一致。

3.2 护套环流分析与应用

3.2.1 负荷电流的影响

为了分析不同负荷电流下的护套环流变化特点，设置负荷电流在 10~300 A 范围内变化，以段长 730、650、770 m 为例，绘制了不同排列方式下最大环流比(即护套环流最大值与负荷电流的比值)随负荷电流的变化曲线图，如图 10 所示。

由图 10 可知，3 种排列方式下，最大环流比随着负荷电流的增大而减小，且变化率逐渐减小。当

表 3 不同位置环流计算结果及仿真结果对比

Table 3 Comparison of circulating current between calculation and simulation results at different locations

α_X	方法	I_{Xa}/A	I_{Xb}/A	I_{Xc}/A
0.4	本文计算值	7.78	12.99	11.08
	仿真值	7.93	13.08	11.10
	误差/%	1.89	0.69	0.18
0.8	本文计算值	6.60	11.78	9.86
	仿真值	6.57	11.83	9.85
	误差/%	0.46	0.42	0.10

表 4 环流计算值与工程现场测量值对比

Table 4 Comparison of circulating current between calculated and measured values in an engineering site

参数名称	直接接地箱		
	A 相	B 相	C 相
方法 1 计算值/A	0.13	0.26	0.19
方法 2 计算值/A	1.35	1.49	1.42
方法 3 计算值/A	2.79	2.55	2.45
测量值/A	2.20	2.20	2.20
方法 1 误差/%	94.09	88.18	91.36
方法 3 误差/%	38.64	32.27	35.45
方法 3 误差/%	26.82	15.91	11.36

负荷电流<50 A时，最大环流比均超过了相关标准[26]所规定的10%。由于随着负荷电流的减小，泄漏电流成分在护套环流中所占比重增大，故电缆线路轻载时，出现环流超出规定值的情况。

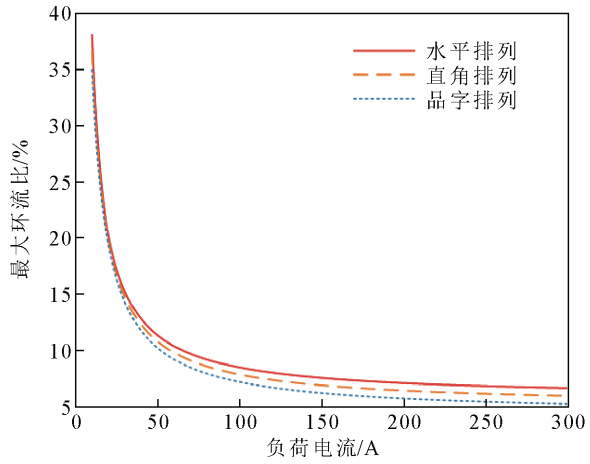


图 10 最大环流比随负荷电流的变化曲线

Fig.10 Variation curve of maximum circulating current ratio with load current

现有分析往往忽略泄漏电流的影响，计算所得的护套环流大小与负荷电流成正比，即最大环流比是定值，和负荷电流无关，与图中规律不相符。因此，在工程中不能仅通过环流比>10%来判断环流出现异常或电缆交叉互联系统出现故障，尤其轻载时，应结合护套环流计算结果与实际测量值的相对大小来进行综合判断。

3.2.2 段长组合与排列方式的影响

交叉互联电缆的段长组合有3种类型：3段段长都存在较大差异、2段段长接近而1段不等、3段段长都相近，且前2种段长类型存在多种组合方式。为研究电缆段长组合与排列方式对护套环流的影响，以A-B-C护套回路为例，绘制了各种排列方式及对应上述3种段长类型下护套不同位置的环流变化曲线，如图11所示。图中0—1表示第1段护套不同位置，1—2为第2段，2—3为第3段。

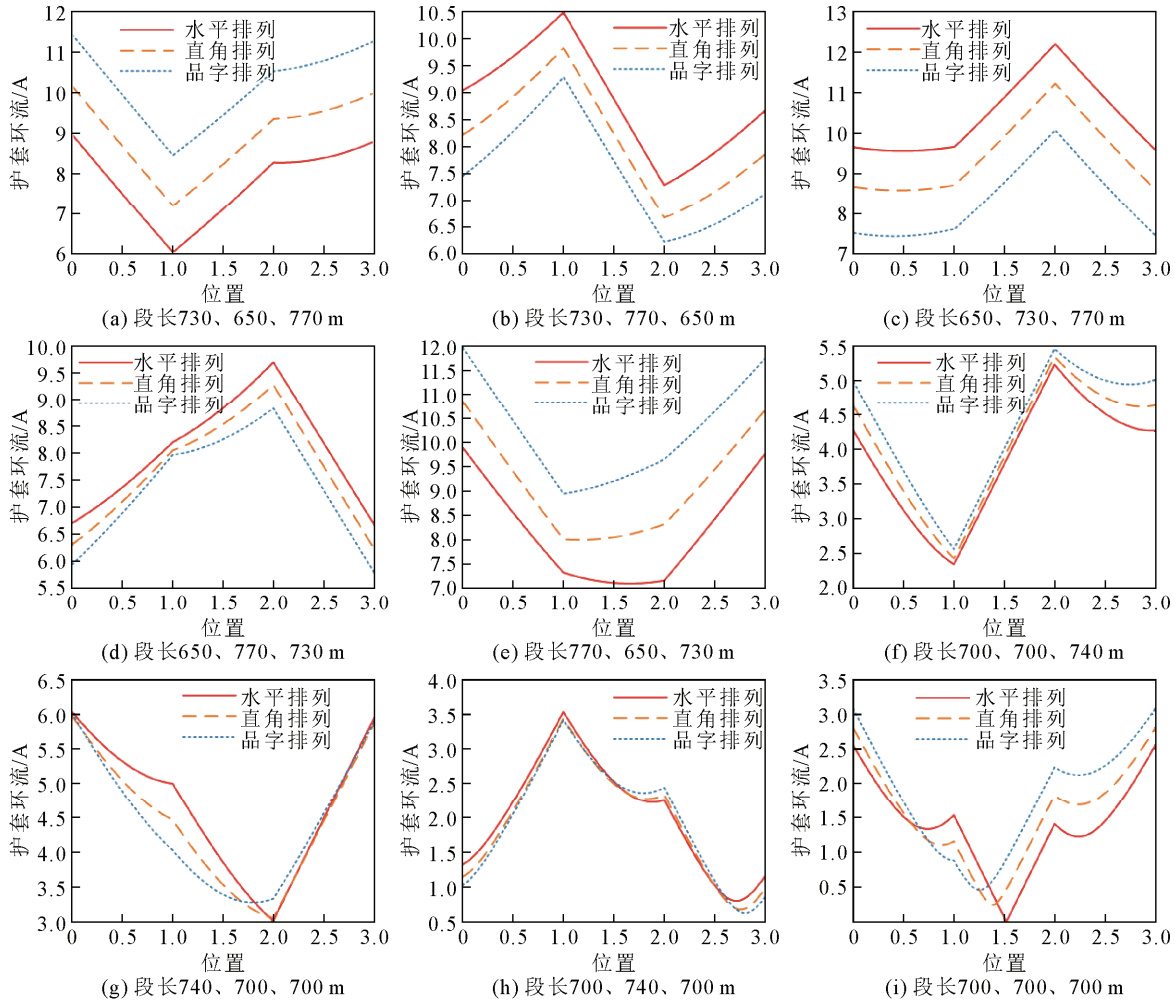


图 11 护套回路中不同位置的环流变化曲线

Fig.11 Circulating current curve at different positions in the sheath circuit

分析图 11 中的环流变化曲线，可知：

1）不同位置的环流大小及变化规律主要受段长组合的影响。在同样的排列方式下，分段不均时的护套环流远大于分段均匀时的环流，且不同段长组合下护套回路中的环流变化规律会有显著区别；而相同段长组合不同排列方式下，护套环流值相当，且环流变化规律相似，排列方式的影响程度相对更小。因此，在电缆实际敷设过程中，更重要的是提高分段的均匀性以减小护套环流。

2）电缆 1 段护套中的环流值为单调变化或先递减后递增，且分段越不均匀，其单调性越明显。因此，1 个护套回路中的环流最大值只出现在 4 个监测点处，而环流最小值可能出现在监测点或 1 段护套中间的某个位置，根据 4 个监测点处的环流值可以粗略确定 1 个护套回路中的环流分布情况。

3）当 3 段电缆段长类型固定而组合方式不同时(如图 11(a)—(e))，其环流大小也会有较大差异，电缆敷设设计时，如果工程现场有几种可选的段长组合方案，可对照图 11 中不同段长组合的环流相对大小，作为确定优化段长组合的辅助手段。

4 结论

1）电缆不同排列方式及段长情况下的仿真分析表明，泄漏电流会对护套环流计算产生较大影响，采用本文所提方法计算的护套环流准确性较高，与现有方法相比，计算精度有了较大提升，验证了本文方法的正确性。通过计算任意位置的护套环流，可准确掌握整个交叉互联系统的环流分布情况，为护套环流监测、故障精确诊断与定位工作提供参考。

2）电缆线路轻载时，因护套环流中泄漏电流成分的比重增大，会出现护套环流超出负荷电流 10%的情况，在工程中应结合护套环流计算结果与实际测量值的相对大小来综合判断环流是否异常或交叉互联系统是否存在故障。

3）护套回路中环流最大值出现在 4 个监测点处，而环流最小值可能出现在监测点或其他位置，根据监测点处的环流值可初步掌握护套环流分布情况。相较于排列方式，段长组合对护套环流的影响程度更大；电缆段长类型固定而组合方式不同，其环流大小也会有较大差异。在电缆设计中，应优先保证分段均匀性，由于环境限制无法做到 3 段等长时，应根据可选段长组合的环流相对大小来确定优化段长组合。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 李盛涛，王诗航，杨柳青，等. 高压电缆交联聚乙烯绝缘的关键性能与基础问题[J]. 中国电机工程学报，2022，42(11)：4247-4254.
LI Shengtao, WANG Shihang, YANG Liuqing, et al. Important properties and fundamental issues of the crosslinked polyethylene insulating materials used in high-voltage cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4247-4254.

[2] 梁振锋，李天婷，伍美娟，等. 架空–电缆混合线路自适应故障区段重合闸的研究[J]. 电网技术，2022，46(3)：1127-1134.
LIANG Zhenfeng, LI Tianting, WU Meijuan, et al. Research on adaptive fault section reclosing of overhead-cable hybrid line[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1127-1134.

[3] 廖雁群，袁　婧，徐小冰，等. 基于风险评估的高压电缆巡检周期优化模型[J]. 高电压技术，2021，47(1)：305-312.
LIAO Yanqun, YUAN Jing, XU Xiaobing, et al. Optimization model for risk-based maintenance scheduling of HV cable[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 305-312.

[4] 周　凯，饶显杰，汪先进，等. 基于距离的互相关算法在电力电缆局部放电定位中的应用[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2946-2954.
ZHOU Kai, RAO Xianjie, WANG Xianjin, et al. Application of distance-based cross-correlation algorithm in partial discharge location of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2946-2954.

[5] 瞿　科，张文海，肖先勇，等. 基于波形衰减因子的电缆接头绝缘早期故障状态监测[J]. 高电压技术，2022，48(1)：318-327.
QU Ke, ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, et al. Condition monitoring for incipient faults of cable joint insulation based on waveform attenuation factor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 318-327.

[6] 潘文霞，谢　晨，赵　坤，等. 计及护层环流的电缆温升分析与故障定位方法研究[J]. 电机与控制学报，2021，25(1)：38-45.
PAN Wenxia, XIE Chen, ZHAO Kun, et al. Cable temperature rise analysis and fault location considering sheath circulation[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(1): 38-45.

[7] 吴志祥，周　凯，何　珉. 高压电缆交叉互联系统的 3 种优化接地方案[J]. 电力科学与技术学报，2020，35(3)：135-140.
WU Zhixiang, ZHOU Kai, HE Min. Research on three optimized grounding schemes of HV cable cross connection system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 135-140.

[8] 方春华，郭凯歌，方　雯，等. 基于首末两端环流的电缆交叉互联箱缺陷识别定位方法[J]. 电力工程技术，2022，41(3)：64-71.
FANG Chunhua, GUO Kaige, FANG Wen, et al. Defect identification and location method of cable cross-bonded box based on head-end circulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 64-71.

[9] 王　波，罗进圣，黄宏新，等. 220 kV 高压单芯电力电缆金属护套环流分析[J]. 高压电器，2009，45(5)：141-145.
WANG Bo, LUO Jinsheng, HUANG Hongxin, et al. Analysis of circulating current in sheaths of 220 kV XLPE single-core cables[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 141-145.

[10] 杜伯学，李忠磊，张　锴，等. 220 kV 交联聚乙烯电力电缆接地电流的计算与应用[J]. 高电压技术，2013，39(5)：1034-1039.
DU Boxue, LI Zhonglei, ZHANG Kai, et al. Calculation and application of 220 kV crosslinked polyethylene power cable grounding current[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1034-1039.

[11] 王荣亮，王浩鸣，宗红宝，等. 高压电缆金属护套接地环流平衡抑制方法分析[J]. 电力系统及其自动化学报，2019，31(11)：108-114.

WANG Rongliang, WANG Haoming, ZONG Hongbao, et al. Analysis of suppression method for grounding circular current in metal sheath of high-voltage cable[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(11): 108-114.

[12] 鲁晓一，徐　伟. 多回路电缆护套交叉互联方式下的环流计算方法[J]. 电网与清洁能源，2017，33(6)：71-76.
LU Xiaoyi, XU Wei. Study on the method of circulation calculation for the cross connection of multi-loop cable sheath[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(6): 71-76.

[13] 邹宏亮，孙云莲，张　弛，等. 多回路电力电缆不同敷设方式对环流的影响[J]. 高电压技术，2016，42(8)：2426-2433.
ZOU Hongliang, SUN Yunlian, ZHANG Chi, et al. Effects of different multi-loop laying ways on circulating current of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2426-2433.

[14] 苑玉宽，李华春，任志刚，等. 双回并行敷设高压电缆零序护层电流计算及负荷相序优化方法[J]. 电瓷避雷器，2022(3)：123-132.
YUAN Yukuan, LI Huachun, REN Zhigang, et al. Calculation of zero-sequence sheath current and load-phase sequence optimization method for double-circuit parallel laying high-voltage cables[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3): 123-132.

[15] 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.

[16] 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.
TIAN Jinhu, LIU Yugen, ZHAO Junguang, et al. Circulating current in sheaths and current distribution on same-phase parallel multi-cable of multi-circuit power cable lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 153-159.

[17] 王雄伟，张　哲，尹项根，等. 多回单芯电力电缆并联运行护套感应电压的计算与分析[J]. 电力系统保护与控制，2015，43(22)：77-84.
WANG Xiongwei, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Calculation and analysis of sheath induced voltage for multi-circuit single-core power cable lines in parallel[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 77-84.

[18] 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.

[19] 杨　静，朱晓岭，董　翔，等. 基于护层电流的高压电缆故障在线监测和诊断[J]. 高电压技术，2016，42(11)：3616-3625.
YANG Jing, ZHU Xiaoling, DONG Xiang, et al. On-line monitoring and diagnosis of HV cable faults based on sheath currents[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3616-3625.

[20] 朱宁西，杨　帆，刘　刚. 高压电缆金属护套多点接地情况下的环流模型及参数计算[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2018，46(10)：15-23，49.
ZHU Ningxi, YANG Fan, LIU Gang. Sheath currents model and parameter calculation method on high voltage cable sheath multipoint grounding[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(10): 15-23, 49.

[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)：45-54，118.
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, 118.

[22] 李　根，王　航，刘海康，等. 基于逻辑回归的高压电缆交叉互联接地系统缺陷分类识别方法[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3674-3683.
LI Gen, WANG Hang, LIU Haikang, et al. Classification and identification method of grounding system defects in cross-bonded HV cables based on logistic regression[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3674-3683.

[23] DONG X, YANG Y, ZHOU C K, et al. Online monitoring and diagnosis of HV cable faults by sheath system currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2281-2290.

[24] 袁　超，储海军，陈燕擎，等. 考虑金属护层耦合的高压电缆单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(2)：115-120.
YUAN Chao, CHU Haijun, CHEN Yanqing, et al. Single phase ground fault location method for high voltage cables considering the metal sheath coupling[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 115-120.

[25] 聂永杰，赵现平，李盛涛. XLPE 电缆状态监测与绝缘诊断研究进展[J]. 高电压技术，2020，46(4)：1361-1371.
NIE Yongjie, ZHAO Xianping, LI Shengtao. Research progress in condition monitoring and insulation diagnosis of XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1361-1371.

[26] 国家能源局. 电力设备预防性试验规程：DL/T 596—2021[S]. 北京：中国电力出版社，2021.
National Energy Administration. Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596—2021[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2021.



赖胜杰
1995—，男，硕士生
主要研究方向为电力系统分析运行与控制、电力电缆等
E-mail: 2646240770@qq.com

LAI Shengjie



夏成军(通信作者)
1974—，男，博士，副教授，硕导
主要研究方向为电力系统分析运行与控制、HVDC 和 FACTS 等
E-mail: cjxia@scut.edu.cn

XIA Chengjun
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2022-05-25　修回日期　2022-12-10　　编辑　程子丰

附录 A

表 A1　水平排列时各方法计算的监测点环流及仿真结果对比

Table A1　Comparison of circulating current at monitoring points calculated by various methods and simulation results when arranged horizontally

段长/m	采用方法	1 号直接接地箱			1 号交叉互联箱			2 号交叉互联箱			2 号直接接地箱		
		I_{g11}/A	I_{g12}/A	I_{g13}/A	I_{c11}/A	I_{c12}/A	I_{c13}/A	I_{c21}/A	I_{c22}/A	I_{c23}/A	I_{g21}/A	I_{g22}/A	I_{g23}/A
730、650、770	方法 1	5.95	11.56	9.39	5.95	11.56	9.39	9.39	5.95	11.56	11.56	9.39	5.95
	方法 2	7.13	12.95	10.89	4.29	9.94	7.83	9.62	6.77	11.93	12.80	10.79	6.94
	方法 3	8.97	14.21	12.30	6.02	11.17	9.25	11.07	8.28	13.08	14.07	12.19	8.80
	仿真值	9.07	14.28	12.33	6.14	11.25	9.29	11.13	8.32	13.17	14.14	12.21	8.88
	法 1 误差/%	34.40	19.05	23.84	3.09	2.76	1.08	15.63	28.49	12.22	18.25	23.10	33.00
	法 2 误差/%	21.39	9.31	11.68	30.13	11.64	15.72	13.57	18.63	9.42	9.48	11.63	21.85
	法 3 误差/%	1.10	0.49	0.24	1.95	0.71	0.43	0.54	0.48	0.68	0.50	0.16	0.90
700、700、700	方法 2	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
	方法 3	1.19	2.92	1.84	2.92	1.84	1.19	2.92	1.84	1.19	2.92	1.84	1.19
	方法 4	2.55	4.25	3.19	1.53	2.27	0.62	3.55	1.41	2.23	4.25	3.19	2.55
	仿真值	2.54	4.23	3.18	1.51	2.26	0.62	3.53	1.41	2.22	4.23	3.18	2.54
	法 1 误差/%	50.79	70.45	60.69	17.22	44.69	101.61	64.59	11.35	43.69	70.45	60.69	50.79
	法 2 误差/%	53.15	30.97	42.14	93.38	18.58	91.94	17.28	30.50	46.40	30.97	42.14	53.15
	法 3 误差/%	0.39	0.47	0.31	1.32	0.44	0	0.57	0	0.45	0.47	0.31	0.39

表 A2　直角排列时各方法计算的监测点环流及仿真结果对比

Table A2　Comparison of circulating current at monitoring points calculated by various methods and simulation results when arranged in a right angle

段长/m	采用方法	1 号直接接地箱			1 号交叉互联箱			2 号交叉互联箱			2 号直接接地箱		
		I_{g11}/A	I_{g12}/A	I_{g13}/A	I_{c11}/A	I_{c12}/A	I_{c13}/A	I_{c21}/A	I_{c22}/A	I_{c23}/A	I_{g21}/A	I_{g22}/A	I_{g23}/A
730、650、770	方法 1	7.21	10.13	9.01	7.21	10.13	9.01	9.01	7.21	10.13	10.13	9.01	7.21
	方法 2	8.49	11.50	10.44	5.56	8.50	7.40	9.37	7.87	10.58	11.34	10.32	8.31
	方法 3	10.17	12.86	11.90	7.20	9.85	8.87	10.81	9.36	11.84	12.72	11.77	10.01
	仿真值	10.20	12.94	11.90	7.24	9.94	8.88	10.80	9.40	11.93	12.79	11.78	10.03
	法 1 误差/%	29.31	21.72	24.29	0.41	1.91	1.46	16.57	23.30	15.09	20.80	23.51	28.12
	法 2 误差/%	16.76	11.13	12.27	23.20	14.49	16.67	13.24	16.28	11.32	11.34	12.39	17.15
	法 3 误差/%	0.29	0.62	0	0.55	0.91	0.11	0.09	0.43	0.75	0.55	0.08	0.20
700、700、700	方法 1	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
	方法 2	1.32	2.30	1.66	2.30	1.66	1.32	2.30	1.66	1.32	2.30	1.66	1.32
	方法 3	2.81	3.65	3.04	1.16	1.57	0.18	2.87	1.82	2.10	3.65	3.04	2.81
	仿真值	2.80	3.64	3.05	1.14	1.57	0.17	2.86	1.83	2.10	3.64	3.05	2.80
	法 1 误差/%	77.86	82.97	79.67	45.61	60.51	264.71	78.32	66.12	70.48	82.97	79.67	77.86
	法 2 误差/%	52.86	36.81	45.57	101.75	5.73	676.47	19.58	9.29	37.14	36.81	45.57	52.86
	法 3 误差/%	0.36	0.27	0.33	1.75	0	5.88	0.35	0.55	0	0.27	0.33	0.36