

高压电缆护套环流泄漏电流分量的分析与计算

陈晓儒¹, 黄龙毅¹, 赖胜杰², 杨明嘉², 王泽青², 夏成军^{2,3}

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东惠州 516001;

2. 华南理工大学电力学院, 广东广州 510640;

3. 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室, 广东广州 510663)

摘要: 高压电缆金属护套环流是感应电流分量与泄漏电流分量的叠加, 目前, 感应电流分量计算较为成熟, 而泄漏电流分量的计算存在不足, 影响最终环流计算结果与相关故障诊断效果。为此, 提出了高压电缆护套环流泄漏电流分量的计算方法。以电缆“线芯—护套”的 π 型等效电路为基础, 建立了求解护套环流泄漏电流分量的等值电路, 同时计及泄漏电流的分流作用与线芯泄漏电流所产生的环流, 基于迭代法得到最终的泄漏电流分量。利用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 搭建了一字型敷设的电缆模型, 结果表明: 在不同段长组合及负荷电流下, 该方法计算结果与仿真值的相对误差在 2% 以内, 相较于现有方法, 准确性有较大提高。所提方法可以较好地解释轻载时出现环流超标的原因; 对交叉互联系统故障诊断样本数据的生成有一定的参考作用。

关键词: 高压电缆; 交叉互联; 护套环流; 感应电流分量; 泄漏电流分量

中图分类号: TM247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24621

Analysis and Calculation for Leakage Current Component of Circulating Current in High Voltage Cable Sheath

CHEN Xiaoru¹, HUANG Longyi¹, LAI Shengjie², YANG Mingjia², WANG Zeqing², XIA Chengjun^{2,3}

(1. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Limited Liability Company, Huizhou 516001,

Guangdong, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology,

Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. Guangdong Province' New Energy

Power System Intelligent Operation and Control Enterprise Key

Laboratory, Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: The circulating current of metal sheath in high voltage cable is the superposition of induced current component and leakage current component. At present, the calculation of induced current component is relatively mature, but the calculation of leakage current component is insufficient, which affects the final circulating current calculation result and the related fault diagnosis effect. For this reason, a calculation method for leakage current component of sheath circulating current in high voltage cable was proposed. Based on the π -type equivalent circuit of "core—sheath", an equivalent circuit for solving leakage current component of sheath circulating current was established, which take into account the shunting effect of leakage current and circulating current generated by leakage current of cable core. The final leakage current component was obtained based on the iterative method. A cable model with a linear arrangement was built using ATP-EMTP software. The results show that the relative deviation between calculation result and simulation value of this method is within 2% under different length combinations and load currents, compared with existing method, the accuracy is greatly improved. This method can better explain the reason of excessive circulating current at light load, and has a certain reference for the generation of sample data for fault diagnosis of cross-connected systems.

Key words: high voltage cable; cross-bonding; circulating current of sheath; induced current component; leakage current component

基金项目: 南方电网公司科技项目(031300KK52200003)

作者简介: 陈晓儒(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, Email: 13927334330@139.com

近年来,高压电缆在城市电网得到广泛使用,护套环流问题也日渐突出^[1-3]。金属护套环流为线芯负荷电流与泄漏电流共同作用所产生^[4],护套环流会导致线芯载流量降低、电能损耗增加、绝缘老化等一系列问题,给电力系统安全稳定运行造成威胁^[5-7]。虽然交叉互联系统可以减小护套环流^[8-10],但由于施工以及各种故障的影响,护套环流超标的情况难以避免。因此,开展高压电缆护套环流的计算分析具有重要的意义。

文献[11]推导了单回路交叉互联系统的护套环流计算公式,并分析了三段电缆布置方式不一致对护套环流的影响。文献[12]建立了单回路交叉互联接地的护套环流计算模型,提出通过分析护套环流与测量值之间的差值可以判断电缆系统是否存在缺陷或故障。文献[13]研究了四回路电缆同沟敷设情形下,金属护套环流的计算方法。文献[14]建立了隧道八回路电缆的护套环流计算模型,以品字形和水平敷设为例,分析了电缆相间距与回路间距对护套环流的影响。文献[15]针对同相多根电缆并联运行电流分配不均问题,提出了相应的护套环流计算方法。以上文献计算的护套环流均为线芯负荷电流作用下的感应电流分量,而并未考虑泄漏电流分量的影响,会给护套环流的计算带来一定的误差。现场运行经验表明:当负荷电流较小时,会出现金属护套环流与负荷电流之比超过10%的现象。按照上述护套环流计算理论,护套环流与负荷电流成正比,无法解释轻载环流超标现象。部分学者对泄漏电流作用下的护套环流计算展开研究,文献[16-19]将交叉互联各段的泄漏电流等效为电流源,利用阻抗分流原则计算护套环流中的泄漏电流分量,然后基于计算模型所得的环流样本数据进行特征分析来实现交叉互联系统故障诊断。虽然考虑了泄漏电流的分流,但忽略了线芯中的泄漏电流对护套环流的贡献,其计算模型依然不够完善,影响护套环流的最终计算结果与故障诊断效果。

针对现有护套环流泄漏电流分量计算的不足,本文以交叉互联接地方式为例,在分析泄漏电流的作用时,同时考虑泄漏电流的分流及线芯中的泄漏电流影响,提出了高压电缆护套环流泄漏电流分量计算方法,并通过电磁暂态仿真软件ATP-EMTP进行仿真分析,验证了所提方法的准确性。

1 护套环流分析

高压电缆通常包含两层导体,即线芯与金属护套,导体中间是交联聚乙烯(cross linked polyethylene, XLPE)绝缘层。一方面,由于电磁感应现象,线芯负荷电流激发的交变磁场会在金属护套中产生感应电压,当护套两端接地时,便会形成接地环流,这是护套环流中的感应电流分量。另一方面,线芯—绝缘—金属护套的结构可以等效为圆柱形电容器^[20],正常运行时,电缆中还存在由线芯经主绝缘流至金属护套的泄漏电流,在泄漏电流作用下,金属护套环流中存在泄漏电流分量。虽然金属护套与大地之间也存在泄漏电流,但由于护套两端接地,这部分泄漏电流极小,可忽略不计。

泄漏电流包括容性和阻性成分,相对于容性泄漏电流,阻性泄漏电流的影响可忽略^[16]。目前,护套环流感应电流分量的计算方法已较为成熟,本文主要分析护套环流中泄漏电流分量的计算。

为了准确反映泄漏电流对护套环流的影响,需建立包含线芯和金属护套的等值模型。图1所示为电缆一交叉互联小段的“线芯—护套” π 型等效电路(忽略电导)。图中, R_c, L_c 为该段电缆线芯的总电阻和总电感; R_s, L_s 为护套的总电阻和总电感; C_{cs} 为线芯与金属护套间的总电容的1/2。

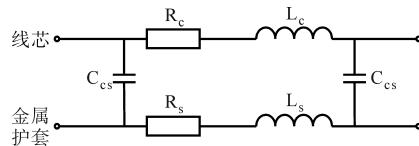


图1 “线芯—护套” π 型等效电路

Fig.1 π -type equivalent circuit of "core—sheath"

电容 C_{cs} 中的泄漏电流 I_{cs} 为

$$I_{cs} = j\omega C_{cs} U \quad (1)$$

式中: U 为线芯相电压; ω 为角频率。

I_{cs}, U 均为矢量,包含幅值和相角,下文中的电压、电流、阻抗均为矢量,不再赘述。 C_{cs} 可以由下式确定^[4]:

$$C_{cs} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(D_x/D_c)} \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为相对介电常数; D_c 为线芯外径; D_x 为绝缘层外径。

基于上述“线芯—护套” π 型等效电路,可以得到整个交叉互联系统的等效电路,图2所示为A-B-C回路的等效电路,其他两个回路类似。

图2中, $R_{ci}, L_{ci}, R_{si}, L_{si} (i=1, 2, 3)$ 分别为第 i 段电缆中的线芯电阻、电感和护套电阻、电感; C_{csi} 为各段电缆线芯与护套之间的电容; I_{csa1}, I_{csa2} 为 A 相第 1 段电缆两端电容的泄漏电流; I_{csb3}, I_{csb4} 为 B 相第 2 段电缆两端电容的泄漏电流; I_{csc5}, I_{csc6} 为 C 相第 3 段电缆两端电容的泄漏电流; U_A, U_B, U_C 为三相线芯电压; I_{a1}, I_{b2}, I_{c3} 为三段电缆线芯中的泄漏电流; R_1, R_2 为各护套回路两端的共同接地电阻。

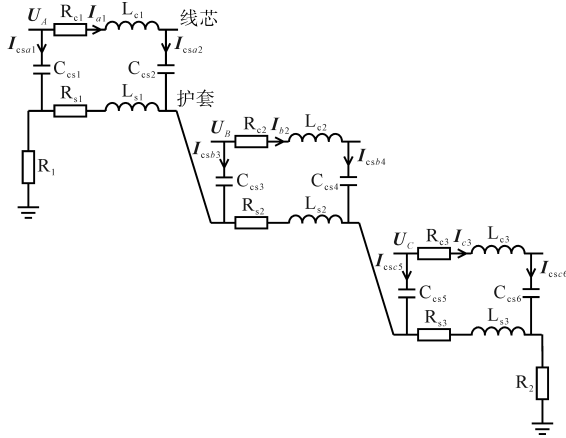


图2 A-B-C回路等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of A-B-C circuit

当不考虑负荷电流作用时,流过线芯中的电流全部为泄漏电流。由图2可知,护套环流中的泄漏电流分量由两部分组成,即线芯与护套间泄漏电流在各护套段上的分流以及在线芯中泄漏电流作用下金属护套中形成的环流。

2 护套环流泄漏电流分量计算

由于交叉互联电缆三段上的线芯压降很小,可以认为线芯电压为定值,则容性泄漏电流可以等效为理想电流源,故可得到求解护套环流中泄漏电流分量的等值电路,如图3所示。

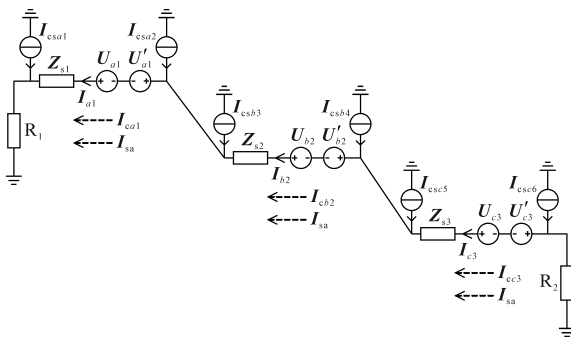


图3 求解泄漏电流分量的等值电路

Fig.3 Equivalent circuit for solving leakage current components

图3中, Z_{s1}, Z_{s2}, Z_{s3} 为各段护套阻抗; U_{a1}, U_{b2}, U_{c3} 为线芯中泄漏电流在各护套段上产生的感应电压; $U'_{a1}, U'_{b2}, U'_{c3}$ 为线芯泄漏电流形成的护套环

流在各护套段上产生的感应电压; I_{a1}, I_{b2}, I_{c3} 为护套环流中总泄漏电流分量; $I_{ca1}, I_{cb2}, I_{cc3}$ 为电流源作用下各段护套环流; I_{sa} 为电压源作用下各段护套环流。泄漏电流与护套环流关系如下:

$$\begin{cases} I_{a1} = I_{ca1} + I_{sa} \\ I_{b2} = I_{cb2} + I_{sa} \\ I_{c3} = I_{cc3} + I_{sa} \end{cases} \quad (3)$$

2.1 泄漏电流的分流

图3中的电流源流入护套回路后将产生分流,导致各护套段的环流值不同。图4所示为 A 相单个电流源分流等值电路, B 相、C 相类似。图4中, Z_{sL}, Z_{sR} 分别为电流源注入点左、右两侧的护套阻抗; I_{sajL}, I_{sajR} 分别为 $I_{csaj} (j=1, \dots, 6)$ 在金属护套左、右两侧的分流。则有:

$$\begin{cases} I_{sajL} = \frac{Z_{sR}}{Z_{sL} + Z_{sR}} I_{csaj} \\ I_{sajR} = \frac{Z_{sL}}{Z_{sL} + Z_{sR}} I_{csaj} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_{csaj} (j=1, \dots, 6)$ 为 A 相各段电缆线芯与护套间的泄漏电流。

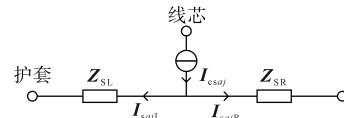


图4 单个电流源分流等值电路

Fig.4 Shunt equivalent circuit for a single current source

由于护套两端接近地电位,故分流公式不含 R_1 和 R_2 。根据式(4)将各电流源的分流叠加:

$$\begin{cases} I_{ca1} = -I_{sa1R} + I_{sa2L} + I_{sb3L} + I_{sb4L} + I_{sc5L} + I_{sc6L} \\ I_{cb2} = -I_{sa1R} - I_{sa2R} - I_{sb3R} + I_{sb4L} + I_{sc5L} + I_{sc6L} \\ I_{cc3} = -I_{sa1R} - I_{sa2R} - I_{sb3R} - I_{sb4R} - I_{sc5R} + I_{sc6L} \end{cases} \quad (5)$$

以上是 A-B-C 回路中,由泄漏电流分流而形成的环流, B-C-A 回路与 C-A-B 回路的求解过程类似,不再赘述。

2.2 线芯泄漏电流产生的环流

线芯泄漏电流作用产生的环流可以采用回路电流法进行求解,需要注意的是,每段线芯中的泄漏电流大小并不相同,以 A 相线芯为例,其各段线芯中的泄漏电流为

$$\begin{cases} I_{a1} = \sum_{j=2}^6 I_{csaj} \\ I_{a2} = \sum_{j=4}^6 I_{csaj} \\ I_{a3} = I_{csa6} \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_{a1}, I_{a2}, I_{a3} 为 A 相三段电缆线芯中的泄漏电流。

图5为以比率表示的任意排列电缆相间距示意图, S, mS, nS 为各相电缆中心的距离。

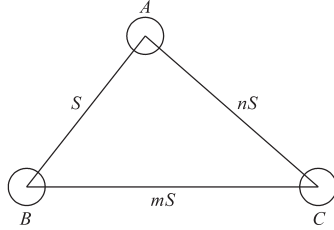


图5 任意排列的电缆相间距

Fig.5 Phase spacing of cables arranged arbitrarily

由电磁学理论,可以得到图3中 U_{a1}, U_{b2}, U_{c3} 及 $U'_{a1}, U'_{b2}, U'_{c2}$ 为

$$\begin{cases} U_{a1} = 10^{-7} \omega I_{a1} (\sqrt{3} \ln S + j \ln \frac{nS^2}{r_{eq}^2}) l_1 \\ U_{b2} = 10^{-7} \omega I_{a2} (\sqrt{3} \ln \frac{mS}{r_{eq}} - j \ln \frac{S}{mr_{eq}}) l_2 \\ U_{c3} = 10^{-7} \omega I_{a3} (-\sqrt{3} \ln \frac{mS}{r_{eq}} - j \ln \frac{n^2 S}{mr_{eq}}) l_3 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} U'_{a1} = j2\omega \times 10^{-7} (I_{sb} \ln \frac{D_e}{S} + I_{sc} \ln \frac{D_e}{nS}) l_1 \\ U'_{b2} = j2\omega \times 10^{-7} (I_{sb} \ln \frac{D_e}{mS} + I_{sc} \ln \frac{D_e}{S}) l_2 \\ U'_{c3} = j2\omega \times 10^{-7} (I_{sb} \ln \frac{D_e}{nS} + I_{sc} \ln \frac{D_e}{mS}) l_3 \end{cases} \quad (8)$$

式中: r_{eq} 为金属护套的几何平均半径; l_1, l_2, l_3 为电缆段长; I_{sb}, I_{sc} 分别为 B-C-A 回路与 C-A-B 回路的护套环流; D_e 为大地回路等值深度。

由各护套回路的 KVL, 可得如下矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} Z_s + R & R & R \\ R & Z_s + R & R \\ R & R & Z_s + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U'_{sa} \\ U'_{sb} \\ U'_{sc} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$R = R_1 + R_2 + R_e$$

式中: Z_s 为电缆金属护套总阻抗; U_{sa} 为 A-B-C 回路中由线芯泄漏电流产生的总感应电压, $U_{sa} = U_{a1} + U_{b2} + U_{c3}$; U'_{sa} 为 A-B-C 回路中由护套环流产生的总感应电压, $U'_{sa} = U'_{a1} + U'_{b2} + U'_{c3}$; $U_{sb}, U_{sc}, U'_{sb}, U'_{sc}$ 含义类似; R_e 为大地等值电阻。

由于 $U'_{sa}, U'_{sb}, U'_{sc}$ 与待求变量 I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} 相关, 故采用迭代法求解。将式(9)中4个矩阵依次记为 Z, I_s, U_s, U'_s , 则 I_s 为

$$I_s = Z^{-1} (U_s - U'_s) \quad (10)$$

迭代初值由下式确定:

$$I_s^{(0)} = Z^{-1} U_s \quad (11)$$

根据图6所示的迭代流程即可求出线芯泄漏电流作用时各回路的护套环流。

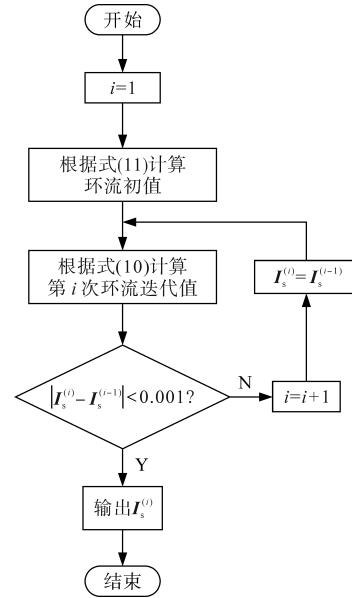


图6 环流迭代流程

Fig.6 Circulation iteration process

由式(3)可得电缆各段护套环流的泄漏电流分量, 由于现场一般在直接接地箱和交叉互联箱中设置环流监测点, 根据图3易得各监测点护套环流的泄漏电流分量。

3 仿真验证

为验证本文护套环流泄漏电流分量计算方法的准确性, 在电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 中搭建了单回路电缆仿真模型, 如图7所示。图7中, 监测点1和监测点4测量直接接地箱中的环流, 监测点2和监测点3测量交叉互联箱中的环流。以常见的一字型敷设方式为例, 对不同段长组合下电缆直接接地箱与交叉互联箱中的护套环流进行分析。

仿真模型选用 YJLW03-Z-127/220-1×2500

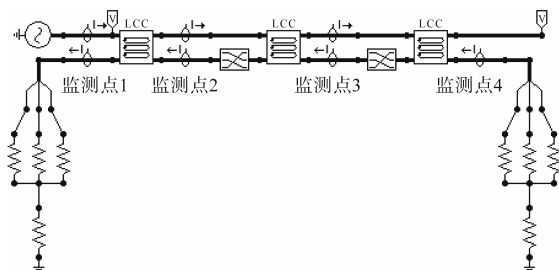


图7 电缆仿真模型

Fig.7 Cable simulation model

型电缆,由于ATP-EMTP中不能设置半导电屏蔽层,而内屏蔽层的归属将影响线芯与护套间电容参数的计算,需对电缆参数做略微修改。内屏蔽层具有一定导电能力且与线芯等电位,故将其归属于线芯部分^[4]。

具体仿真参数为:线芯外径65.6 mm,绝缘厚度24 mm,金属护套内径113.6 mm,金属护套外径119.2 mm,系统线电压220 kV,护套两侧接地电阻取0.5 Ω ,电缆相间距0.2 m。由于要分析泄漏电流作用下,各护套段中的环流分布情况,故

在仿真模型中设置电缆末端空载,此时负荷电流为零,仿真结果即为护套环流的泄漏电流分量。

在上述情景下,分别采用本文方法与文献[16–19]中的方法求解了护套环流的泄漏电流分量,并与仿真结果进行对比。以监测点1和监测点2为例分析直接接地箱与交叉互联箱中的环流,将不同段长组合下各方法的计算结果与仿真结果记录在表1中。其中,方法1为文献[16–19]中仅考虑泄漏电流分流作用的计算方法,方法2为本文方法。

表1 各方法泄漏电流分量计算结果对比

Tab.1 Comparison of the calculation results for leakage current components by each method

段长组合/m	数据含义	监测点1			监测点2			
		A相	B相	C相	A相	B相	C相	
600/600/600	泄漏电流/A	方法1	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	
		方法2	7.24	5.96	5.64	2.86	3.03	1.39
		仿真结果	7.26	5.97	5.65	2.85	3.02	1.39
	误差/%	方法1	-55.65	-46.06	-43.01	12.98	6.62	131.65
		方法2	-0.28	-0.17	-0.18	0.35	0.33	0.00
720/730/740	泄漏电流/A	方法1	3.84	3.84	3.84	3.92	3.92	3.92
		方法2	8.62	7.13	6.69	3.45	3.70	1.74
		仿真结果	8.65	7.12	6.71	3.46	3.68	1.73
	误差/%	方法1	-55.61	-46.07	-42.77	13.29	6.52	126.59
		方法2	-0.35	0.14	-0.30	-0.29	0.54	0.58
700/610/620	泄漏电流/A	方法1	3.83	3.83	3.83	3.38	3.38	3.38
		方法2	8.57	6.91	6.93	2.98	2.74	1.00
		仿真结果	8.57	6.96	6.92	2.94	2.73	1.02
	误差/%	方法1	-55.31	-44.97	-44.65	14.97	23.81	231.37
		方法2	0.00	-0.72	0.14	1.36	0.37	-1.96

由表1可知:1)当负荷电流为零时,如果不考虑泄漏电流,按照感应电流计算理论,护套环流为零,而实际上金属护套各个监测点中仍存在较大的护套环流,说明在高压电缆中,护套环流的泄漏电流分量不能忽略。2)在不同的段长组合下,如果仅考虑泄漏电流的分流作用,其各监测点的护套环流计算误差大致在50%左右,与仿真结果仍有较大差异,不能完整体现泄漏电流对护套环流的影响;而采用本文方法计算泄漏电流作用下的护套环流,其误差均在2%以内,验证了本

文所提方法的准确性。

为进一步分析不同负荷电流下的护套环流情况,以段长700/610/620为例,在仿真模型中加入负荷,设置了4种负荷电流值,其中两种为轻载情形,另外两种为正常负载情形。将感应电流分量与本文计算的泄漏电流分量叠加得到不同负荷电流下的护套环流,并与仿真结果进行对比,将数据记录在表2中,表中的电流比为环流仿真值与负荷电流的比值。

由表2可知,加入负荷后本文护套环流的计

表2 不同负荷电流下的护套环流对比
Tab.2 Comparison of sheath circulating current under different load currents

负荷电流/A	数据含义	监测点 1			监测点 2			
		A相	B相	C相	A相	B相	C相	
60	护套环流	本文计算值/A	9.83	8.73	9.21	5.65	4.66	3.84
		仿真值/A	9.85	8.79	9.23	5.62	4.67	3.88
		误差/%	-0.20	-0.68	-0.22	0.53	-0.21	-1.03
		环流与负荷电流比值/%	16.42	14.65	15.38	9.37	7.78	6.47
80	护套环流	本文计算值/A	10.40	9.37	10.04	6.59	5.33	4.79
		仿真值/A	10.41	9.43	10.07	6.56	5.35	4.84
		误差/%	-0.10	-0.64	-0.30	0.46	-0.37	-1.03
		环流与负荷电流比值/%	13.01	11.79	12.59	8.20	6.69	6.05
200	护套环流	本文计算值/A	14.77	13.35	15.33	12.37	9.50	10.54
		仿真值/A	14.78	13.42	15.41	12.39	9.55	10.63
		误差/%	-0.07	-0.52	-0.52	-0.16	-0.52	-0.85
		环流与负荷电流比值/%	7.39	6.71	7.71	6.20	4.78	5.32
400	护套环流	本文计算值/A	23.56	20.25	24.62	22.12	16.56	20.12
		仿真值/A	23.60	20.35	24.78	22.00	16.65	20.29
		误差/%	-0.17	-0.49	-0.65	0.55	-0.54	-0.84
		环流与负荷电流比值/%	5.90	5.09	6.20	5.50	4.16	5.07

算误差基本在1%以内,再次证明了本文方法的准确性。在同样的段长及敷设方式下,随着负荷电流的减小,护套环流与负荷电流的比值逐渐增大,当负荷电流为80 A与60 A时,监测点1的护套环流均超过10%。由于轻载时负荷电流较小,护套环流的感应电流分量也相应较小,而护套环流中的泄漏电流分量则占相当大的比重,因此会出现环流超标现象。故在护套环流分析与计算中需准确计及泄漏电流分量的影响。

本文方法所得的环流准确性较高,通过改变各种参数,包括敷设方式、段长、电缆参数、运行负荷电流、线芯电压等,可以很容易获取大量的环流数据,为交叉互联系统的相关故障诊断研究提供大量且可靠的样本数据。

4 结论

针对现有护套环流计算上的不足,本文在泄漏电流分流作用的基础上,计及线芯泄漏电流对护套环流的贡献,较全面地考虑了泄漏电流对护套环流的影响,提出了高压电缆护套环流泄漏电流分量的计算方法。仿真分析结果表明,泄漏电流分量是护套环流的重要组成部分,采用本文计算方法所得环流值误差在2%以内,验证了该方

法的准确性,有力地解释了轻载时护套环流超标的原因,同时为故障诊断样本数据的生成提供了可靠途径。

参考文献

- [1] 方春华,李景,汤世祥,等. 基于接地电流的交叉互联箱故障诊断技术研究[J]. 高压电器,2018,54(6):16-23.
FANG Chunhua, LI Jing, TANG Shixiang, et al. Fault diagnosis of cross-bonded box based on grounding current[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 16-23.
- [2] 金增杰,卫永琴,张琦,等. 电缆故障测距的模型仿真与系统设计[J]. 电气传动,2021,51(14):68-72.
JIN Zengjie, WEI Yongqin, ZHANG Qi, et al. Design and simulation of cable fault location system[J]. Electric Drive, 2021, 51(14): 68-72.
- [3] 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.
- [4] 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 mul-

- tipoint grounding[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(10): 15-23, 49.
- [5] CANDELA R, GATTUSO A, MITOLO M, et al. A model for assessing the magnitude and distribution of sheath currents in medium and high-voltage cable lines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6250-6257.
- [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] 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.
- [8] 张军强, 董卓元, 盛飞, 等. 长距离330 kV电缆护套交叉互连接地方式研究及回流缆优化布置方法[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 189-196.
ZHANG Junqiang, DONG Zhuoyuan, SHENG Fei, et al. Research on cross-connection grounding modes of long-distance 330 kV cable sheath and layout optimization of return cable[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 189-196.
- [9] 张重远, 芮皓然, 刘贺晨, 等. 高压单芯电缆单相接地故障护套过电压特性仿真分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(11): 115-119.
ZHANG Zhongyuan, RUI Haoran, LIU Hechen, et al. Simulation analysis of sheath overvoltage characteristic for single-phase ground fault in high voltage single-core cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(11): 115-119.
- [10] 郑大白, 刘哲, 王凤凯. 高压电缆交叉互连金属护套环流影响因素分析及解决方法[J]. 电线电缆, 2022(1): 19-25, 28.
ZHENG Dabai, LIU Zhe, WANG Fengkai. Analysis and solution of metal sheath ground circulating current in cross connection of high voltage cable[J]. Wire & Cable, 2022(1): 19-25, 28.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 冯超, 王鹏飞, 马丽山, 等. 多回路单芯XLPE电力电缆金属护套环流计算分析[J]. 青海电力, 2015, 34(1): 31-35, 47.
FENG Chao, WANG Pengfei, MA Lishan, et al. Calculation of circular current in the metallic sheath of multi-loops single core XLPE cable and analysis[J]. Qinghai Electric Power, 2015, 34(1): 31-35, 47.
- [14] 朱广越, 齐明泽, 陈祥朋, 等. 相间距和回路间距对电力电缆金属护套环流的影响[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(2): 79-85.
ZHU Guangyue, QI Mingze, CHEN Xiangpeng, et al. The influence of phase spacing and loop spacing on circulating current of power cable metal sheath[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2021, 41(2): 79-85.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李根, 王航, 刘海康, 等. 基于逻辑回归的高压电缆交叉互连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.
- [18] 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.
- [19] YANG Yang, HEPBURN D M, ZHOU Chengke, et al. On-line monitoring of relative dielectric losses in cross-bonded cables using sheath currents[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 2677-2685.
- [20] 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.

收稿日期: 2022-09-14
修改稿日期: 2022-09-28