

多回单芯电力电缆并联运行护套感应电压的计算与分析

王雄伟, 张哲, 尹项根, 李金辉, 陈鹏, 杨妍

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 为研究多回电缆并联运行护套感应电压对电缆运行安全和人身安全的影响, 提出了适用于并联电缆护套感应电压的计算方法。以电磁感应定律为基础, 先建模计算负荷电流在各回电缆线路的具体分配, 再据此推导不同护套接地方式的多回并联运行电缆护套开口感应电压和护套沿线最大值感应电压的计算。以双回电缆并联运行为例, 分别编程求解了该方法和现有文献方法在几种典型敷设方式下的护套感应电压。并以数字仿真结果为参考对比分析了误差大小, 结果证明了该方法的正确性。通过分析几种因素对护套感应电压的影响发现: 并联运行电缆护套感应电压相对于单回电缆可能增大很多, 选择交叉互联接地和品字形相序排列能显著降低并联电缆护套感应电压。

关键词: 电力电缆; 并联运行; 感应电压; 护套接地; 相序排列

Calculation and analysis of sheath induced voltage for multi-circuit single-core power cable lines in parallel

WANG Xiongwei, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, LI Jinhui, CHEN Peng, YANG Yan

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology

(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: For the study of sheath induced voltage of multi-circuit single-core power cable lines in parallel influencing on cable operation security and personal safety, a new algorithm suitable for sheath induced voltage of multi-circuit single-core power cable lines in parallel is proposed. Based on the electromagnetic coupling principle, by modeling and calculating, every cable line's current distributed from the load current is gained firstly, then based on the results of current distribution, the calculation of sheath open induced voltage and maximum induced voltage along the sheath for every sheath grounding method are derived. With double-circuit cable lines in parallel as example, the new algorithm and the algorithm existed in the literature are both applied to several typical phase sequence arrangement methods, and the two theoretical calculation results are both calculated by programming, then the results of digital simulation for reference, the error size of the two theoretical calculation are compared and analyzed, proving the correctness of the new algorithm. By analyzing the influence of several factors on the sheath induced voltage the followings are found: relative to the single cable, the sheath induced voltage of multi-circuit single-core power cable lines in parallel may increase a lot, choosing the cross grounding method and the triangle disposition phase sequence arrangement can significantly reduce sheath induced voltage of multi-circuit single-core power cable lines in parallel.

Key words: power cable lines; parallel operation; induced voltage; sheath grounding; phase sequence arrangement

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2015)22-0077-08

0 引言

随着国民经济迅速发展, 城市负荷需求的日益增长, 高压电力电缆已广泛应用于城市 110 kV 及以上高压线路中, 受城市地形、地理条件限制、负荷要求以及电缆制造技术限制等因素影响, 采用同相

多根并联运行的高压电力电缆线路也越来越多^[1-8]。

然而在采用电缆并联运行方式时, 由于各回电缆相距较近, 相邻电缆间存在较大的电磁耦合, 将导致金属护套上的感应电压显著增大, 不但危及人身安全, 甚至还可能击穿金属护套的外护层, 影响电缆安全运行。当需要用保护器来保护外护层时,

这个感应电压也是制定保护器参数的决定因素之一^[9-13]。另外当线路较长护套采用交叉互联接地时,感应电压的存在将导致金属护套产生环流,过大的护套环流也会危及电缆运行安全^[14-15]。因此,针对并联电缆的运行特点,研究并联运行电缆护套感应电压计算方法和分析影响护套感应电压的影响因素,对降低护套感应电压,以保证电缆的运行安全和运行人员人身安全具有重要意义。

目前,单回电缆线路的护套感应电压计算研究较为成熟,文献[10-15]分析了任意单回路的护套感应电压计算方法,但由于没有考虑其他回路负荷电流的作用,并不适用于多回电缆护套感应电压计算。文献[16-18]中研究了双回路或三回电缆护套感应电压的计算方法,但上述方法均近似假设各回电缆负荷电流均匀分配,主要适用于电缆对称布置的敷设方式。进一步的研究表明,并联多回电缆由于受技术和环境的限制,其排列方式多样,当采用不对称排列方式时,负荷电流分配不均匀现象很显著^[19-21],上述基于电流均匀分配的感应电压计算方法将产生较大的误差,难以满足工程应用要求。

本文根据并联多回电缆的运行特点,提出了一种适用于不同排列方式和护套接地方式的护套感应电压的通用计算方法,并通过与数字仿真结果对比,验证了所提出计算方法的正确性。在此基础上,分析了电缆回数、护套接地方式和相序排列方式等因素对护套端口感应电压和护套沿线最大电压的影响,分析结论可为多回并联电缆线路的工程设计和应用提供参考。

1 任意回路并联电缆护套感应电压计算理论基础

图1为任意两单芯电缆组成的线路,其中电缆1中通以电流 I_1 ,电缆2中通以电流 I_2 ,因金属护套的厚度远小于电缆半径 D_w ,故其内感可忽略。一般两根导线之间的距离比金属护套的厚度大得多,因此可近似假设本导线的护套到另一根导线芯线之间的距离与两导线芯线之间的距离相等。

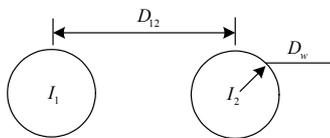


图1 任意两根电缆线路示意图

Fig. 1 Diagram of any two cable circuit

设两电缆之间的距离为 D_{12} ,则电缆1金属护套上的单位长度感应电压为

$$U_{1w} = Z_{1-1w}I_1 + Z_{2-1w}I_2 \quad (1)$$

其中: Z_{1-1w} 表示电缆1芯线对电缆1护套的互阻抗; Z_{2-1w} 表示电缆2芯线对电缆1护套的互阻抗。本文将护套和芯线同等看待,设正常工作时各芯线流过电流分别为 $I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}, \dots, I_{an}, I_{bn}, I_{cn}$,则任意 n 回电缆线路并联运行时,第 k 根电缆对应金属护套上的开口感应电压 ΔU_{wk} 计算公式为

$$\Delta U_{wk} = I_{a1}Z_{a1wk} + I_{b1}Z_{b1wk} \dots + I_{cn}Z_{cnwk} \quad (2)$$

所以计算多回并联电缆护套开口感应电压的关键在于求解各根电缆的芯线电流和求解各根电缆的芯线与护套之间的互阻抗。本研究为提高计算准确度,在求解芯线时将放弃使用现有文献的基于芯线电流均匀分配假设的感应电压计算方法,而是先计算各回电缆芯线电流,再根据芯线与护套之间的互阻抗关系计算护套感应电压。另外不同护套接地方式时电缆芯线对护套感应电压作用不同,本文将推导不同护套接地情况的护套感应电压计算。

2 并联多回电缆护套感应电压计算方法研究

2.1 形成护套开路时的电压方程

本研究将金属护套与电缆芯线等同处理^[9],假设该 n 回平行电缆系统中电缆长度为 L ,单位长度阻抗矩阵为 $Z_{6n \times 6n}$,则这 $6n$ 个回路中电缆线路的电压降表达式为

$$\Delta U_{6n \times 1} = LZ_{6n \times 6n} I_{6n \times 1} \quad (3)$$

式中: ΔU_{ai} 为第 i 回电缆A相芯线电压降; ΔU_{awi} 为第 i 回电缆A相护套开口感应电压; I_{ai} 为第 i 回电缆A相芯线电流; I_{awi} 为第 i 回电缆A相护套电流,其余类推; $Z_{6n \times 6n}$ 为电缆的单位长度自、互感系数矩阵,该矩阵元素的计算公式^[18]如下。

芯线和护套自阻抗系数为

$$z_{cc} = (r_a + r_e + j0.1445 \lg \frac{D_c}{D_c}) \Omega / \text{km} \quad (4)$$

$$Z_{ss} = (r_w + r_e + j0.1445 \lg \frac{D_s}{D_s}) \Omega / \text{km} \quad (5)$$

芯线与护套同相时其互阻抗系数为

$$Z_{sc} = (r_e + j0.1445 \lg \frac{D_c}{D_s}) \Omega / \text{km} \quad (6)$$

芯线与护套不同相时其互阻抗系数为

$$Z_{sc} = (r_e + j0.1445 \lg \frac{D_c}{D}) \Omega / \text{km} \quad (7)$$

两芯线之间和两护套回路之间互阻抗均为式(7)。

上面各式中: r_a 为线芯单位长度交流电阻; r_w 为护

套单位长度交流电阻; r_e 为大地等值电阻, $r_e = \pi^2 f \times 10^{-4} = 0.0493 \Omega/\text{km}$; D_e 为以大地为回路时等值回路的深度; $D_e = 660\sqrt{\rho_e/f}$ [22]; D_c 为芯线自几何均距; D_s 为护套几何半径; D 为各相导线间距。

2.2 计算护套开路时的各回路负荷电流相量

因为各护套开路, 故

$$\begin{cases} I_{aw1} = \dots = I_{awk} = \dots = I_{awn} = 0 \\ I_{bw1} = \dots = I_{bwk} = \dots = I_{bwn} = 0 \\ I_{cw1} = \dots = I_{cwk} = \dots = I_{cwn} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

利用式(8), 可直接将式(3)中和护套有关的行列删去, 即化简为

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{a1} \\ \Delta U_{b1} \\ \Delta U_{c1} \\ \vdots \\ \Delta U_{an} \\ \Delta U_{bn} \\ \Delta U_{cn} \end{bmatrix} = LZ'_{3n \times 3n} \begin{bmatrix} \Delta I_{a1} \\ \Delta I_{b1} \\ \Delta I_{c1} \\ \vdots \\ \Delta I_{an} \\ \Delta I_{bn} \\ \Delta I_{cn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

又根据并联电缆芯线两端电位差相等有

$$\begin{cases} \Delta U_{a1} = \dots = \Delta U_{ak} = \dots = \Delta U_{an} \\ \Delta U_{b1} = \dots = \Delta U_{bk} = \dots = \Delta U_{bn} \\ \Delta U_{c1} = \dots = \Delta U_{ck} = \dots = \Delta U_{cn} \end{cases} \quad (10)$$

在式(9)中将其他各回路各相电压减去第一回路同名相电压, 再利用式(10)得到

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{a1} \\ \Delta U_{b1} \\ \Delta U_{c1} \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = LZ'_{3n \times 3n} \begin{bmatrix} \Delta I_{a1} \\ \Delta I_{b1} \\ \Delta I_{c1} \\ \vdots \\ \Delta I_{an} \\ \Delta I_{bn} \\ \Delta I_{cn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

再根据基尔霍夫感应定律有

$$\begin{cases} I_a = I_{a1} + \dots + I_{ak} + \dots + I_{an} \\ I_b = I_{b1} + \dots + I_{bk} + \dots + I_{bn} \\ I_c = I_{c1} + \dots + I_{ck} + \dots + I_{cn} \end{cases} \quad (12)$$

取式(11)的后 $(3n-3)$ 个方程并联立式(12)中的 3 个方程, 即可求解护套开路时的各回电缆负荷电流相量: $I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}, \dots, I_{an}, I_{bn}, I_{cn}$ 。

2.3 计算各回路电缆的护套开口电压

(1) 电缆金属护套接地方式

在实际的工程应用中, 电缆金属护套接地方式

有四种类型: a) 当电缆线路很短时, 金属护套采用一端直接接地另一端经非线性电阻保护器接地的方式, 即一点接地; b) 当线路较短传输容量很小时, 可以采用金属护套两端直接接地的方式, 即两点直接接地; c) 当线路较长且无法分成三段构成交叉互联时可采用金属护套中点接地而两端经非线性电阻保护器接地, 即中点接地, 该方式和一点接地类似; d) 当线路很长(大于1 000 m)时, 可将电缆分成若干个大段, 每个大段均分为三小段, 每个小段经交叉互联箱连接两端直接接地的方式, 即交叉互联接地[23-25]。

(2) 各种护套接地方式的护套开口电压计算

a) 护套一点接地、护套中点接地和护套两点直接接地时

当护套一点接地、护套中点接地和护套两点直接接地时, 沿线的各芯线与护套的距离始终保持不变, 所以这两种接地方式下的芯线与护套的单位长度互阻抗即是式(3)中相应的矩阵阻抗元素。所以将第 2.2 节中求解得到的各回路芯线电流代入式(3)中护套所在行, 即可得到各护套开口感应电压为

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{aw1} \\ \Delta U_{bw1} \\ \Delta U_{cw1} \\ \vdots \\ \Delta U_{awn} \\ \Delta U_{bwn} \\ \Delta U_{cwn} \end{bmatrix} = LZ_{3n \times 3n} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ \vdots \\ I_{an} \\ I_{bn} \\ I_{cn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

b) 护套交叉互联接地时

护套交叉互联时, 芯线与护套的间距不再保持不变, 故需要分段计算各段护套感应电压, 然后各段叠加得到整体护套的开口感应电压。

对于图 2 所示的金属护套交叉互联接地方式, 为了降低护套感应电压, 一般将交叉互联的三段等分。第一段各回路护套感应电压的计算方法与一点接地时相同, 可得第一段开口电压表达式为

$$\Delta U_1 = (L/3)Z'_{3n \times 3n} I \quad (14)$$

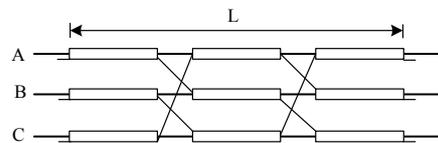


图 2 三段等长的金属护套交叉互联接地
Fig. 2 Diagram of metal sheath cross grounding when three parts length equal

对第二、三段, 类似有

$$\Delta U_2 = (L/3) \mathbf{Z}_{3n \times 3n}^{(2)} \mathbf{I} \quad (15)$$

$$\Delta U_3 = (L/3) \mathbf{Z}_{3n \times 3n}^{(3)} \mathbf{I} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{Z}_{3n \times 3n}^{(2)}$ 、 $\mathbf{Z}_{3n \times 3n}^{(3)}$ 可由 $\mathbf{Z}_{3n \times 3n}^{(1)}$ 对护套电压对应的行进行简单的交换即可得到^[9]。

三段护套总的开口感应电压为

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = \\ &= (L/3) (\mathbf{Z}_{3n \times 3n}^{(1)} + \mathbf{Z}_{3n \times 3n}^{(2)} + \mathbf{Z}_{3n \times 3n}^{(3)}) \mathbf{I} = \\ &= (L/3) \mathbf{Z} \mathbf{I} \end{aligned} \quad (17)$$

其中:

$$\Delta U = [U_{aw1}, U_{bw1}, U_{cw1}, \dots, U_{awn}, U_{bn}, U_{cn}]^T$$

$$\mathbf{I} = [I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}, \dots, I_{an}, I_{bn}, I_{cn}]^T$$

将第 2.2 节中求解的 $I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}, \dots, I_{an}, I_{bn}, I_{cn}$ 代入式(17), 即可得到交叉互互联接地方式下的各护套开口感应电压。

2.4 各护套沿线最大感应电压

沿线感应电压的计算基础也是电磁感应定律, 下面根据护套不同接地方式给出计算方法:

(1) 当护套一点接地或护套两端直接接地时, 各护套沿线感应电压的最大值就是护套开口感应电压。

(2) 当护套中间接地时, 各护套沿线感应电压的最大值是护套开口感应电压的一半。

(3) 当护套交叉互互联接地时, 各护套沿线感应电压的最大值是两个交叉互互联节点处的感应电压^[9-12], 由式(14)~式(16)可知, $U_{\max} = \max(\Delta U_1, \Delta U_3)$ 。

3 并联多回电缆护套感应电压计算方法的应用及其仿真校验

为验证本文提出的并联运行护套感应电压计算方法的正确性, 以双回电缆并联运行为例, 在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建并联电缆线路仿真模型, 分别测试双回电缆三相水平排列、三相垂直排列、品字水平排列和品字垂直排列等几种典型排列方式下的各回线路的护套开口感应电压^[26-28]。双回电缆典型相序排列类型示意图如图 3。

(1) 护套交叉互互联接地

计算条件: 本研究取电缆型号 YJLW03_1×2000 mm²_127/220 kV, 该型号电缆芯线交流阻抗为 0.010 14 Ω/km, 金属护套交流阻抗为 0.026 02 Ω/km, 外护套半径为 73.75 mm, 导体半径为 27.2 mm。系统电源电压 220 kV, 负荷电流 2 kA, 电缆每段长度 0.8 km, 总长 2.4 km。

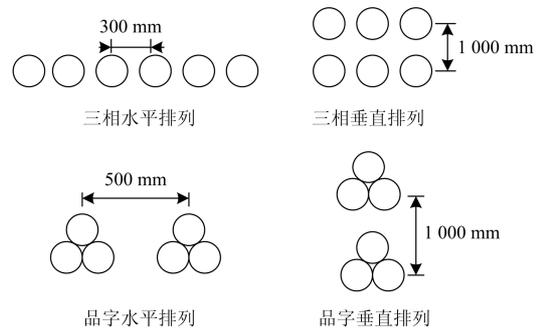


图 3 双回电缆典型相序排列类型示意图

Fig. 3 Diagram of double-circuit cable typical phase sequence arrangement

为便于对比分析, 在 Matlab 软件中编程求解了本计算方法和现有文献中基于负荷电流均匀分配假设的护套感应电压计算方法的计算结果, 并以数字仿真结果为基准, 分别计算了本文方法和现有文献方法与数字仿真结果之间的相对误差, 由于篇幅所限本文只选取其中两种相序排列的计算和仿真结果得到表 1, 表中的本计算值指本文方法的计算结果, 本值误差指本文计算结果与仿真结果的相对误差, 现计算值指现有文献的计算结果, 现值误差指现有文献计算结果与仿真结果的相对误差。

(2) 护套两点直接接地

计算条件: 系统电源电压 220 kV, 负荷电流 2 kA, 电缆长度 1.2 km, 护套两端直接接地, 其他条件见交叉互互联接地方式, 得到表 2。

(3) 护套一点接地

计算条件: 系统电源电压 220 kV, 负荷电流 2 kA, 电缆长度 0.6 km, 护套一点接地或中点接地, 其他条件见交叉互互联接地方式, 得到表 3。

由表 1~表 3 可知:

(1) 由于排列方式会影响芯线电流的均匀分配, 所以当某种排列方式不满足电流均匀分配的假设时, 现有计算结果和仿真结果差异较大, 特别是在交叉互互联接地方式下相对误差甚至会达到 200% 左右, 而当某种排列方式的电流分配满足均匀分配时, 本文计算方法的计算结果和现有文献计算的计算结果基本一致, 这也更好证明了现有文献计算方法存在一定局限, 同时也说明了本文在计算护套感应电压时先进行负荷电流分配计算的必要性。

(2) 利用本文方法对三种接地方式时不同排列方式的护套开口感应电压计算得到的计算结果与数字仿真分析的相对误差都很小, 满足工程应用要求。

表 1 护套交叉互联接地时护套开口感应电压计算结果与仿真结果

Table 1 Calculated data and simulation data for sheath open induced voltage when sheath cross grounding

排列类型	数据含义	U_{aw1}	U_{bw1}	U_{cw1}	U_{aw2}	U_{bw2}	U_{cw2}
三相水平 ABCabc	仿真值/V	32.2	35.4	34.5	32.6	32.1	34.7
	现计算值/V	102.8	102.8	102.8	102.8	102.8	102.8
	本计算值/V	32.2	32.2	32.2	35.8	35.8	35.8
	现值误差/%	219.2	190.4	197.9	215.3	220.2	196.2
	本值误差/%	0	-9.0	-6.6	9.8	11.5	3.1
三相垂直 ABCabc	仿真值/V	37.4	39.8	41.1	37.4	39.8	41
	现计算值/V	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4
	本计算值/V	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4
	现值误差/%	8.0	1.5	-1.7	8.0	1.5	-1.4
	本值误差/%	8.0	1.5	-1.7	8.0	1.5	-1.4

表 2 护套两点直接接地时护套开口感应电压计算结果与仿真结果

Table 2 Calculated data and simulation data for sheath open induced voltage when sheath two point direct grounding

排列类型	数据含义	U_{aw1}	U_{bw1}	U_{cw1}	U_{aw2}	U_{bw2}	U_{cw2}
三相水平 ABCabc	仿真值/V	128.9	110.0	105.3	105.6	108.2	130.9
	现计算值/V	178.2	116.2	81.0	81.0	116.2	178.2
	本计算值/V	130.3	107.0	103.8	102.8	108.9	129.2
	现值误差/%	38.2	5.6	-23.0	-23.3	7.3	36.1
	本值误差/%	1.1	-2.7	-1.4	-2.7	0.7	-1.3
三相垂直 ABCabc	仿真值/V	154.6	115.6	155.9	154.6	115.7	155.9
	现计算值/V	154.2	114.8	154.2	154.2	114.8	154.2
	本计算值/V	154.1	114.6	154.1	154.1	114.6	154.1
	现值误差/%	-0.3	-0.7	-1.1	-0.2	-0.8	-1.1
	本值误差/%	-0.3	-0.9	-1.2	-0.3	-0.1	-1.2

表 3 护套一点接地时护套开口感应电压计算结果与仿真结果

Table 3 Calculated data and simulation data for sheath open induced voltage when sheath one point direct grounding

排列类型	数据含义	U_{aw1}	U_{bw1}	U_{cw1}	U_{aw2}	U_{bw2}	U_{cw2}
三相水平 ABCabc	仿真值/V	67.4	56.6	54.2	53.8	55.9	68.6
	现计算值/V	89.1	58.1	40.5	40.5	58.1	89.1
	本计算值/V	65.1	53.5	51.9	51.4	54.4	64.6
	现值误差/%	32.2	2.6	-25.2	-24.7	3.9	29.8
	本值误差/%	-3.4	-5.4	-4.2	-4.4	-2.6	-5.8
三相垂直 ABCabc	仿真值/V	78.9	59.6	80.4	78.9	59.6	80.3
	现计算值/V	77.1	57.4	77.1	77.1	57.4	77.1
	本计算值/V	77.0	57.3	77.0	77.0	57.3	77.0
	现值误差/%	-2.2	-3.6	-4.0	-2.2	-3.6	-3.9
	本值误差/%	-2.4	-3.8	-4.2	-2.4	-3.8	-4.1

4 不同因素对护套开口感应电压及护套沿线电压的影响分析

为研究护套接地方式和排列方式对护套感应电

压的影响, 对图 3 所示的四种典型排列类型, 在三种典型护套接地方式下均假设第一回电缆排列不变, 另一回电缆任意排列, 即对四种典型排列类型均进行了 6 种排列方式的护套开口电压和护套沿线

最大电压计算, 因篇幅所限本文只给出各种排列类型各自的最大护套电压和最小护套感应电压对应的排列方式, 另外为研究不同回路数对护套感应电压的影响, 对单回电缆的两种排列方式的护套感应电

压也进行了计算。为便于分析, 不同接地方式、不同回路数和不同排列方式下的护套感应电压计算均假设电缆长度为 0.6 km。计算结果如表 4。

表 4 不同因素下的护套开口电压和护套沿线最大电压
Table 4 Sheath open voltage and maximum voltage along the sheath for different factors

排列方式	一点接地开	一点接地沿	中点直接接	中点直接接	交叉互连接	交叉互连接
	口感应电压	线感应电压	地开口感应	地沿线感应	地时开口感	地沿线感应
	最大值	最大值	电压最大值	电压最大值	应电压最大值	电压最大值
单回三相水平 ABC	72.45	72.45	72.45	36.22	8.71	27.29
单回三相品字 ABC	32.35	32.35	32.35	16.18	0.09	10.70
双回三相水平 ABCabc	65.13	65.13	65.13	32.57	8.95	21.71
双回三相水平 ABCcba	108.56	108.56	108.56	54.28	25.68	36.19
双回三相垂直 ABCcab	66.10	66.10	66.10	33.05	6.45	22.03
双回三相垂直 ABCabc	77.05	77.05	77.05	38.52	10.09	25.68
双回品字水平 ABCabc	30.26	30.26	30.26	15.13	2.26	10.09
双回品字水平 ABCacb	40.29	40.29	40.29	20.14	9.71	13.43
双回品字垂直 ABCacb	29.60	29.60	29.60	14.80	0.95	9.82
双回品字垂直 ABCbac	33.23	33.23	33.23	16.61	4.26	11.08

从表 4 可知:

(1) 电缆回路数对护套感应电压大小造成影响, 电缆并联运行后, 品字形排列和三相垂直排列受其他回路影响不大, 水平排列时某些排列方式的护套感应电压相对于单回电缆增大幅度很大。

(2) 护套接地方式对护套感应电压影响很大。在相同电缆长度下, 护套一点接地和护套中点接地时的开口感应电压相同, 并远大于护套交叉互连接地 (7 倍以上); 护套一点接地时护套沿线最大感应电压是护套中点接地时的两倍, 是交叉互连接地时的 3 倍左右。

(3) 不同排列方式对护套感应电压影响很大。品字垂直排列和品字水平排列下的护套开口感应电压和沿线感应电压均明显小于三相水平独立排列和三相垂直排列。

5 结论

(1) 本文提出了一种多回电缆并联运行护套感应电压的计算方法, 并通过数字仿真验证了该方法的正确性, 计算精度也有很大提升。该方法适用于不同护套接地方式和各种相序排列方式, 可以为多回并联电缆线路设计提供参考。

(2) 并联运行电缆护套感应电压受护套接地方式和排列方式影响很大, 应根据线路长度选择合理

的护套接地方式, 根据布置环境选择合理的相序排列方式。在条件允许时, 选择交叉互连接护套接地和品字形相序排列能明显减小护套感应电压, 在不能进行品字形排列的布置环境下, 通过优化相序排列方式也能适当降低护套感应电压。

参考文献

- [1] 李旭涛, 周凯, 万利, 等. 基于 TEV 法的电缆终端局部放电状态监测装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 98-103.
LI Xutao, ZHOU Kai, WAN Li, et al. Development of cable termination PD condition monitoring device based on TEV method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 98-103.
- [2] 罗翔, 蔡金锭, 张孔林. 基于向量分析法的三相交联电缆局部放电检测与分析识别技术[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 91-96.
LUO Xiang, CAI Jinding, ZHANG Konglin. Partial discharge detection and identification for three-phase cross-bonded cable based on vector analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 91-96.
- [3] 夏向阳, 张琦, 李明德, 等. 证据理论与模糊理论集成的 XLPE 电缆绝缘状态评估研究[J]. 电力系统保护与

- 控制, 2014, 42(20): 13-18.
- XIA Xiangyang, ZHANG Qi, LI Mingde, et al. Research on insulation assessment of XLPE cables based on evidence and fuzzy theory integrated method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 13-18.
- [4] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.
- YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.
- [5] 杨伟航. 关于高压电力电缆在桥梁上敷设的方案设计要点[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(12): 15-18.
- YANG Weihang. Main points of the hv cable laying scheme on bridge[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(12): 15-18.
- [6] 杨耿杰, 苏爱国, 郭谋发, 等. 应用 GPRS 及光纤测温技术的电力电缆监测系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 100-105.
- YANG Gengjie, SU Aiguo, GUO Mou fa, et al. Monitoring system for power cable based on gprs and optical fiber thermometry technology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(4): 100-105.
- [7] 杜伯学, 马宗乐, 霍振星, 等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器, 2010, 46(7): 100-104.
- DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 100-104.
- [8] 陈根, 唐焱, 王新桥. 基于 ATP 的高压电缆金属护套多点接地故障仿真[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 49-53.
- CHEN Gen, TANG Yan, WANG Xinqiao. Simulation of multipoint grounding faults in metal sheath of high-voltage cable based on ATP[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 49-53.
- [9] 王育学, 张哲, 尹项根, 等. 平行多回电缆序阻抗参数的计算与分析[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 186-191.
- WANG Yuxue, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Calculation and analysis of sequence impedances for parallel multi-circuit cable lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 186-191.
- [10] 陈平, 薛强, 罗彦, 等. 单芯电力电缆护套过电压保护[J]. 高电压技术, 2004, 30(增刊 1): 6-7.
- CHEN Ping, XUE Qiang, LUO Yan, et al. Over voltage protection for sheath layer of single core cable[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(Z1): 6-7.
- [11] 杨守信, 杨力. 110 kV 长庆电缆护套绝缘过电压保护分析计算[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 22-24.
- YANG Shouxin, YANG Li. Analysis and calculation of overvoltage protection of jacket insulation of 110 kV cable[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 22-24.
- [12] 何利平. 110 kV 都北线电缆护套的感应电压和环流分析计算[J]. 广东输电与变电技术, 2006(6): 56-58.
- HE Liping. Analysis and calculation on induced voltage and circulating current in jacket of 110 kV single-core cables[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2006(6): 56-58.
- [13] 欧景茹. 高压单芯电缆金属护套感应电压计算及其保护方式[J]. 吉林电力, 2001(3): 14-16.
- OU Jingru. Calculation on induction voltage of metal jacket on high-voltage and single-core cable and its protection[J]. Jilin Electric Power, 2001(3): 14-16.
- [14] 江山, 江军. 芙蓉变电站出线交叉互联护套感应电压的分析计算[J]. 湖南电力, 1997(3): 26-29.
- JIANG Shan, JIANG Jun. Analysis and calculation for cable wire cross sheath induced voltage of the Furong substation[J]. Hunan Electric Power, 1997(3): 26-29.
- [15] 朱爱钧. 超高压长距离大截面电缆的护层感应电压[J]. 供用电, 2006, 23(6): 7-9.
- ZHU Aijun. EHV long and large cross-section cable sheath induced voltage[J]. Power Supply, 2006, 23(6): 7-9.
- [16] 倪欣荣, 马宏忠, 王东海, 等. 电缆护层电压补偿与护层电流抑制技术[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 65-69.
- NI Xinrong, MA Hongzhong, WANG Donghai, et al. Techniques of voltage compensating and circulating current restraining of the metal shield for power cables[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 65-69.
- [17] 马宏忠, 倪欣荣, 黎腊红, 等. 高压电力电缆护层感应电压的补偿研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 148-151.
- MA Hongzhong, NI Xinrong, LI Lahong, et al. Research on compensation of induced voltage in the metal shield of the high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 148-151.
- [18] 贾欣, 喻明, 王瑛, 等. 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.

JIA Xin, YU Ming, WANG Ying, et al. Calculation of induced voltage on single-core power cable metal sheath in tri-circuits[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(5): 61-62.

[19] 苏巍, 明安持. 多回路电缆布置优化的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 64-66.

SU Wei, MING Anchi. Research of the multicircuit HV cables collocation optimization[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 64-66.

[20] 陈建忠, 陆正荣, 张洁. 中高压单芯电缆并联时感应电压和电流不平衡系数[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2009(5): 13-17.

CHEN Jianzhong, LU Zhengrong, ZHANG Jie. Induced voltage and current unbalanced factor when medium-and-high voltage single-core cables paralleled[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2009(5): 13-17.

[21] 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.

[22] 韩晓鹏, 李华春, 周作春. 同相两根并联大截面交联电缆敷设方式的探讨[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 66-67.

HAN Xiaopeng, LI Huachun, ZHOU Zuochun. Discussion on laying mode of two parallel large section AC cables with same phase[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 66-67.

[23] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 181-183.

[24] 唐庆华, 刘宝成, 杨洪, 等. 高压电缆金属护套的接地方式对线路参数的影响[J]. 电线电缆, 2009(2): 22-23.

TANG Qinghua, LIU Baocheng, YANG Hong, et al. Effect of the earthing method of the metal sheath in hv cables on line parameters[J]. Electric Wire & Cable, 2009(2): 22-23.

[25] 张全胜, 王和亮, 周作春. 110 kV 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.

ZHANG Quansheng, WANG Heliang, ZHOU Zuochun. Study on cross connection grounding of metallic sheath of 110 kV XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 71-73.

[26] 邓星, 蒙绍新, 尹项根, 等. 多回并联电缆线路参数的不对称性分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3119-3124.

DENG Xing, MENG Shaoxin, YIN Xianggen, et al. Analysis on asymmetry of sequence parameters for parallel multi-circuit cables[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3119-3124.

[27] 商建军, 张晓颖, 李继波. 220 kV 枢纽站不同电压等级多回路大截面电缆出线优化布置[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(11): 44-48.

SHANG Jianjun, ZHANG Xiaoying, LI Jibo. Optimized Layout of Multi-loop and Big-cross-section Cable outlets at different voltages in the 220 kV junction station[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(11): 44-48.

[28] ANDERSON J G. 345 kV 及以上超高压输电线路设计参考手册[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.

收稿日期: 2015-04-30; 修回日期: 2015-07-07

作者简介:

王雄伟(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统微机保护与控制; E-mail: M201371228@hust.edu.cn

张哲(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和自动控制;

尹项根(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电网继电保护、变电站自动化及安全稳定控制。

(编辑 周金梅)