

220 kV 四回高压电缆同相 2 根并联敷设方式优化研究

刘渝根¹, 尚龙龙¹, 田金虎², 田 资¹, 成文杰¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400039)

摘要: 为了研究 220 kV 四回高压电缆同相 2 根并联的最优敷设方式, 笔者根据高压单芯电缆的等值电路模型, 通过软件编程, 计算分析了 220 kV 四回高压电缆同相 2 根并联在“品字形”、“水平交叉”敷设方式下的芯线电流、电流分布的不均匀系数以及护套环流。在此基础上, 提出了一种优化的敷设方式, 即采用“品字形—水平交叉”复合式的敷设方式, 并与前两种方式进行分析、比较。结果表明: 在“品字形”敷设方式中, 具有电流分布不均匀系数大而护套环流小的特点; 在“水平交叉”敷设方式中, 具有电流分布不均匀系数小而护套环流很大的特点; 在优化后的“水平交叉—品字形”复合式敷设方式中, 兼具电流分布不均匀系数小和护套环流小的优点。尤其是当电缆按相序 BCAABC 排列效果最优, 电流分布的不均匀系数的最大值为 1.041 0, 最小值仅为 1.010 3。护套环流的最大值为 61.89 A, 最小值仅为 9.14 A。

关键词: 高压电缆; 四回同相 2 根并联; 护套环流; 电流分布; 不均匀系数; 敷设方式

Optimal Layout of the 220 kV Quadri-circuit Cables with Double-split Conductors in Each Phase

LIU Yugen¹, SHANG Longlong¹, TIAN Jinhu², TIAN Zi¹, CHENG Wenjie¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Maintenance Branch Company, State Grid of the Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400039, China)

Abstract: To optimize the layout of the 220 kV quadri-circuit cables with double-split conductors in each phase, an equivalent circuit model of the cables based on the structure of single core XLPE cable is established to calculate the circuit parameters, such as the circulating current in sheaths and the nonuniformity coefficient of current distribution for triangle and horizontal cross layouts. Subsequently, an optimal triangle-horizontal cross layout of cables are put forward and compared with the above two layouts. The results show that: ①for the triangle layout, the nonuniformity coefficient of current distribution in same phase is large, while the circulating current in sheaths is small; ②for the horizontal cross layout, the nonuniformity coefficient of current distribution in same phase is small, while the circulating current in sheaths is high; and ③for the triangle-horizontal cross layout, both of the nonuniformity coefficient and the circulating current are small. Particularly, when the arrangement of the cables is in the sequence BCAABC, the nonuniformity coefficient can get to its maximum 1.041 0 and the minimum 1.010 3, and the circulating current get to the maximum 61.89 A and the minimum 9.14 A.

Key words: high-voltage cables; quadri-circuit cables with double-split conductors each phase; circulating current in sheaths; current distribution; nonuniformity coefficient; layout mode

收稿日期:2015-06-16; 修回日期:2015-07-28

基金项目:国家创新研究群体基金(51021005)。

Project Supported by the Funds for Innovative Research Groups of China(51021005).

0 引言

随着城市化进程不断推进,用电负荷不断上升,在实际线路中的越来越多的采用多回高压电缆同相多根并联的运行方式^[1-3]。另外,高压电缆还具有降低变电站出现规模、供电可靠性好、节省空间、美化城市环境等优势受到越来越多的关注^[4-7]。高压电缆已广泛用于城市 110 kV 及以上电压等级的线路。然而,多回高压电缆同相多根并联同沟敷设时存在复杂的电磁关系,同相并联线路各芯线上的电流并未按照分裂根数进行等分,出现电流分配不均匀等问题^[8-12]。

由于对多回高压电缆同相多根并联的运行机理缺乏认识,现场经验也较少。在实际中,甚至出现因电流分配不均匀导致超出其载流量而引起过热击穿的事故^[13]。因此,从提高线路传输效率及保证电缆运行的可靠性、延长其使用寿命的角度出发,研究高压电缆电流分配具有十分显著的技术和经济价值^[14-15]。

另外,高压电缆常采用单芯结构,负荷电流产生的交变磁场在金属护套上将产生感应电动势。若护套两端直接接地或交叉互联接地,三相金属护套和大地将形成环流。环流将产生环流损耗,造成电缆载流量降低,严重时甚至烧毁接地线^[16-17]。目前,对单回和双回电缆线路参数的计算方法已经较为成熟,其准确性已在工程实例中得到验证^[18-21],而对三回、四回乃至更高回数的高压电缆同沟敷设问题缺乏相关的研究。

笔者针对 220 kV 四回高压电缆同相 2 根并联时,电流分配不平衡、护套环流等问题,建立了等值电路模型,计算分析了电缆在品字形、水平交叉不同敷设方式下的芯线电流、电流分布的不均匀系数以及护套环流,进而提出了一种优化的敷设方式即采用品字形水平交叉复合式的敷设方式并与前两种敷设方式进行分析比较。

1 计算模型的建立

1.1 多回高压电缆同相多根并联时护套环流模型

当电缆线路较短时(一般为 500 m 以下),一般采用一端接地;若线路长度很长(如 1 000 m 以上)时,通常分为几个换位段交叉互联,并将线路两端金属护套层接地。图 1 是单回电缆同相 2 根并联时金属护套交叉互联接地。

n 回高压电缆同相 2 根并联敷设时电路模型见图 2,文中将金属护套与电缆芯线同等处理,它们均与大地构成回路。因此图 2 中 n 回电缆线路共有 $2n$ 个“单导线—大地”回路。 Z_1-Z_n 为电缆金属护套自阻

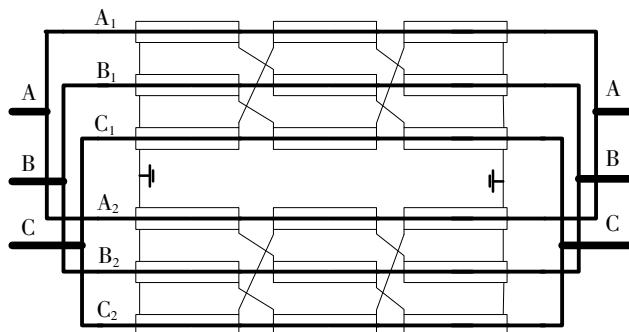


图 1 单回电缆同相 2 根并联时金属护套交叉互联接地

Fig. 1 The cross-connection grounding of single-circuit with double-split conductors each phase

抗; R_1 和 R_2 为金属护套的接地电阻; R_e 为大地的漏电阻; U_1-U_n 为各电缆芯线上通过的电流 I_1-I_n 在金属护套上产生的感应电势; $U'_1-U'_n$ 分别为各电缆护套上的环流 $I_{s1}-I_{sn}$ 在各金属护套上产生的感应电势。

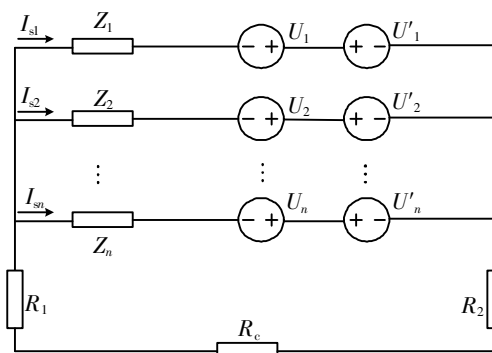


图 2 多回电缆线路同沟敷设时护套环流等值电路模型

Fig. 2 The equivalent circuit model for circulating current in sheaths of multi-circuit cables

某一高压电缆芯线电流为 I , 护套 p 为与芯线不同相且两者相距为 d , 可将其看做两根平行导体, 护套 p 与芯线电流间的磁通为^[18]

$$\varphi_p = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{d}{d_{GMRp}} \quad (1)$$

式(1)中, d_{GMRp} 为导体 p 的几何平均半径, 单位与 d 相同。

则电流 I 在护套上的感应电势 E 为

$$E = -j\omega\varphi_p = -2 \times 10^{-7} j\omega I \ln \frac{d}{d_{GMRp}} \quad (2)$$

式(2)中: $\omega = 2\pi f$ 。

由式(2)有各芯线电流在护套 p 上产生的感应电势为

$$E_{sp} = \sum_{i=1}^n (-j\omega\varphi_{pi}) = \sum_{i=1}^n (-2 \times 10^{-7} j\omega I_i \ln \frac{d_i}{d_{GMRp}}) = -2 \times 10^{-7} j\omega \sum_{i=1}^n (I_i \ln \frac{d_i}{d_{GMRp}}) \quad (3)$$

则对于 U_1-U_n 有

$$U_p = LE_{sp} = \sum_{i=1}^n (-j\omega\varphi_{pi})L = -2 \times 10^{-7} j\omega L \sum_{i=1}^n (I_i \ln \frac{d_i}{d_{GMRp}}) \quad (4)$$

式(4)中, L 为电缆长度。

单位长度两根平行导体 i, k 间的互感抗为

$$X_{ik} = 2\omega \times 10^{-7} \ln \frac{D_e}{d_{ik}} \quad (5)$$

式(5)中: D_e 为以大地为回路时的回路等值深度,

$D_e = 660 \sqrt{\rho_e f}$; d_{ik} 为两平行导体之间距离^[10]。

则对于电缆芯线及护套自阻抗分别为^[20]:

$$Z_{cc} = r_c + r_e + j0.144 \lg \frac{D_e}{d_{GMR_c}}; \quad (6)$$

$$Z_{ss} = r_s + r_e + j0.144 \lg \frac{D_e}{d_{GMR_s}} \quad (7)$$

式(6)–(7)中: Z_{cc} 为电缆芯线自阻抗; Z_{ss} 为护套自阻抗; r_c 为电缆芯线单位长度交流电阻; r_s 为电缆护套单位长度交流电阻; r_e 为大地等值电阻, $r_e = \pi^2 f \times 10^{-4} = 0.049 \, 3 \, \Omega/\text{m}$; d_{GMR_c} 为电缆芯线几何均距; d_{GMR_s} 为电缆护套几何平均半径。

护套与芯线同相时其互阻抗为

$$Z_{cs} = r_e + j0.144 \lg \frac{D_e}{d_{GMR_i}} \quad (8)$$

护套与芯线不同相时互阻抗为

$$Z_{cs} = r_e + j0.144 \lg \frac{D_e}{D} \quad (9)$$

式(9)中, D 为各相导线之间距离。

对于两芯线之间、两护套之间的互阻抗均可由式(9)得到。

则护套环流在护套 p 上产生的感应电势为

$$U_p' = \sum_{i=1, i \neq p}^n (jI_{si} Z_{pi} L) = jL \sum_{i=1, i \neq p}^n (I_{si} Z_{pi}) \quad (10)$$

则由图 2 所示等效电路有

$$\begin{cases} I_{s1} Z_1 + (R_1 + R_2 + R_e)(I_{s1} + I_{s2} + \cdots + I_{sn}) + U_1' = U_1 \\ I_{s2} Z_2 + (R_1 + R_2 + R_e)(I_{s1} + I_{s2} + \cdots + I_{sn}) + U_2' = U_2 \\ \vdots \\ I_{sn} Z_n + (R_1 + R_2 + R_e)(I_{s1} + I_{s2} + \cdots + I_{sn}) + U_n' = U_n \end{cases} \quad (11)$$

1.2 高压电缆同相多根并联时模型

当电缆线路各相采用 m 根电缆并联运行时, 对于第 k 根电缆线路其通过的电流 I_k 主要由电缆导体两端的电压 ΔU_k 及导体阻抗 Z_k 来决定, 有

$$I_k = \frac{\Delta U_k}{Z_k} \quad (12)$$

式(12)中: ΔU_k 为电缆导体两端的电压; Z_k 为导体阻抗, 导体阻抗包含导体自阻抗以及相邻电缆间的互阻抗。

某一相负荷电流 I 应为 m 根并联电缆电流之

和, 有

$$\begin{cases} I_1 = I_{c11} + I_{c12} + \cdots + I_{c1m} \\ I_2 = I_{c21} + I_{c22} + \cdots + I_{c2m} \\ \vdots \\ I_n = I_{cn1} + I_{cn2} + \cdots + I_{cnm} \end{cases} \quad (13)$$

对于第 i 根导体线路有

$$\Delta U_i = \sum_{k=1}^{2mn} Z_{i,k} I_k \quad (14)$$

而各相并联电缆线路两端电压降相等, 故有

$$\begin{cases} \Delta U_1 = \Delta U_{c11} = \Delta U_{c12} = \cdots = \Delta U_{c1m} \\ \Delta U_2 = \Delta U_{c21} = \Delta U_{c22} = \cdots = \Delta U_{c2m} \\ \vdots \\ \Delta U_n = \Delta U_{cn1} = \Delta U_{cn2} = \cdots = \Delta U_{cnm} \end{cases} \quad (15)$$

由式(11)–(15)可以得到芯线电流、护套环流与阻抗、电压之间的关系写成矩阵形式有

$$Z \begin{bmatrix} I_{c11} \\ I_{c12} \\ \vdots \\ I_{cnm} \\ I_{s11} \\ I_{s12} \\ \vdots \\ I_{snm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{c11} \\ U_{c12} \\ \vdots \\ U_{cnm} \\ U_{s11} \\ U_{s12} \\ \vdots \\ U_{snm} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\text{式(16)中, } Z = \begin{bmatrix} Z_{c11} & Z_{c11c12} & \cdots & Z_{c11c1m} & \cdots & Z_{c11snm} \\ Z_{c12c11} & Z_{c12} & \cdots & Z_{c12c1m} & \cdots & Z_{c12snm} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Z_{snmc11} & Z_{snmc12} & \cdots & Z_{snmc1m} & \cdots & Z_{snm} \end{bmatrix} \quad (16)$$

利用式(16), 通过软件编程求解, 便可得到各同相并联电缆线路芯线电流及各护套环流大小。

2 并联电缆线路电流分布及护套环流计算

图 3 为某 220 kV 四回高压电缆同相 2 根并联线路几种同沟敷设方式。图 3 中 1–4、2–5、3–6、7–10、8–11、9–12、13–16、14–17、15–18、19–22、20–23、21–24 分别为同相 2 根并联的电缆线路。且 1–4、2–5、3–6 为一回, 7–10、8–11、9–12 为一回, 13–16、14–17、15–18 为一回, 19–22、20–23、21–24 为一回, 共计 4 回。电缆线路横截面积为 2 000 mm², 交流电阻值 0.012 4 Ω/km , 直流电阻值 0.009 0 Ω/km , 外护套外径 150.5 mm, 导体外径 54.7 mm, 且电缆护套交差互联段长度均取 400 m。

定义电流分布不均匀系数为

$$\varepsilon = \{\max(I_1, \cdots, I_n)\} / \{\min(I_1, \cdots, I_n)\} \quad (17)$$

式(17)中: ε 为并联电缆线路电流分布不均匀系数; I_1 到 I_n 为同相多根并联电缆线路各自芯线中流



图 3 四回高压电缆同相 2 根并联敷设方式

Fig. 3 The layout of the parallel quadri-circuit cables with double-split conductors each phase

过的电流。文中 n 值取为 2。

2.1 电缆敷设方式 1

图 3(a) 为电缆敷设方式 1, 即“品字形”排列。1 号和 4 号电缆间距为 0.4 m, 1 号和 13 号电缆间距为 1.8 m。同相并联 2 根电缆线路负荷电流取为单根线路最大载流量的 2 倍, 即 2×2138 A。建立模型计算不同排列相序下各相并联电缆线路电流分布及护套环流,

文中只列出 ABCABC、ACBACB、BCAABC、BACABC 等 4 种排列。经计算分析, 其他几种可能的相序排列, 计算出的电路参数与文中给出的 4 种排列存在对应关系, 在此就不一一列出。由图 3 可知, 1~24 号电缆线路布置呈中心对称, 故文中只列出了 1~4、2~5、3~6、7~10、8~11、9~12 相电缆芯线电流及电流分布不均匀系数, 见表 1。各电缆金属护套环流见表 2。

表 1 四回电缆同相 2 根并联各芯线电流及电流不均匀系数

Table 1 The core current and current distribution in same phase for quadri-circuit cables with double-split conductors each phase

并联方式	序号	相序	I/A	ε	相序	I/A	ε	相序	I/A	ε	相序	I/A	ε
1-4	1	A	2 079	1.056 8	A	2 075	1.060 7	B	205 2	1.083 8	B	205 0	1.085 9
	4		2 197			2 201			222 4			222 6	
2-5	2	B	2 193	1.052 3	C	2 191	1.050 8	C	215 0	1.011 3	A	221 1	1.070 7
	5		2 084			2 085			212 6			206 5	
3-6	3	C	2 193	1.051 8	B	2 196	1.055 8	A	221 5	1.074 7	C	219 6	1.055 8
	6		2 085			2 080			206 1			208 0	
7-10	7	A	2 043	1.093 0	A	2 042	1.094 0	A	202 0	1.168 3	A	201 1	1.126 3
	10		2 233			2 234			225 6			226 5	
8-11	8	B	2 152	1.012 2	C	2 142	1.003 7	B	219 4	1.053 8	B	220 2	1.061 7
	11		2 126			2 134			208 2			207 4	
9-12	9	C	2 162	1.021 7	B	2 171	1.031 4	C	218 5	1.045 0	C	216 6	1.026 5
	12		2 116			2 105			209 1			211 0	

表 2 四回电缆同相 2 根并联时护套环流

Table 2 The circulating current in sheaths for quadri-circuit cables with double-split conductors each phase

序号	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A	序号	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A
1	A	53.87	A	58.04	B	36.82	B	27.35	13	A	58.04	A	53.87	B	9.69	B	49.44
2	B	53.87	C	58.04	C	36.82	A	27.35	14	B	58.04	C	53.87	C	9.69	A	49.44
3	C	53.87	B	58.04	A	36.82	C	27.35	15	C	58.04	B	53.87	A	9.69	C	49.44
4	A	94.48	A	91.54	A	27.14	A	58.71	16	A	91.54	A	94.48	A	48.58	A	14.82
5	B	94.48	C	91.54	B	27.14	B	58.71	17	B	91.54	C	94.48	B	48.58	B	14.82
6	C	94.48	B	91.54	C	27.14	C	58.71	18	C	91.54	B	94.48	C	48.58	C	14.82
7	A	91.99	A	94.37	B	44.12	B	31.51	19	A	96.33	A	91.99	B	67.94	B	77.62
8	B	91.99	C	94.37	C	44.12	A	31.51	20	B	96.33	C	91.99	C	67.94	A	77.62
9	C	91.99	B	94.37	A	44.12	C	31.51	21	C	96.33	B	91.99	A	67.94	C	77.62
10	A	55.11	A	60.96	A	53.26	A	18.62	22	A	60.96	A	55.10	A	55.47	A	85.52
11	B	55.11	C	60.96	B	53.26	B	18.62	23	B	60.96	C	55.10	B	55.47	B	85.52
12	C	55.11	B	60.96	C	53.26	C	18.62	24	C	60.96	B	55.10	C	55.47	C	85.52

由表 1 可以看出:

1) 当同相并联 2 根电缆芯线电流取为其最大载流量的 2 倍, 即 $2 \times 2\ 138\ \text{A}$ 时, 各相电缆同相并联的 2 根芯线并未对加载的电流完全均分, 而存在一定的分配不均衡。当相序为 ABCABC 时, 7-10 两根芯线电流分布最不平衡, 电流分布的不均匀系数为 1.093 0, 两根芯线电流大小相差 190 A, 且 10 号芯线电流超过其载流量 95 A。

2) 当电缆中负荷电流的相序不同时, 电缆同相并联的 2 根芯线中电流分配存在一定的差异。当相序为 ABCABC、ACBACB、BCAABC、BACABC 时, 各芯线电流分布不均匀系数最大值分别为 1.093 0、1.094 0、1.168 3、1.126 3。同相并联的 2 根芯线电流相差的最大值分别为 190、192、236、254 A。

由表 2 可以看出:

1) 同一回路中各相电缆护套环流均相等。如电缆按照相序 ABCABC 排列时, 4、5、6 号电缆线路的护套环流均为 94.48 A。

2) 当同相并联 2 根电缆芯线电流取为其最大载流量的 2 倍, 即 $2 \times 2\ 138\ \text{A}$ 时, 电缆按照相序

ABCABC、ACBACB、BCAABC、BACABC 时, 1-24 号电缆线路护套环流的最大值分别为 96.33、94.48、67.94、85.52 A。

综合比较表 1、2, 当各回电缆线路按相序 ABCABC 排列时, 电流分布的不均匀系数最小, 最大值仅为 1.093 0, 两根芯线电流大小相差 190 A, 而护套环流的最大值达到 96.33 A; 当按相序 BCABCAC 排列时, 护套环流的最大值为 85.52 A, 而此时电流分布的不均匀系数最大值为 1.168 3, 两根芯线电流大小相差 236 A。

2.2 电缆敷设方式 2

图 3(b) 为电缆敷设方式 2, 即“水平交叉”排列。1 号和 2 号电缆间距为 0.2 m, 2 号和 5 号电缆间距为 0.4 m, 3 号和 13 号间距为 1.4 m。图中 1-4、2-5、3-6、7-10、8-11、9-12 分别为同相线路并联的两根电缆。负荷电流为其最大载流量的 2 倍, 即 $2 \times 2\ 138\ \text{A}$, 其他未并联单根电缆线路负荷电路均取为最大载流量 $2\ 000\ \text{mm}^2$ 电缆线路为 $2\ 138\ \text{A}$ 。1-4、2-5、3-6、7-10、8-11、9-12 相电缆芯线电流及电流分布不均匀系数, 见表 3。各电缆金属护套环流见表 4。

表 3 四回电缆同相 2 根并联各芯线电流及电流不均匀系数

Table 3 The core current and current distribution in same phase for quadri-circuit cables with double-split conductors each phase													
并联方式	序号	相序	I/A	ε	相序	I/A	ε	相序	I/A	ε	相序	I/A	ε
1-4	1	A	221.5	1.074 7	A	220.8	1.063 1	B	213.6	1.0019	B	213.3	1.004 7
	4		206.1			207.7			214.0			214.3	
2-5	2	B	215.0	1.011 3	C	215.2	1.013 2	C	214.8	1.0094	A	213.0	1.007 5
	5		212.6			212.4			212.8			214.6	
3-6	3	C	217.1	1.036 3	B	217.6	1.036 2	A	216.8	1.0284	C	210.4	1.032 3
	6		209.5			210.0			210.8			217.2	
7-10	7	A	206.1	1.074 7	A	207.0	1.065 7	A	212.9	1.0085	A	221.8	1.077 7
	10		221.5			220.6			214.7			205.8	
8-11	8	B	212.6	1.011 3	C	212.4	1.013 2	B	212.9	1.008 5	B	212.8	1.009 4
	11		215.0			215.2			214.7			214.8	
9-12	9	C	210.5	1.031 4	B	210.0	1.036 2	C	209.8	1.038 1	C	212.5	1.012 2
	12		217.1			217.6			217.8			215.1	

表 4 四回电缆同相 2 根并联时护套环流

Table 4 The circulating current in sheaths for quadri-circuit cables with double-split conductors each phase															
序号	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A	序号	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A
1	A	165.40	A	85.04	B	61.26	B	107.99	13	A	85.04	A	179.67	A	73.50
2	B	165.40	C	85.04	C	61.26	A	107.99	14	B	85.04	C	179.67	B	73.50
3	C	165.40	B	85.04	A	61.26	C	107.99	15	C	85.04	B	179.67	C	73.50
4	A	89.89	A	59.16	B	59.32	B	107.41	16	A	59.16	A	89.89	A	131.53
5	B	89.89	C	59.16	C	59.32	A	107.41	17	B	59.16	C	89.89	B	131.53
6	C	89.89	B	59.16	A	59.32	C	107.41	18	C	59.16	B	89.89	C	131.53
7	A	89.89	A	59.16	A	147.30	A	83.20	19	A	59.16	A	89.89	A	77.44
8	B	89.89	C	59.16	B	147.30	B	83.20	20	B	59.16	C	89.89	B	77.44
9	C	89.89	B	59.16	C	147.30	C	83.20	21	C	59.16	B	89.89	C	77.44
10	A	175.50	A	85.04	A	119.12	A	105.43	22	A	85.04	A	165.40	A	18.65
11	B	175.50	C	85.04	B	119.12	B	105.43	23	B	85.04	C	165.40	B	18.65
12	C	175.50	B	85.04	C	119.12	C	105.43	24	C	85.04	B	165.40	C	18.65

从表 3 可以看出:

1) 当同相并联 2 根电缆芯线电流取为其最大载流量的 2 倍, 即 $2 \times 2138 \text{ A}$ 时, 各相电缆同相并联的 2 根芯线也未对加载的电流完全均分, 而存在一定的分配不均衡。当相序为 ABCABC 时, 7-10 两根电缆芯线电流分布最不平衡, 电流分布的不均匀系数为 1.074 7, 两根芯线电流大小相差 154 A, 且 10 号芯线电流超过其载流量 77 A。

2) 当电缆中负荷电流的相序不同时, 电缆同相并联的 2 根芯线中电流分配存在一定的差异。当相序为 ABCABC、ACBACB、BCAABC、BACABC 时, 各芯线电流分布的不均匀系数最大值分别为 1.074 7、1.065 7、1.038 1、1.077 7。同相并联的 2 根芯线电流相差的最大值分别为 154、136、80、160 A。相比于图 3(a) 敷设方式 1, 当排列相序 ABCABC、ACBACB、BCAABC、BACABC 时其不均匀系数分别降低了 0.018 3、0.028 3、0.130 2、0.048 6, 同相并联的 2 根芯线最大电流差分别降低了 36、56、156、94 A。可见图 3 电缆敷设方式 2 较敷设方式 1 中, 电缆芯线电流分布不均匀程度得到明显降低, 且当电缆线路按照相序 BCAABC 排列时, 芯线电流分布的不均匀系数的最大值仅为 0.038 1。

由表 4 可以看出:

1) 同一回线路中各相电缆护套环流也均相等。如电缆按照相序 ABCABC 排列时, 10、11、12 号电缆线路的护套环流均为 175.50 A。

2) 当同相并联 2 根电缆芯线电流取为其最大载流量的 2 倍, 即 $2 \times 2138 \text{ A}$ 时, 电缆按照相序 ABCABC、ACBACB、BCAABC、BACABC 时, 电缆线路护套环流的最大值分别为 175.50、179.67、147.32、136.91 A。与图 3(a) 电缆敷设方式 1 相比, 电缆线路

按照相序 ABCABC、ACBACB、BCAABC、BACABC 排列时, 护套环流最大值反而增加了 79.17、85.19、79.38、51.39 A。

可见, 电缆敷设方式 2 相比于敷设方式 1, 各电缆芯线电流分布的不均匀度得到了明显改善, 当电缆线路按照相序 BACBAC 排列时, 芯线电流分布的不均匀系数的最大值仅为 0.038 1。而各电缆线路护套环流反而变得更加严重, 当电缆线路按照相序 ACBACB 排列时, 护套环流的最大值达到 179.67 A。

2.3 优化后的电缆敷设方式

由 2.1 节和 2.2 节计算分析结果可知: 当电缆线路按图 3(a) 电缆敷设方式 1 中呈“品字形”方式排列时, 电缆中负荷电流在不同相序组合情况下, 电流分布不均匀系数在 1.093 0~1.168 3 之间, 护套环流的最大值在 94.48~67.94 A 之间; 当电缆线路按图 3(b) 电缆敷设方式 2 中呈“水平交叉”排列时, 电缆中负荷电流在不同相序组合情况下, 电流分布不均匀系数在 1.038 1~1.074 7 之间, 护套环流的最大值在 136.91~179.67 A 之间。

综上, 当电缆呈“品字形”方式排列, 具有电流分布不均匀系数大, 而护套环流小的特点; 当电缆呈“水平交叉”方式排列时, 具有电流分布不均匀系数小, 而护套环流大的特点。在此基础上, 笔者提出了一种优化的敷设方式, 即采用“品字形—水平交叉”复合式排列。

图 3(c) 为优化后电缆敷设方式, 即“品字形—水平交叉”复合式排列。1 号和 2 号电缆间距为 0.2 m, 1 号和 5 号电缆垂直间距为 0.4 m, 3 号和 13 号间距为 1.4 m。图 3 中 1-4、2-5、3-6、7-10、8-11、9-12 相电缆芯线电流及电流分布不均匀系数, 见表 5。各电缆金属护套环流见表 6。

表 5 四回电缆同相 2 根并联各芯线电流及电流不均匀系数

Table 5 The core current and current distribution in same phase for quadri-circuit cables with double-split conductors each phase

并联方式	序号	相序	I/A	ε	相序	I/A	ε	相序	I/A	ε	相序	I/A	ε
1-4	1	A	207 9	1.056 8	A	221 1	1.070 7	B	212 7	1.010 3	B	212 6	1.011 3
	4		219 7			206 5			214 9			215 0	
2-5	2	B	216 3	1.023 7	C	215 9	1.019 8	C	216 3	1.023 6	A	212 8	1.009 3
	5		211 3			211 7			211 3			214 8	
3-6	3	C	217 5	1.035 2	B	218 7	1.046 9	A	218 0	1.040 1	C	209 1	1.045 0
	6		210 1			208 9			209 6			218 5	
7-10	7	A	221 8	1.077 7	A	206 0	1.075 7	A	209 5	1.041 0	A	220 6	1.065 7
	10		205 8			221 6			218 1			207 0	
8-11	8	B	210 9	1.027 5	C	211 5	1.021 7	B	211 7	1.019 8	B	211 3	1.023 7
	11		216 7			216 1			215 9			216 3	
9-12	9	C	209 9	1.037 1	B	210 2	1.034 2	C	212 3	1.014 1	C	211 7	1.019 8
	12		217 7			217 4			215 3			215 9	

表 6 四回电缆同相 2 根并联时护套环流

Table 6 The circulating current in sheaths for quadri-circuit cables with double-split conductors each phase

序号	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A	序号	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A	相序	I/A
1	A	53.75	A	55.39	B	38.13	B	26.70	13	A	61.32	A	56.02	B	9.14	B	51.16
2	B	53.75	C	55.39	C	38.13	A	26.70	14	B	61.32	C	56.02	C	9.14	A	51.16
3	C	53.75	B	55.39	A	38.13	C	26.70	15	C	61.32	B	56.02	A	9.14	C	51.16
4	A	91.80	A	91.08	A	24.21	A	60.61	16	A	87.83	A	92.56	A	49.28	A	12.71
5	B	91.80	C	91.08	B	24.21	B	60.61	17	B	87.83	C	92.56	B	49.28	B	12.71
6	C	91.80	B	91.08	C	24.21	C	60.61	18	C	87.83	B	92.56	C	49.28	C	12.71
7	A	90.79	A	90.13	B	43.19	B	30.77	19	A	93.41	A	90.29	B	61.89	B	74.10
8	B	90.79	C	90.13	C	43.19	A	30.77	20	B	93.41	C	90.29	C	61.89	A	74.10
9	C	90.79	B	90.13	A	43.19	C	30.77	21	C	93.41	B	90.29	A	61.89	C	74.10
10	A	52.62	A	64.06	A	52.53	A	18.57	22	A	63.88	A	57.60	A	56.98	A	83.96
11	B	52.62	C	64.06	B	52.53	B	18.57	23	B	63.88	C	57.60	B	56.98	B	83.96
12	C	52.62	B	64.06	C	52.53	C	18.57	24	C	63.88	B	57.60	C	56.98	C	83.96

由表 5 可以看出:

1)优化后的电缆敷设方式,当同相并联 2 根电缆芯线中负荷电流相序不同时,各芯线中电流分配仍会存在一定的差异。

2)相比于敷设方式 1;当电缆按相序 ABCACB、ACBACB、BCAACB、BACABC 排列时,电流分布不均匀系数分别降低了 0.015 3、0.018 3、0.127 3、0.060 6,同相并联的 2 根芯线最大电流差分别降低了 30、36、150、118 A。相比于敷设方式 2;当电缆按相序 ABCACB、ACBACB、BCAACB、BACABC 时电流分布不均匀系数分别降低了-0.003 0、-0.010 0、-0.002 9、0.012 0,同相并联的 2 根芯线最大电流差分别降低了-6、-20、-6、24 A。两种方式的电流分布不均匀系数仅有细微差别,可认为优化后的敷设方式具备“品字形”排列芯线电流分布不均匀系数小的特点。

由表 6 可以看出:

1)优化后的电缆敷设方式相比于敷设方式 1;当电缆按相序 ABCACB、ACBACB、BCAACB、BACABC 排列时,电缆护套环流的最大值分别降低了 2.92、1.92、6.05、1.56 A。两种方式的护套环流仅有细微差别,可认为优化后的敷设方式具备“水平交叉”排列中护套环流小的特点。

2)相比于敷设方式 2;当电缆按相序 ABCACB、ACBACB、BCAACB、BACABC 排列时,电缆护套环流的最大值分别降低了 82.09、87.11、85.43、52.95 A。

综合表 5、6 分析,优化后的敷设方式,即采用“水平交叉—品字形”复合式排列,同时继承了敷设方式 1 中“品字形”方式排列护套环流小和敷设方式 2 中“水平交叉”方式排列电流分布不均匀系数小的特点。而且,当电缆按相序 BCAABC 排列效果

最优,电流分布的不均匀系数的最大值为 1.041 0,最小值仅为 1.010 3,同相并联的 2 根芯线电流差最大值为 86 A,最小值仅为 22 A。护套环流的最大值为 61.89 A,最小值仅为 9.14 A。

3 结论

1)建立 220 kV 四回高压电缆同相 2 根并联时的等值电路模型,分析计算了在“品字形”、“水平交叉”敷设方式下的芯线电流、电流分布的不均匀系数以及护套环流。并在此基础上,提出了一种优化的敷设方式,即采用“品字形—水平交叉”复合式的敷设方式,并与前两种敷设方式下的电路参数进行分析、比较。

2)“品字形”敷设方式具有电流分布不均匀系数大,而护套环流小的特点;“水平交叉”敷设方式具有电流分布不均匀系数小,而护套环流大。

3)优化后的“水平交叉—品字形”复合式敷设方式,兼具电流分布不均匀系数小和护套环流小的特点。优化后的“水平交叉—品字形”复合式敷设方式中,电流分布的不均匀程度和护套环流均得到明显的改善,尤其是当电缆按相序 BCAABC 排列时效果最优,电流分布的不均匀系数的最大值为 1.041 0,最小值仅为 1.010 3。护套环流的最大值为 61.89 A,最小值仅为 9.14 A。

参考文献:

[1] TARTAGLIA F F. Power lines made by many parallel single core cables: A case study[C]//IEEE Industry Applications Conference. Tampa, Florida, USA: IEEE, 2006: 2230-2237.

- [2] 郑雁翎, 许志亮, 张冠军, 等. 采用 MATLAB 仿真的变电站高压进线温度场和载流量数值计算[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 566-572.
ZHENG Yanling, XU Zhiliang, ZHANG Guanjun, et al. Numerical calculation of temperature field and ampacity of high-voltage lines using MATLAB[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 566-572.
- [3] 王晓彤, 林集明. 广东—海南 500 kV 海底电缆输电系统电磁暂态研究[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 6-10.
WANG Xiaotong, LIN Jiming. Electromagnetic transient analysis of 500 kV submarine cable transient system from Guangdong to Hainan[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 6-10.
- [4] 赵艳粉. 长距离跨桥高压电缆的关键技术设计[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(11): 25-28.
ZHAO Yanfen. Key technologies in laying high-voltage cables under long-distance bridges[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(11): 25-28.
- [5] 李小峰, 冯 宾, 陈中豪, 等. 500 kV 交流超高压电缆选型分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(11): 29-32.
LI Xiaofeng, FENG Bin, CHEN Zhonghao, et al. Analysis of the type selection of the 500 kV AC extra high voltage cables[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(11): 29-32.
- [6] 鲁志伟, 于建立, 郑良华, 等. 交联电缆集群敷设载流量的数值计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 481-487.
LU Zhiwei, YU Jianli, ZHENG Lianghua, et al. Numerical calculation of ampacity for XLPE cables in cluster laying[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 481-487.
- [7] 赵金明, 段肖华. 变频串联谐振技术在高压电缆交接试验中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(4): 23-25.
ZHAO Jinming, DUAN Xiaohua. Application of variable-frequency series resonance technology in hand-over acceptance tests of high voltage power cables[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(4): 23-25.
- [8] 胡志坚, 陈允平, 张承学, 等. 长距离高压电缆线路互感参数测量[J]. 高电压技术, 2002, 28(5): 17-18.
HU Zhijian, CHEN Yunping, ZHANG Chengxue, et al. Measurement of mutual inductances parameters of long-distance high-voltage cable lines[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(5): 17-18.
- [9] 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.
- [10] 梁永春, 王巧玲, 闫彩红, 等. 三维有限元法在局部穿管直埋电缆温度场和载流量计算中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 2911-2917.
LIANG Yongchun, WANG Qiaoling, YAN Caihong, et al. Temperature field and ampacity calculation of cable buried in local conduit using 3D finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 2911-2917.
- [11] 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.
- [12] 牛海清, 王晓兵, 张 尧. 基于迭代法的单芯电缆载流量的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 41-44.
NIU Haiqing, WANG Xiaobing, ZHANG Yao. Study of ampacity of single-core cable based on iterative method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 41-44.
- [13] 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.
FAN Youbing, ZHAO Jiankang, QIAN Kang, et al. Analysis and optimization for operation of the single-core power cables in parallel[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2607-2612.
- [14] 梁永春, 柴进爱, 李延沐, 等. 基于 FEM 的同相并联大截面三相电缆电流分布的研究[J]. 高压电器, 2007, 43(3): 186-188.
LIANG Yongchun, CHAI Jin'ai, LI Yanmu, et al. Study on current distribution in same phase of two parallel large section cables based on FEM[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 186-188.
- [15] 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.
- [16] 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, LU 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.
- [17] 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.
- [18] 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.

(下转第 37 页)

- YAN Quanquan, YIN Chunxiao. Overload limiter analysis in the HVDC system[J]. Power & Energy, 2012, 33(6): 540-542.
- [4] 赵畹君. 高压直流输电工程技术(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [5] 朱韬析, 王超. 天广直流输电系统过负荷功能研究[J]. 广东电力, 2008, 21(2): 1-4.
- ZHU Taoxi, WANG Chao. Research on overload function in Tian-Guang HVDC system[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(2): 1-4.
- [6] 梁家豪, 林睿, 周翔胜. 天广和贵广直流工程中的阀冷控制系统[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 92-95.
- LIANG Jiahao, LIN Rui, ZHOU Xiangsheng. Valve-cooling control system applied in Tian-Guang & Gui-Guang DC transmission projects[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 92-95.
- [7] 李勇. 天广直流阀冷却内冷水系统运行情况及改进[J]. 广东输电与变电技术, 2009, 11(1): 25-26.
- LI Yong. Operating status and improvement of valve inner cooling water system in Tian-Guang HVDC[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2009, 11(1): 25-26.
- [8] 中国南方电网公司超高压输电公司. ± 800 kV 直流换流站运行技术(上册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [9] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 大功率晶闸管热阻抗分析方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 1-6.
- LAN Yuanliang, TANG Guangfu, YIN Yonghua, et al. Study on analysis methods of thyristor thermal model[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(19): 1-6.
- [10] 蓝元良, 汤广福, 武守远, 等. 220 kV 成碧线可控串补晶闸管阀电气设计及仿真[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 11-15.
- LAN Yuanliang, TANG Guangfu, WU Shouyuan, et al. Electrical design and simulation of thyristor valves for thyristor controlled series compensation of 220 kV cheng-bi transmission line[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 11-15.
- [11] 李庆民, 徐国政, 钱家骊, 等. 大功率 GTO 等效传热模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 19-22.
- LI Qingmin, XU Guozheng, QIAN Jiali, et al. Investigation on the equivalent heat transfer model of large capacity GTO[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2000, 20(1): 19-22.
- [12] 李侠, SACHS G, UDER M. ± 800 kV 特高压直流输电用 6 英寸大功率晶闸管换流阀[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 1-5.
- LI Xia, SACHS G, UDER M. 6 inch high power thyristor valves for ± 800 kV UHVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 1-5.
- [13] GB/Z 25843—2010 ± 800 kV 特高压直流输电控制与保护设备技术导则[S]. 2010.
- GB/Z 25843—2010 Specifications for control and protection equipment of ± 800 kV ultra high voltage direct current transmission[S]. 2010.
- [14] IEC 61803—1999 Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations[S]. 2010.
- [15] 田邑安, 张雷, 李侠, 等. ± 100 kV/5 000 A 换流阀在交流系统故障时的运行能力分析[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 98-101.
- TIAN Yi'an, ZHANG Lei, LI Xia, et al. Operation capability study on ± 100 kV/5 000 A thyristor converter valve during AC system faults[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 98-101.

杨光源(1986—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电控制保护技术。

李兴源(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电。

胡永银(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统高压直流输电。

李宽(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统高压直流输电。

(上接第 32 页)

- 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.
- [19] 马西奎. 电磁场理论及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- MA Xikui. Electromagnetic field theory and application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000.
- [20] 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.
- [21] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- CHEN Heng. Steady-state analysis of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- 刘渝根(1963—), 男, 硕士, 教授, 长期从事高电压工程、电力系统过电压与接地技术的教学和科研工作。
- 尚龙龙(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事接地技术与电力系统过电压研究。