

500 kV 高压单芯电缆并联运行关键技术研究

白亦斓¹, 涂 扬², 李珊珊¹, 李龙才¹, 邹家勇¹, 周 特¹

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 国网重庆市电力公司建设分公司, 重庆 401121)

摘要:随着线路负荷的不断上升,越来越多的单芯电缆线路采用同相多根并联的运行方式,而并联回路电流如何均匀分配始终是制约电缆同相并联运行的关键问题。通过对同相并联电缆等效电路的建模,推导了高压单芯电缆并联运行方式下各并联回路序阻抗的关系方程,并通过理论推导得出“镜像”布置方案可实现同相并联电缆间互阻抗相等,从而使同相并联电缆获得最佳均匀通流效果。在此基础上,依托某500 kV新建变电站工程,采用有限元法计算同相并联电缆在不同的空间布置方案下,单芯电缆同相并联运行时的电流分配特性。有限元计算结果表明,同相电缆的镜像布置方案可有效降低电缆电流的不平衡分配参数,提升并联电缆利用率。最后,结合常规地下/半地下500 kV GIS出线条件给出了推荐布置方案。

关键词:地下/半地下 GIS 变电站;高压单芯电力电缆;同相多根并联;序阻抗参数;布置优化

中图分类号: TM 751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)04-0027-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210406

Research on Key Technology of Parallel Operation of 500 kV High-voltage Single-core Cable

Bai Yilan¹, Tu Yang², Li Shanshan¹, Li Longcai¹, Zou Jiayong¹, Zhou Te¹

(1. CPECG Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Company Construction Branch, Chongqing 401121, China)

Abstract: As the line load continues to rise, more and more single-core cable lines adopt the operation mode of same-phase multiple parallel connections, and how to evenly distribute the parallel circuit current has always been a key issue restricting the parallel operation of the cable in phase. Through the analysis of circuit topology of the same-phase parallel cable line, the calculation method of sequence impedance parameters of each parallel circuit during the in-phase parallel operation of the high-voltage cable is given. Then, the mirror layout scheme can be used to achieve equal mutual impedance between the same phase parallel cables, so as to obtain a uniform flow effect in cables. On this basis, supported by a new 500 kV substation project, finite element method is used to calculate the current distribution characteristics of two parallel running lines of the same phase of the single-core cable under different spatial layout schemes. The calculation results show that the mirror layouts can effectively reduce the unbalanced distribution parameters and improve the utilization of high-voltage single-core cable. Finally, combined with the outlet conditions of the conventional underground or semi-underground 500 kV GIS substations, the recommended layout scheme for parallel operation of two cables in the same phase is given.

Key words: underground or semi-underground 500 kV GIS substation; high-voltage single-core power cable; multiple same-phase cables in parallel; sequence impedance parameter; optimal layout scheme

0 引 言

近年,国内各大城市范围内涌现出地下或半地下变电站^[1-2],城市地下/半地下变电站线路走廊狭窄,尤其是220 kV及以上高压线路出线条件更为艰

难。因此,城市变电站多采用高压电缆出线替代传统架空线出线方式^[3]。随着用电负荷的持续上升,为满足线路输送能力的要求,在实际工程设计中,通常采取单相多根高压单芯电缆并联的运行方式^[4]。而在实际运行中,发现同沟平行敷设的多回电缆相互之间电磁耦合关系较强,导致并联运行的同相电

缆线路中各分支电流并不相等,存在严重不平衡^[5-6],甚至出现了因电流分配不均匀使并联电缆过热击穿的严重事故^[7-8]。因此针对单芯高压电缆并联运行研究其载流平衡措施,可大幅提高并联电缆的传输能力,延长并联电缆的寿命周期,显著提升输电系统供电可靠性。

文献[7]和文献[8]分别报道了电缆并联运行带来的绝缘击穿问题,并对电缆并联运行带来的通流不平衡进行了定性分析;但没有对电缆并联运行方式下序阻抗参数的分布等问题进行全面和深入的理论分析。文献[9-10]揭示了同相电缆并联运行方式下基于矩阵变化的序阻抗参数,但理论分析与电缆布置方案缺乏有效结合,仅通过有限元仿真验证了电缆“品”字形布置方式较常规平行敷设的电流均分效果更优。文献[11]在“品”字形布置方式优点的基础上结合水平交叉布置,提出了优化后的“水平交叉-品字形”复合式敷设方式,电流的不平衡分布得到明显改善。

下面针对高压单芯电缆同相并联运行方式,以“导线-大地”回路参数计算为基础,根据多回电缆线路序阻抗参数计算方法,结合理论分析得出并联电缆“镜像”布置时电流均分效果最优的结论,并通过有限元计算验证了采用所提“镜像”布置方案可实现电缆并联运行电流均分效果最优。

1 同相多根电缆并联运行拓扑分析

采用每相 n 根并联的单芯电缆等效电路拓扑见图 1。对图 1 中所示并联电路而言,电源内阻抗值以及负载侧等效阻抗值可认为远超电缆阻抗值,因此,当系统运行于工频电压时,可近似认为负载侧阻抗决定着回路电流的幅值、相位。因此相电流 I_A 、 I_B 、 I_C 由系统相电压 E_A 、 E_B 、 E_C 以及负荷阻抗 Z_A 、 Z_B 、 Z_C 决定。

对于图 1 中的第 i 根电缆,其电流 I_i 由电缆首尾压差 ΔU_i 和电缆阻抗 Z_i 确定,即 $I_i = \Delta U_i / Z_i$ 。电缆阻抗由电缆自阻抗和相邻电缆间互阻抗组成。电缆电气参数决定了电缆自阻抗大小,当采用同型号电缆时,单位长度电缆自阻抗相同。不过,电缆间互阻抗与自阻抗不同,与每根电缆流经的电流向量和电缆空间排布相关,当电缆中通过的电流大小、相位和相对位置发生改变时,互阻抗将随之改变^[5-6]。考

虑到并联电缆首尾压差相同,自阻抗亦近似相等,于是电缆中电流向量主要取决于电缆互阻抗的大小。因此,下面将进一步分析电缆导体阻抗参数的计算方法。

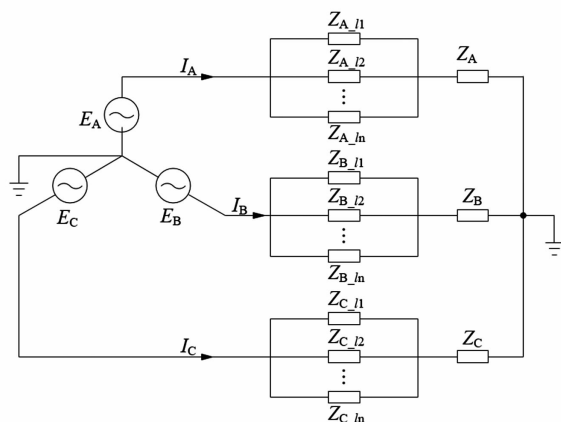


图 1 每相 n 根电缆并联运行简化电路

2 同相多根电缆并联运行阻抗计算

电缆参数主要包括各序对地电容参数和各序阻抗参数。通常 500 kV 高压电力电缆均采用单芯结构;同时为避免环流,单芯电力电缆的金属屏蔽层一般采用单点接地或者交叉互联接地的运行方式,各相电缆之间不存在电场影响,所以多回电缆的阻抗计算方法与单回一致^[10]。因此,将以单芯电缆金属屏蔽层单点接地方式为例对并联电缆进行序阻抗参数的分析计算。

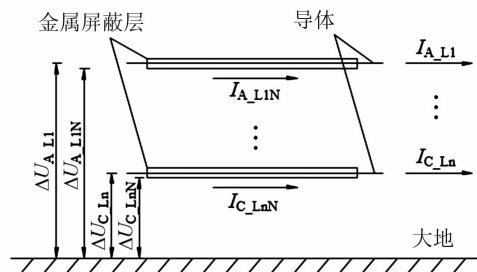


图 2 n 根电缆并联系统回路

将电缆外屏蔽层与内层导体同等看待,如图 2 所示,屏蔽层和导体均与大地构成回路,于是图 2 中 n 根电缆线路共有 $6n$ 个“导体-大地”回路。这 $6n$ 个回路的电压降可以简单表述为

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

式中: $\Delta U_{6n \times 1} = [\Delta U_{A,1} \quad \Delta U_{B,1} \quad \Delta U_{C,1} \quad \cdots \quad \Delta U_{A,Ln} \quad \Delta U_{B,Ln} \quad \Delta U_{C,Ln}]^T$; $Z_{6n \times 6n}$ 为阻抗矩阵; $I_{6n \times 1}$ 为 $6n$ 个回路的电流矩阵, $I_{6n \times 1} = [I_{A,1} \quad I_{B,1} \quad I_{C,1} \quad \cdots \quad I_{A,Ln} \quad I_{B,Ln}$

$I_{C_{L_nN}}]^T$;下标 A、B、C 表示相别;下标 L1、L2...Ln 为并联电缆回路序号;下标 N 代表屏蔽层。

$Z_{6n \times 6n}$ 组成部分可分为 3 类:“导体-大地”回路自阻抗 Z_s 、“屏蔽层-大地”回路自阻抗 Z_{Ns} 和“导体-大地”回路与“屏蔽层-大地”回路间的互阻抗 Z_m ,其计算公式^[12]如式(2)一式(5)所示。

“导体-大地”回路自阻抗(Ω/km)为

$$Z_s = R_L + R_g + j0.144 \, 51g \left(\frac{D_g}{r} \right) \quad (2)$$

式中: R_L 为电缆导体单位长度电阻; R_g 为大地等值电阻, $R_g = \pi^2 \times f \times 10^{-4} = 0.049 \, 3 \, \Omega/\text{km}$; D_g 为以大地为回路时等值回路的深度, $D_g = 660 \sqrt{\rho_e/f}$; r 为导体等值半径; D 为各相导线间距。

“屏蔽层-大地”回路自阻抗(Ω/km)为

$$Z_{Ns} = R_N + R_g + j0.144 \, 51g \left(\frac{D_g}{r'} \right) \quad (3)$$

式中: R_N 为屏蔽层单位电阻; r' 为屏蔽层几何半径。

屏蔽层与导体均处同相电缆时“屏蔽层-大地”与“导体-大地”回路间互阻抗(Ω/km)为

$$Z_m = R_g + j0.144 \, 51g \left(\frac{D_g}{r'} \right) \quad (4)$$

屏蔽层与导体处不同相时,“屏蔽层-大地”回路与“导体-大地”回路间互阻抗(Ω/km)为

$$Z_m = R_g + j0.144 \, 51g \left(\frac{D_g}{D} \right) \quad (5)$$

“屏蔽层-大地”回路间互阻抗和“导体-大地”回路间互阻抗均可通过式(5)求取。

金属屏蔽层单点接地时,“屏蔽层-大地”回路中电流为 0,即 $I_{A_{L_nN}} = I_{B_{L_nN}} = I_{C_{L_nN}} = 0$,其中 $i = 1, 2 \dots n$ 。此时可化简省去式(1)中屏蔽层相关项,将式(1)简化为 $3n$ 阶矩阵方程。

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

式中: $\Delta U_{3n \times 1} = [\Delta U_{A_{L1}} \, \Delta U_{B_{L1}} \, \Delta U_{C_{L1}} \dots \Delta U_{A_{Ln}} \, \Delta U_{B_{Ln}} \, \Delta U_{C_{Ln}}]^T$; $I_{3n \times 1} = [I_{A_{L1}} \, I_{B_{L1}} \, I_{C_{L1}} \dots I_{A_{Ln}} \, I_{B_{Ln}} \, I_{C_{Ln}}]^T$ 。

当 $n = 2$ 时,将式(6)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{A_{L1}} \\ \Delta U_{A_{L2}} \\ \Delta U_{B_{L1}} \\ \Delta U_{B_{L2}} \\ \Delta U_{C_{L1}} \\ \Delta U_{C_{L2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{A1A1} & \dots & Z_{A1C2} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{C2A1} & \dots & Z_{C2C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{A_{L1}} \\ I_{A_{L2}} \\ I_{B_{L1}} \\ I_{B_{L2}} \\ I_{C_{L1}} \\ I_{C_{L2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

考虑并联电缆首尾两端压差相等,可得

$$\begin{cases} \Delta U_{A_{L1}} = \Delta U_{A_{L2}} = \dots = \Delta U_{A_{Ln}} \\ \Delta U_{B_{L1}} = \Delta U_{B_{L2}} = \dots = \Delta U_{B_{Ln}} \\ \Delta U_{C_{L1}} = \Delta U_{C_{L2}} = \dots = \Delta U_{C_{Ln}} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)带入式(7),可化简为三阶矩阵方程:

$$\Delta U_{3 \times 1} = Z_{3 \times 3} I_{3 \times 1} \quad (9)$$

根据对称分量法进行变化,得到

$$Z'_{3 \times 3} = S Z_{3 \times 3} S^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{10} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{20} \\ Z_{01} & Z_{02} & Z_{00} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $S = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, $a = e^{j120^\circ}$; Z_{11} 为线路正序

阻抗; Z_{22} 为线路负序阻抗; Z_{00} 为线路零序阻抗。

$Z_{3 \times 3}$ 阻抗矩阵计及其他各回电缆导体,包括外层金属屏蔽层对该回电缆的互感影响,能够说明本回电缆端电压与回路电流间的准确关系。

进一步,在同相并联电缆导体两端电压相等的条件下,若要并联电缆中每个支路电流均分,即 $I_{A_{L1}} = I_{A_{L2}}$, $I_{B_{L1}} = I_{B_{L2}}$ 以及 $I_{C_{L1}} = I_{C_{L2}}$,则并联回路中的每根电缆受到互阻抗影响效果相同,可有如下关系:

$$\begin{cases} Z_{A1B1} = Z_{A2B2}; Z_{A1B2} = Z_{A2B1} \\ Z_{A1C1} = Z_{A2C2}; Z_{A1C2} = Z_{A2C1} \\ Z_{A1A2} = Z_{A2A1}; Z_{B1C1} = Z_{B2C2} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)并结合空间布置可知,当且仅当并联电缆位置完全镜像时,可满足每根电缆互阻抗影响效果相同。为验证所提理论分析结论,依托某 500 kV 新建变电站工程进行验证。

3 500 kV 高压电缆同相并联运行案例分析

某新建 500 kV 变电站,规划要求其 2 回 500 kV 出线在市区内采用电力电缆,线路走廊约为 2 km。根据系统要求,500 kV 出线载流量需满足不小于输送电流 4000 A。经电缆载流量计算^[13],并向国内外电缆厂家核实,受制造能力约束,目前 500 kV 电缆产品截面最大为 2500 mm²,其载流量最大约 2449 A。该工程即使采用最大载流电缆产品也无法匹配工程输送容量,因此考虑每相电缆采用两根并联的运行方式。根据第 2 章中理论分析,不同并联电缆布置方案下电缆互感参数不同将造成并联回路电流的分配不

平衡,最终影响高压电缆运行性能,因此特设计 6 种不同布置方案验证上述理论分析。首先对 500 kV 高压单芯电缆建模,并在此基础上针对不同布置方案进行有限元计算,验证理论分析结论,最终结合实际工程户内 GIS 布置形式,给出推荐的电缆出线布置方案。

3.1 500 kV 高压单芯电缆建模

空气中的电缆结构一般可简化为 5 个部分:空气、电缆外护层、金属屏蔽层、电缆内绝缘层、电缆导体,简化结构如图 3 所示。

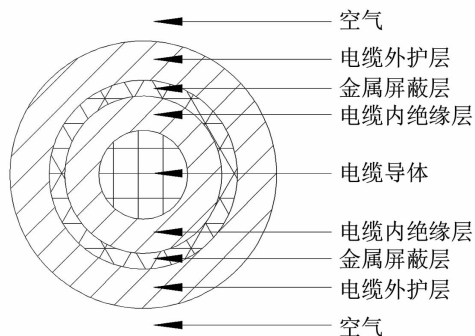


图 3 单芯电缆结构模型

考虑到电缆并联运行可以看作工频似稳电磁场,因此有限元模型做如下简单处理^[14]:1)考虑电缆敷设长度远远大于电缆直径,采用二维瞬态场进行有限元计算;2)导体的电导率为常数;3)忽略铁磁物质的磁滞效应。

3.2 同相 2 根电缆并联运行分析

导体材质、导体连接质量和各电缆间互感均会对电缆阻抗造成一定程度的影响^[15-16]。根据第 1 章中分析可知,同相并联电缆间存在不同载流现象主要由各回电缆间互阻抗存在差异造成。而电缆的空间排布会对各电缆的互感造成显著影响。因此可以通过优化空间布置,削弱电缆间互感影响,达到同相并联电缆载流平衡。以截面 2500 mm²、型号 YJTLW02-290/500 的铜芯交联聚乙烯绝缘电力电缆为例(电缆结构参数详见表 1),建立上述电缆有

限元简化模型,对同相 2 根 500 kV 单芯电缆的并联运行进行场路耦合计算,并考虑电缆在不同布置方案下的运行效果。

图 4 为 2 根电缆并联运行方式下的不同排列方案,各方案中相邻电缆间隔均与电缆外径 $D = 170$ mm 相同。方案 1 为最常见的电缆水平敷设方案,同相两根电缆相邻,一字排开水平敷设;方案 2 至方案 6 则是考虑互感影响载流量的优化布置方案,其中方案 3 为横向镜像布置,方案 4 为竖向镜像布置,方案 5 为“品”字形对称布置,方案 6 为“品”字形镜像布置。

表 1 500 kV 单芯电缆结构参数

单位:mm

电缆参数	数值
导体半径	28.2
内绝缘层半径	60
金属屏蔽层内径(外径)	60(61)
外护层半径	85

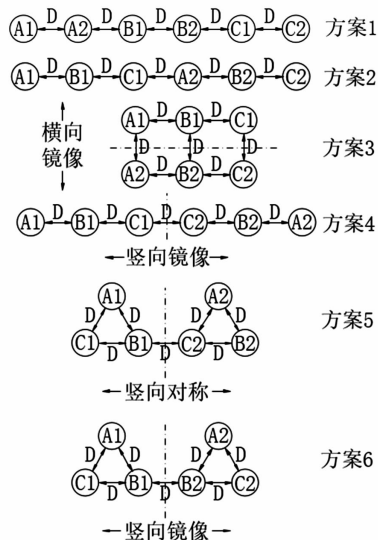


图 4 同相 2 根电缆并联运行方式下布置方案

经有限元计算,得到不同布置方案下不同电缆的载流量,见表 2。表 2 中, I_{A1} 、 I_{A2} 、 \dots 、 I_{C1} 、 I_{C2} 分别代表各相 2 根并联电缆载流量。

为更清楚地表示同相 2 根电缆并联运行下并联

表 2 不同布置方案下 2 根电缆并联运行载流量

单位:A

方案	I_{A1}	I_{A2}	I_{B1}	I_{B2}	I_{C1}	I_{C2}
1	1 669.42	2 354.75	2 105.08	2 141.33	2 326.90	1 687.00
2	1 753.59	2 264.82	1 993.44	2 016.35	2 267.21	1 749.02
3	1 999.93	1 999.93	1 999.97	1 999.97	2 000.02	2 000.01
4	1 999.96	1 999.98	1 999.93	1 999.98	2 000.00	2 000.00
5	1 997.85	2 008.38	2 172.52	1 837.16	1 841.54	2 169.14
6	1 999.94	1 999.90	1 999.59	1 999.67	1 999.59	1 999.57

电缆载流量的不平衡现象,表 3 给出了不同布置方

案下各相不平衡系数。表中: $k_A = \left| 1 - \frac{I_{A1}}{I_{A2}} \right|$; $k_B =$

$$\left| 1 - \frac{I_{B1}}{I_{B2}} \right|; k_C = \left| 1 - \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right|; k_{total} = \frac{k_A + k_B + k_C}{3}。$$

表 3 不同布置方案下各相载流量不平衡系数

方案	k_A	k_B	k_C	k_{total}
1	0.291	0.017	0.379	0.229
2	0.226	0.012	0.296	0.178
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0.005	0.183	0.151	0.113
6	0	0	0	0

由表 2、表 3 可以看出:采取布置方案 1 时,同相并联电缆间电流分配极不均衡,电缆载流量总不平衡系数最大;方案 2 较方案 1 载流量不平衡现象有所改善;而镜像布置方案 3、方案 4 则展现出优秀的电流均衡特性。因此,若采用布置方案 1、方案 2,会导致正常运行方式下系统输送容量大幅度降低,甚至出现部分电缆处于长期重载状态而造成过热击穿的问题,严重威胁输电系统运行可靠性。若采用方案 3、方案 4 所提镜像布置方案,两根同相并联电缆的载流量不平衡系数均接近于 0,具有最佳的电流均分效果。

而对于文献[9]和文献[11]提出的能够有效均匀分配电流的“品”字形布置,则亦设置了方案 5 和方案 6 两个布置方式作为对比。当采取“品”字形对称布置方案 5 时,三相电流不平衡系数由常规“一”字型布置方式下的 0.291、0.017、0.379 分别变化至 0.005、0.183、0.151,总不平衡系数由 0.229 下降至 0.113,降幅达 49.3%。通过有限元计算结果表明,“品”字形布置方案可有效改善电流均分效果,但仍存在电流不平衡现象。而当采取所提“镜像”布置方案 6 时,并联支路电流均分效果同上述镜像方案 3、方案 4,其不平衡系数降低至 0,具有最佳的电流均分效果。

3.3 500 kV GIS 电缆并联出线优化布置方案

市内变电站配电装置一般采用户内 GIS 型式,电缆出线终端与 GIS 电缆罐相连。布置方案 4 为“一”字排开,镜像排列,将会带来设备连接和空间布置上的困难。方案 6 为镜像的“品”字型排列,给电缆终端和 GIS 电缆罐的连接带来接口上的困难。

因此在实际工程应用中推荐采用方案 3 作为同相电缆并联的敷设方式。采用布置方案 3 的 GIS - 电缆出线断面如图 5 所示。

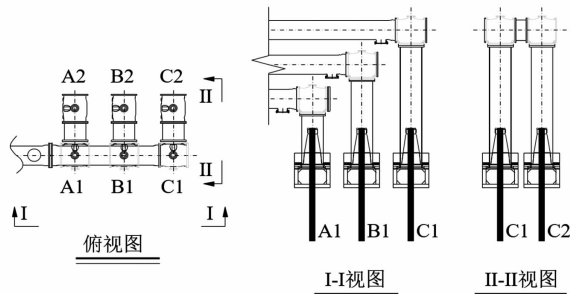


图 5 采用优化布置方案 3 的 GIS - 电缆出线断面

4 结 语

上面从 500 kV 高压单芯电缆同相多根并联运行实际需求出发,以电路拓扑为基础,给出了同相多根并联运行方式下各回电缆线路序阻抗计算方法,并通过理论推导得出“镜像”布置方案可实现同相并联电缆间互阻抗相等,从而使同相并联电缆获得最佳均匀通流效果。在上述理论分析的基础上,依托某 500 kV 新建变电站工程,采用有限元计算并分析不同布置方案下的同相 2 根电缆并联运行的电流分配特性,验证了所提“镜像”布置方案下电流均分效果最优的结论。最终,结合常规地下/半地下 500 kV GIS 出线条件给出了同相电缆 2 根并联方式下的推荐布置方案。

参考文献

- [1] 倪镭,唐宏德,曹林放,等. 上海城市地下变电站设计建设回顾与展望[J]. 华东电力,2011,39(8):1320 - 1323.
- [2] 荀旭丹. 城市地下变电站相关问题探讨[J]. 四川电力技术, 2011, 34(5): 64 - 66.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 徐应麟,马国栋. 某热电站一号发电机组至一号变压器电缆局部焦烧原因调查分析[C]//中国电工技术学

会电线电缆专业委员会年会,2000.

- [8] F Freschi, M Tartaglia. Power Lines Made by Many Parallel Single Core Cables: A Case Study [C] // IEEE Industry Applications Conference, 2006: 2230 – 2237.
- [9] 樊友兵, 赵健康, 钱康, 等. 单芯电力电缆同相多根并联运行方式分析与优化 [J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2607 – 2612.
- [10] 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.
- [11] 刘渝根, 尚龙龙, 田金虎, 等. 220 kV 四回高压电缆同相 2 根并联敷设方式优化研究 [J]. 高压电器, 2015, 51(12): 25 – 32.
- [12] 李光琦. 电力系统暂态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [13] 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.
- [14] 梁永春, 李彦明, 柴进爱, 等. 地下电缆群稳态温度

场和载流量计算新方法 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 185 – 190.

- [15] Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1 – 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General; IEC 60287 – 1 – 1 [S], 2014.
- [16] Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1 – 3: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – Current sharing between parallel single – Core cables and calculation of circulating current losses; IEC 60287 – 1 – 3 [S], 2002.

作者简介:

白亦斓(1990), 女, 工程师, 主要研究方向为特高压变电站电气设计;

周 特(1990), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为特高压变电站电气设计。

(收稿日期: 2021 – 01 – 21)

(上接第 15 页)

型 CVT 黑盒模型, 利用矢量匹配法、宏观无源化和福斯特 II 型等效电路建立了 π 型等值电路的 CVT 模型。为了验证该模型是否能够在宽频暂态电压的条件下表征 CVT 的端口特性, 通过网络分析仪测量 CVT 的 S 参数, 得到 π 型等值电路的 CVT 模型的各个元件参数后, 对 CVT 进行雷电过电压试验, 在已知 CVT 高压输入雷电波形的情况下利用支路电流法列写方程, 计算得到 CVT 二端口的输出波形。最终比较计算波形和测量得到的波形, 二者近似相同, 验证了所建立的 CVT 宽频暂态模型的正确性。

参考文献

- [1] 杜欣宇. 电容式电压互感器宽频无源电路模型的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [2] Dean A Frickey. Conversions Between S, Z, Y, h, ABCD, and T Parameters which are Valid for Complex Source and Load Impedances [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994, 42(2): 205 – 211.
- [3] Morched A, Gustavsen B, Tartibi M. A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1032 – 1038.
- [4] 张喜乐, 梁贵书, 董华英, 等. 变压器绕组的特快速暂态建模 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 55 – 59.
- [5] 张重远, 徐志钮, 律方成, 等. 电压互感器的高频无源

电路模型 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 77 – 82.

- [6] B Gustavsen, A Semlyen. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1052 – 1061.
- [7] B Gustavsen. Improving the Pole Relocating Properties of Vector Fitting [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1587 – 1592.
- [8] D Deschrijver, M Mrozowski, T Dhaene, et al. Macromodeling of Multiport Systems Using A Fast Implementation of the Vector Fitting Method [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(6): 383 – 385.
- [9] Adam Semlyen, Bjørn Gustavsen. A Half – size Singularity Test Matrix for Fast and Reliable Passivity Assessment of Rational Models [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 345 – 351.
- [10] 赵京生. 10 kV 电力变压器严格无源暂态电路模型建立方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [11] 吴仕军, 吴安坤, 邵莉丽, 等. 基于 Bergeron 模型的变电站雷电入侵分析 [J]. 科技创新与应用, 2017(21): 6 – 8.

作者简介:

潘 飞(1997), 男, 硕士, 主要从事高电压方向的研究工作;

穆 舟(1991), 男, 博士, 主要从事电力系统暂态过电压测量技术的研究工作。

(收稿日期: 2021 – 05 – 28)