

交流电缆并联运行均流补偿方法研究

张珏¹, 朱浩楠², 何伟明¹, 贺庶奇¹, 李化²

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510000; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘要: 交流电缆通过相内并联的方式来提高载流量, 由于电缆排布不对称导致了相内电流分配不均进而限制了电缆载流量的有效提升。文中提出了一种基于差模原理的高耦合分裂电抗器(HCSR)均流补偿方法, 通过算例计算验证了补偿后电流不均匀度的改善效果, 并分析了电缆排布方式、接线方式等因素对HCSR补偿参数的影响。研究表明: HCSR单臂自感不变时, 两臂电流差异越大, 能够补偿到电缆的电抗越大; 需要补偿到电缆的电抗不变时, 两臂电流差异越小, 需要的HCSR单臂自感越大。电缆长度为20 km时, 不同接线方式、排布方式下电流不均匀度最大为41.47%; 在文中研究的计算条件下, 当电缆采用一字排布、单点接地时、长度为20 km、间距为0.46 m时, 需要的HCSR单臂自感最大为5.85 mH。

关键词: 并联电缆; 电流分配不均匀; 高耦合分裂电抗器; 均流补偿

Research on Current Sharing Compensation Method for Parallel Operation of AC Cables

ZHANG Jue¹, ZHU Haonan², HE Weiming¹, HE Shuqi¹, LI Hua²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Limited Liability Company, Guangzhou 510000, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The current carrying capacity of AC cable is increased by way of interphase parallel connection. Asymmetrical layout of cable leads to uneven current distribution in the phases, which limits the effective improvement of current carrying capacity of cable. In this paper, a high coupled split reactor (HCSR) current sharing compensation method based on the differential mode principle is proposed, and the improvement effect of the compensated current unevenness is verified by an example calculation, and the influence of such factors as layout of cable and wiring mode on HCSR compensation parameters is analyzed. The research results show that in case the self-inductance of single HCSR arm remains unchanged, the greater the current difference between the two arms, the greater the reactance to be compensated to the cable. When the reactance needing to be compensated to the cable remains unchanged, the smaller the current difference between the two arms, the greater the HCSR single-arm self-inductance to be required. When the length of cable is 20 km, the maximum current non-uniformity is 41.47% under different wiring and layout modes. Under the calculation condition researched in this paper, when the cable is in a straight-line configuration and grounded at a single point and in case of the length at 20 km with interval at 0.46 m, the required maximum HCSR single-arm self-inductance is 5.85 mH.

Keywords: parallel cable; uneven current distribution; high coupling split reactor; current sharing compensation

0 引言

电力电缆相较于架空线路有着占地面积小、输电可靠性高、利于城市美观等优点, 近年来已成为城

市输送电能的主要方式^[1-2]。随着城市负荷的飞速增长, 现有电缆载流量可能已无法满足飞速增长的负荷需求, 因此有必要对原有电缆进行容量扩充^[3-7]。工程上采用在原有电缆的基础上增设同相电缆并联

收稿日期: 2025-02-21

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(GDKJXM20231106)。

运行的方式来提高载流。

同沟敷设的并联电缆由于相距较近等因素使其电磁耦合影响较大,加之其排布不对称而出现负荷电流在并联电缆间分配不均匀的现象,将使得电流较小的电缆其额定载流量没有得到有效利用,电流较大的电缆因过大的载流而产生绝缘损伤等危害^[8]。

目前关于并联电缆均流补偿研究主要集中在并联电缆阻抗参数分析、分流不均匀度计算、电缆排布方式及接地方式影响因素分析等方面^[9-14]。

在并联电缆阻抗参数及分流不均匀度计算方面,文献^[15-17]根据 Carson 模型推导了并联电缆阻抗矩阵的计算方法,并以不同排布方式为例计算了并联电缆阻抗参数及电流不均匀度大小。

在电缆排布方式方面,主要研究电缆间距和几何位置对相内电流分配的影响。文献^[18]从电感矩阵的角度推导了并联电缆电流均匀分配时应满足的对称条件。文献^[19-20]通过改变并联电缆的相间距、回间距等位置参数研究其对电流不均匀度的影响。

在电缆接线方式方面,屏蔽层端接地、交叉互联接地等对相内电流分配有较大影响,交叉互联接地的效果优于单端接地。文献^[21]研究表明,采用单点接地方式时电流差异为 13.53%;采用屏蔽层交叉互联接地方式时电流差异为 6.9%。

在电流不均匀抑制措施方面,主要集中在优化

其空间布置上,文献^[22]通过理论推导得出“镜像相序”敷设方案可以实现相内并联电缆间互阻抗相等,从而获得最佳的分流效果。

经以上分析可知,目前关于并联电缆电流不均匀度的研究多集中在敷设前的排布方式和电缆参数等方面,而对于确定排布方式及接地方式的并联电缆如何降低其负荷电流不均匀度尚缺乏相应研究。基于此,本文提出了一种基于差模原理的高耦合分裂电抗器(high coupled split reactor, HCSR)补偿方法,分析了电缆排布方式、接线方式等影响因素作用下 HCSR 对相内电流不均匀分配的抑制作用。

1 并联电缆相内分流不均

1.1 原因分析

并联电缆电流分配不均是由于不同回路间的电磁耦合影响不尽相同,造成电流在并联电缆中非均匀分配。以“一字形 ABCabc”相序排布的并联电缆为例进行说明,如图 1 所示,对于 A、a 两相电缆,同回路的其他两相对该相的互感影响相同(图中上下相同颜色的实线箭头: $M_{BA}=M_{ba}$ 、 $M_{CA}=M_{ca}$),但另一回路的其他两相对该相的互感影响不同(图中上下相同颜色的虚线箭头: $M_{bA} \neq M_{Ba}$ 、 $M_{cA} \neq M_{Ca}$),这是造成电流在 A、a 相内分配不均的根本原因。其他两相分析同理。

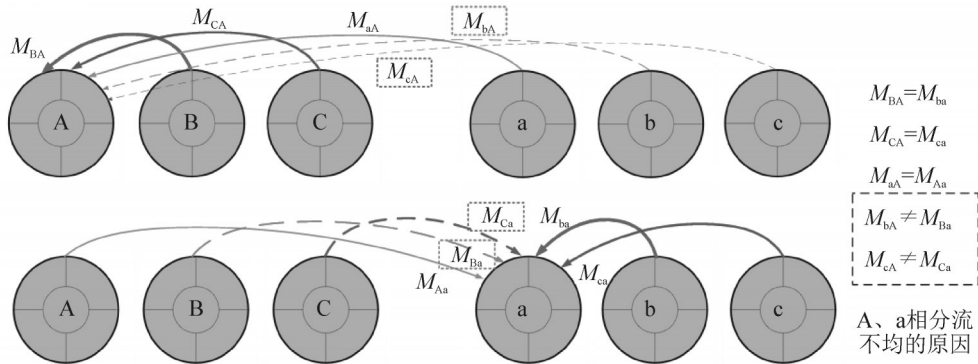


图1 并联电缆互感示意图
Fig. 1 Schematic diagram of mutual inductance of parallel cable

1.2 原理计算

图 2 为相内并联交流电缆的示意图,其电路方

程表示为^[23-24]

$$\begin{bmatrix} U_{AI} \\ U_{BI} \\ U_{CI} \\ U_{AII} \\ U_{BII} \\ U_{CII} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AIAI} & Z_{AIBI} & Z_{AICI} & Z_{AIAII} & Z_{AIBII} & Z_{AICII} \\ Z_{BIAI} & Z_{BIBI} & Z_{BICI} & Z_{BIAII} & Z_{BIBII} & Z_{BICII} \\ Z_{CIAI} & Z_{CIBI} & Z_{CICI} & Z_{CIAII} & Z_{CIBII} & Z_{CICII} \\ Z_{AIIAI} & Z_{AIIBI} & Z_{AII CI} & Z_{AIIAII} & Z_{AII BII} & Z_{AII CII} \\ Z_{BIIAI} & Z_{BII BI} & Z_{BII CI} & Z_{BIIAII} & Z_{BII BII} & Z_{BII CII} \\ Z_{CIIAI} & Z_{CII BI} & Z_{CII CI} & Z_{CIIAII} & Z_{CII BII} & Z_{CII CII} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{AI} \\ I_{BI} \\ I_{CI} \\ I_{AII} \\ I_{BII} \\ I_{CII} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_{AI} — U_{CII} 分别为第 I、II 回电缆三相电压; I_{AI} — I_{CII} 分别为第 I、II 回三相电缆中流过的电流,阻抗矩阵中 Z_{ii} 为电缆自阻抗; Z_{ij} 为电缆间互阻抗。

将式(1)表示为分块矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} U_I \\ U_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{I,I} & Z_{I,II} \\ Z_{II,I} & Z_{II,II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由并联回路电压相等($U_I=U_{II}$)得

$$(Z_{I,I} - Z_{II,I})I_I = (Z_{II,II} - Z_{I,II})I_{II} \quad (3)$$

若并联电缆分流均匀($I_I=I_{II}$),则有

$$Z_{I,I} - Z_{II,II} + Z_{II,I} - Z_{I,II} = 0 \quad (4)$$

一般两回路的自阻抗矩阵相等($Z_{I,I}=Z_{II,II}$),当并联电缆排布不对称而使得两回路间互阻抗矩阵不等($Z_{I,II} \neq Z_{II,I}$)时,将造成两回路电流的差异($I_I \neq I_{II}$)。

1.3 算例计算

以图2所示的一字形 ABCabc 相序排列为例,对其电感矩阵进行计算说明。

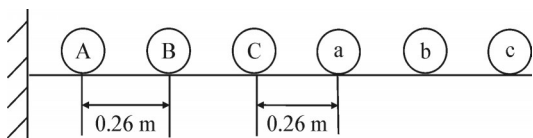


图2 并联电缆一字形排布示意图

Fig.2 Single-line layout schematic diagram of parallel cable

由 Carson 线路模型可以得到各根电缆的自感抗及互感抗大小,进而得到式(2)中所示的各个感抗矩阵公式为

$$Z_{I,II} = \begin{bmatrix} 0.6411 & 0.4915 & 0.4480 \\ 0.4915 & 0.6411 & 0.4915 \\ 0.4480 & 0.4915 & 0.6411 \end{bmatrix} \Omega/\text{km} \quad (5)$$

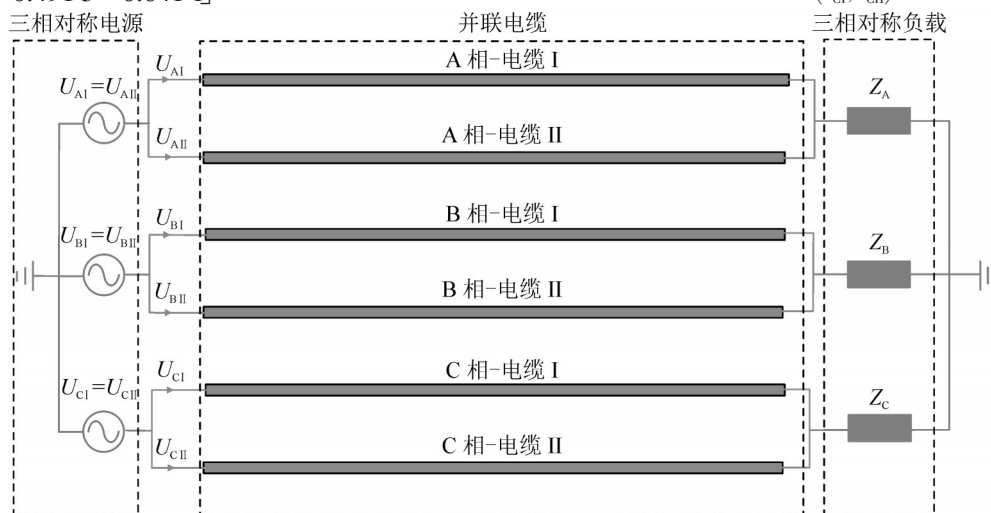


图3 相内并联电缆

Fig.3 Parallel cables in the phases

2 HCSR 工作原理

2.1 原理分析

如图4所示,高耦合分裂电抗器(HCSR)工作原理与差模电感类似。干路导线一分为二形成两个线圈分别构成两条支路,通过共同缠绕在一铁芯上建立电磁耦合关系^[28-29]。两臂线圈自感为 L ,互感为 M ,耦合系数 k 接近于 1。

HCSR 两臂线圈反向耦合,两臂电流幅值相等时,自、互感电压之和为 0,对外呈短路状态不影响

$$Z_{I,II} = \begin{bmatrix} 0.4505 & 0.4430 & 0.4275 \\ 0.4430 & 0.4505 & 0.4430 \\ 0.4275 & 0.4430 & 0.4505 \end{bmatrix} \Omega/\text{km} \quad (6)$$

$$Z_{II,I} = \begin{bmatrix} 0.4505 & 0.4430 & 0.4275 \\ 0.4430 & 0.4505 & 0.4430 \\ 0.4275 & 0.4430 & 0.4505 \end{bmatrix} \Omega/\text{km} \quad (7)$$

$$Z_{II,II} = \begin{bmatrix} 0.6411 & 0.4915 & 0.4480 \\ 0.4915 & 0.6411 & 0.4915 \\ 0.4480 & 0.4915 & 0.6411 \end{bmatrix} \Omega/\text{km} \quad (8)$$

可以看出,由于一字形 ABCabc 相序排列为非对称排布方式,使得 $Z_{I,I} - Z_{II,II} + Z_{II,I} - Z_{I,II} \neq 0$,进而造成负荷电流在同相并联之间非均匀分配。

1.4 参数定义

相内并联交流电缆示意图如图3所示,分析中电源和负载对称, I_{II} 和 I_{III} 分别为 i 相中($i=A, B, C$)两根并联电缆 I、II 流过的电流。定义各相电缆电流不均匀度 k_A, k_B, k_C 公式为^[25-27]

$$k_A = \frac{\max(I_{AI}, I_{AII}) - \min(I_{AI}, I_{AII})}{\max(I_{AI}, I_{AII})}$$

$$k_B = \frac{\max(I_{BI}, I_{BII}) - \min(I_{BI}, I_{BII})}{\max(I_{BI}, I_{BII})} \quad (9)$$

$$k_C = \frac{\max(I_{CI}, I_{CII}) - \min(I_{CI}, I_{CII})}{\max(I_{CI}, I_{CII})}$$

系统正常运行;两臂电流幅值不等时,自、互感电压之和不为 0,对外呈现出一定大小的电抗特性进行均流调节,由两臂电流差异引起的感应电压可强制使两并联支路电流平衡达到均流效果^[30-33]。

假设两臂电流幅值关系为 $I_1 > I_2$,则两臂线圈电压分别为

$$\begin{cases} U_1 = j\omega LI_1 - j\omega k LI_2 = X_L(I_1 - kI_2) > 0 \\ U_2 = j\omega LI_2 - j\omega k LI_1 = X_L(I_2 - kI_1) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

HCSR 的耦合系数 k 取 0.98,为了简化运算计算中近似取值为 1,则 HCSR 两臂对外表现出的电

抗 ΔX_1 、 ΔX_2 可表示为

$$\begin{cases} \Delta X_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{X_L(I_1 - I_2)}{I_1} = \left(1 - \frac{I_2}{I_1}\right)X_L > 0 \\ \Delta X_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{X_L(I_2 - I_1)}{I_2} = \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)X_L < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中： ΔX_1 、 ΔX_2 为 HCSR 补偿到两支路的电抗； X_L 为 HCSR 单臂自感； I_1 、 I_2 分别为两支路的电流幅值。

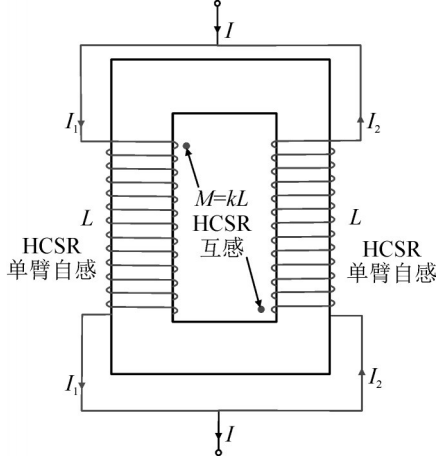


图4 HCSR结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of HCSR structure

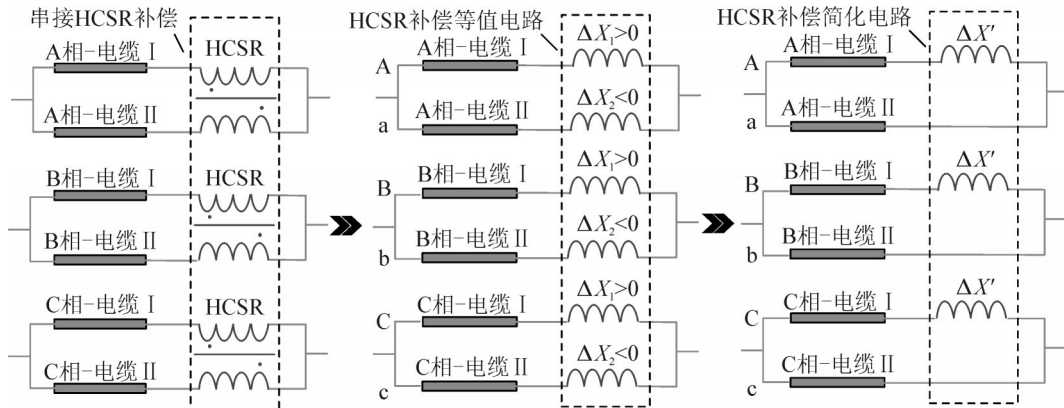


图5 HCSR等值电路

Fig. 5 Equivalent circuit of HCSR

两臂补偿电抗 ΔX_1 、 ΔX_2 可用单臂等效补偿电抗来表示,其数值关系为

$$|\Delta X'| = |\Delta X_1| - |\Delta X_2| \quad (13)$$

由式(10)可知,两臂补偿电抗 ΔX_1 、 ΔX_2 与其两臂电流差异的关系为

$$\frac{|\Delta X_1|}{|\Delta X_2|} = \frac{1 - \frac{I_2}{I_1}}{\frac{I_1}{I_2} - 1} = \frac{I_2}{I_1} \quad (14)$$

式中, I_1 、 I_2 分别为两支路的电流幅值。

联立式(13)-(14),可得等效单臂补偿电抗与两臂电流幅值之间的数值关系为

由式(10)可知,当 HCSR 单臂自感 X_L 不变时,电流差异越大,能够补偿到两支路的电抗 ΔX 模值越大。又由式(10)可得, HCSR 单臂自感 X_L 与补偿电抗 ΔX 和两臂电流幅值 I_1 、 I_2 关系为

$$X_L = \frac{\Delta X_1}{1 - \frac{I_2}{I_1}} \quad (12)$$

式中： ΔX_1 为数值为正的补偿电抗； I_1 、 I_2 分别为两支路的电流幅值。

由式(12)可知,需要补偿到各支路的电抗 ΔX 越大、电流差异越小,对应的 HCSR 单臂自感 X_L 越大。

2.2 等值电路

由以上分析可知,HCSR 在电流较大的支路补偿一个数值为正的电抗 ΔX_1 加强原电抗而减小电流;在电流较小的支路补偿一个数值为负的电抗 ΔX_2 削弱原电抗而增大电流,补偿电抗 ΔX 由两臂电流差异产生的自、互感电压之差来提供,由此可以得到图 5 所示的等值电路。

$$\Delta X' = \left(1 + \frac{I_1}{I_2}\right)\Delta X_L \quad (15)$$

将式(10)代入式(15)进而得到单臂等效补偿电抗与两臂电流幅值和 HCSR 单臂自感 X_L 之间的数值关系为

$$X_L = \frac{\Delta X''}{\frac{I_1}{I_2} - \frac{I_2}{I_1}} \quad (16)$$

式中, I_1 、 I_2 分别为两支路的电流幅值。

3 算例分析

3.1 计算条件

基于以上并联电缆负荷电流不均匀度产生原

因及 HCSR 的补偿方法分析,对表 1 所示结构参数及图 6-7 所示的一字形、品字形排布方式,图 8-9 所示的单点接地、交叉互联接地方式的单芯电缆进行算例分析。首先计算不同排布方式、接地方式、电缆长度及间距下负荷电流不均匀度大小,然后将电流不均匀度降低至 5% 以下为补偿目标,研究不同影响因素下的补偿电感与需要的 HCSR 单臂自感大小变化规律。

表 1 电缆本体结构参数表
Table 1 Parameters of cable structure

电缆结构	材料	厚度/mm	尺寸/mm
导体	铜	—	61.5
半导体层	—	0.12	62.5
导体屏蔽	—	2.0	66.5
绝缘	XLPE	24.0	114.5
绝缘屏蔽	—	1.5	117.5
金属护套	铝	2.8	144.0
外护套	PVC	5.0	154.0

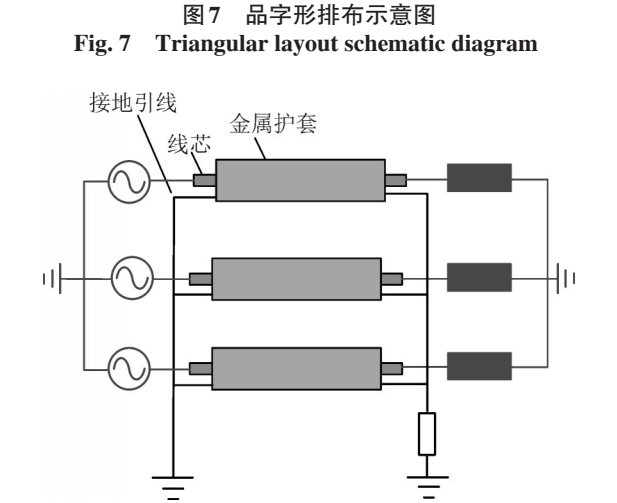
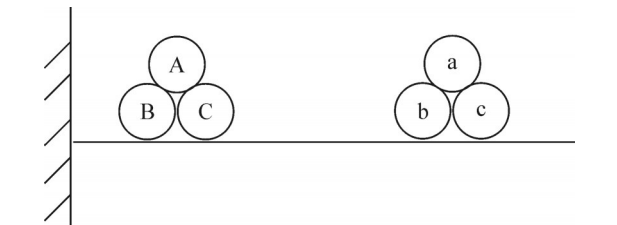
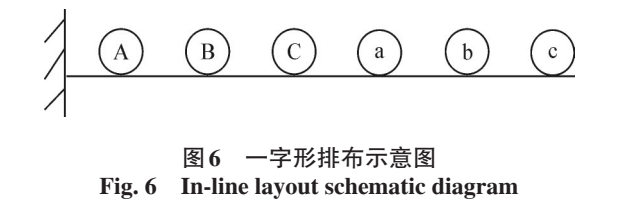


图 8 电缆护套单点接地示意图
Fig. 8 Single point grounding schematic diagram of cable sheath

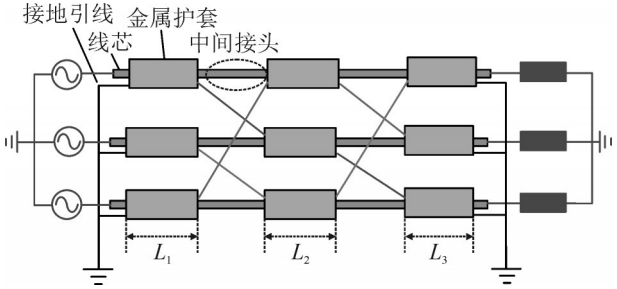


图 9 电缆护套交叉互联接地示意图
Fig. 9 Cross interconnection grounding schematic diagram of cable sheath

3.2 结果分析与讨论

1) 电流不均匀度: 通过以上的原理分析及计算,可以得到不同排布方式及接地方式下并联电缆电流不均匀度的数值大小。图 10-13 为不同排布方式、接地方向下补偿前电流不均匀度随电缆长度、间距的变化曲线。

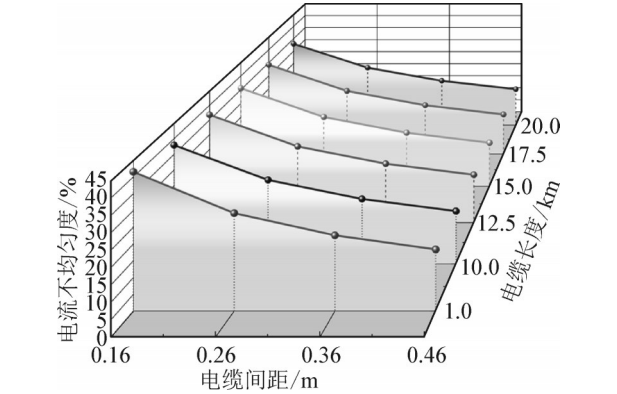


图 10 一字排布、电缆护套单点接地时关系曲线
Fig. 10 Relationship curve under single-line layout and single point grounding of cable sheath

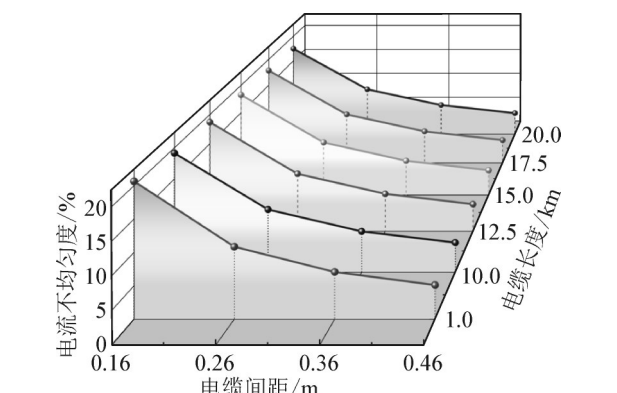


图 11 一字排布、电缆护套交叉互联时关系曲线
Fig. 11 Relationship curve under single-line layout and cross-connection of cable sheath

由图 10-11 可知,在接地方式方面,交叉互联的电流不均匀度小于单点接地。一字形排布方式下,长度为 20 km、间距为 0.16 m 时,单点接地的电流不均匀度为 32.92%,交叉互联的电流不均匀度为 17.42%。

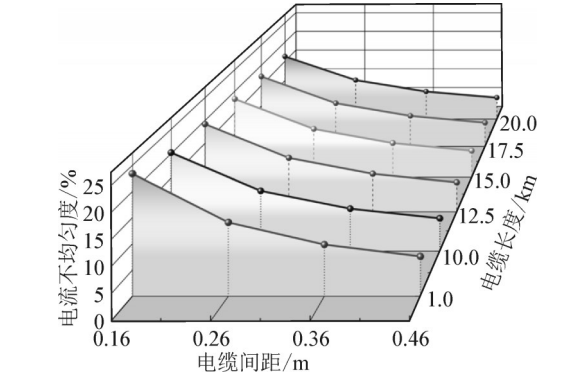


图 12 品字排布、电缆护套单点接地时关系曲线
Fig. 12 Relationship curve under triangular layout and single point grouding of cable sheath

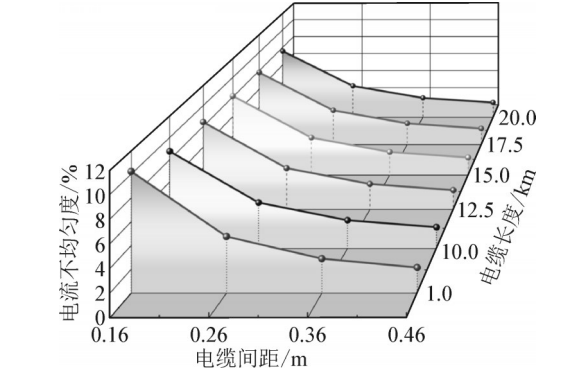


图 13 品字排布、电缆护套交叉互联时关系曲线
Fig. 13 Relationship curve under triangular layout and cross -connction of cable sheath

由图 10、12 可知,在排布方式方面,一字形排布的电流不均匀度大于品字形排布。单点接地方式下,长度为 20 km、间距为 0.16 m 时,一字排布的电流不均匀度为 32.92%,品字排布的电流不均匀度为 16.24%。

由图 10-13 可知,在电缆间距方面,电缆排布方式及长度不变时,电流不均匀度随电缆间距的增大而降低。在电缆长度方面,电缆排布方式及间距不变时,电流不均匀度数值相近。

2) 补偿电感:为了降低负荷电流不均匀度,需要对其进行电感补偿。图 14-17 为等效补偿电感随电缆长度、间距变化曲线。

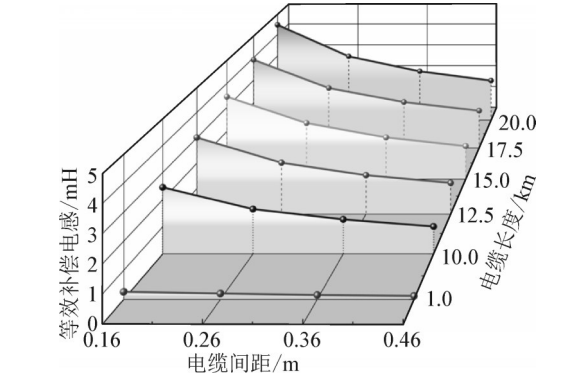


图 14 一字排布、电缆护套单点接地时关系曲线
Fig. 14 Relationship curve under single-line layout and single point grouding of cable sheath

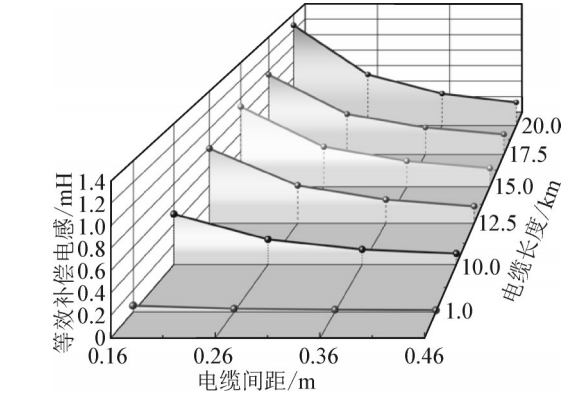


图 15 一字排布、电缆护套交叉互联时关系曲线
Fig. 15 Relationship curve under single-line layout and cross -connction of cable sheath

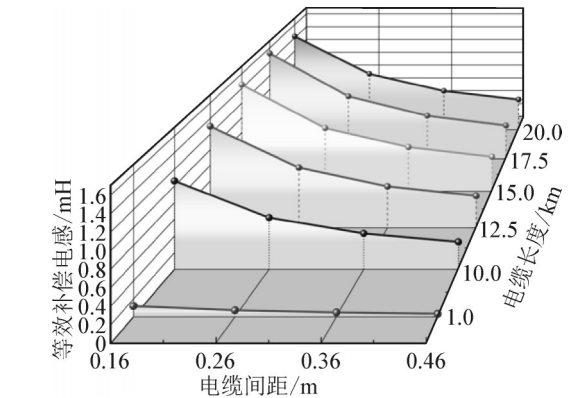


图 16 品字排布、电缆护套单点接地时关系曲线
Fig. 16 Relationship curve under triangular layout and single point grouding of cable sheath

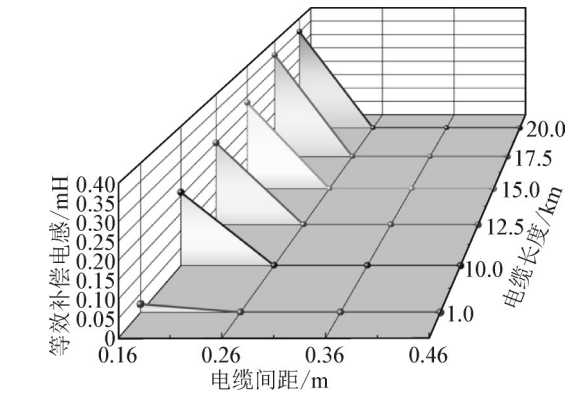


图 17 品字排布、电缆护套交叉互联时关系曲线
Fig. 17 Relationship curve under triangular layout and cross -connction of cable sheath

由图 14-17 可知,在电缆间距方面,电缆排布方式及长度不变时,补偿电感随电缆间距的增大而减小。一字形排布、单点接地下,电缆长度为 20 km 时,0.16 m 间距对应的补偿电感为 4.45 mH,0.46 m 间距对应的补偿电感为 1.85 mH。

在电缆长度方面,电缆排布方式及间距不变时,补偿电感随电缆长度的增大而增大。一字形排

布、单点接地,电缆间距为 0.46 m 时,10 km 长度对应的补偿电感为 1.01 mH,20 km 长度对应的补偿电感为 1.85 mH。

3)HCSR 单臂自感:由前面计算得到的负荷电流不均匀度及等效补偿电感可以计算求得需要的 HCSR 单臂自感大小。图 18-21 为 HCSR 单臂自感随电缆长度、间距的变化曲线。

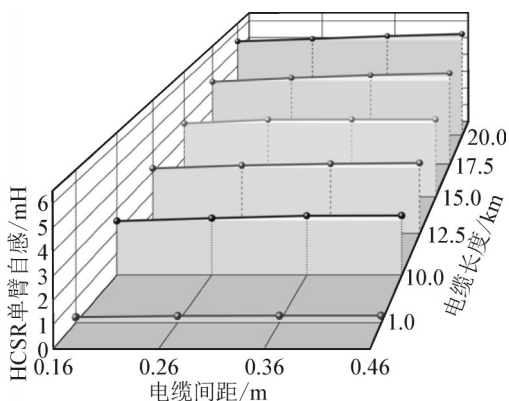


图 18 一字排布、单点接地时关系曲线
Fig. 18 Relationship curve under single-line layout and single point grounding

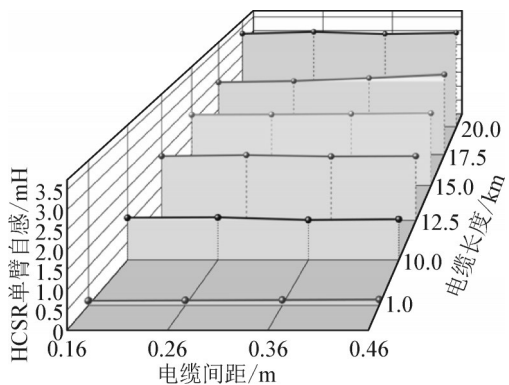


图 19 一字排布、电缆护套交叉互联时关系曲线
Fig. 19 Relationship curve under single-line layout and cross-connection of cable sheath

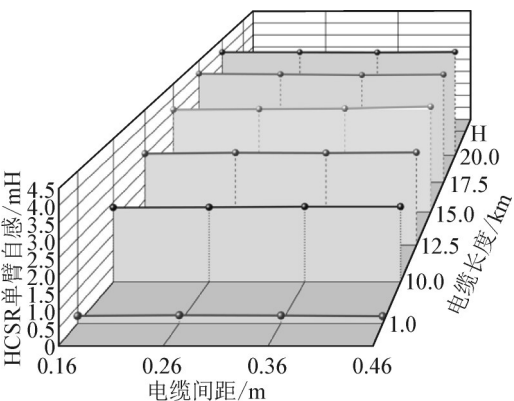


图 20 品字排布、电缆护套单点接地时关系曲线
Fig. 20 Relationship curve under triangular layout and single point grounding of cable sheath

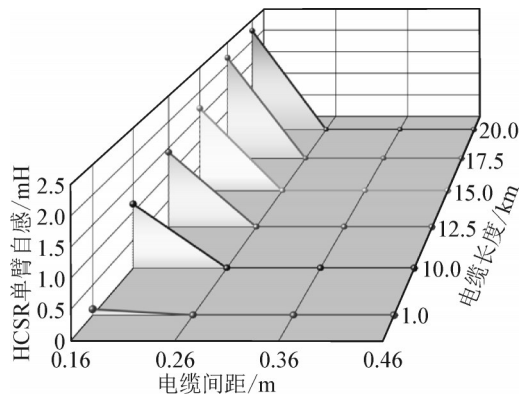


图 21 品字排布、电缆护套交叉互联时关系曲线
Fig. 21 Relationship curve under triangular layout and cross connection of cable sheath

由图 18-21 可知,在电缆间距方面,电缆排布方式及长度不变时,不同间距下 HCSR 单臂自感数值接近。一字排布、单点接地时,电缆长度为 20 km、0.16 m 间距,对应的 HCSR 单臂自感为 5.43 mH,0.46 m 间距对应的 HCSR 单臂自感为 5.85 mH。

在电缆长度方面,电缆排布方式及间距不变时,HCSR 单臂自感随电缆长度的增大而增大。一字形排布、单点接地时,电缆间距为 0.46 m、长度为 10 km,对应的 HCSR 单臂自感为 2.72 mH,20 km 电缆长度对应的 HCSR 单臂自感为 5.85 mH。

4 结语

本文基于并联电缆电流分配不均的问题,提出了一种基于差模原理的 HCSR 补偿方法,两臂电流不等时 HCSR 对外表现出高抗特性进行电抗补偿,两臂电流接近时 HCSR 对外表现出低抗特性而不影响电缆正常运行。对电缆排布方式、接地方式、回间距和长度进行影响因素分析,得到了不同条件下需要补偿的等效电抗 ΔX 与对应的 HCSR 单臂自感 X_L 大小,具体结论为:

1)在电流不均匀度的变化规律方面:电缆回间距越大,电缆间电磁耦合影响程度越弱,电流不均匀度越小;品字形排布、交叉互联接地相较于一字形排布、单点接地的电流不均匀度更小;

2)在 HCSR 单臂自感参数方面:相同电缆长度下,电流不均匀度越小,需要补偿的等效电抗 ΔX 越小,对应的 HCSR 单臂自感 X_L 数值接近。相同电流不均匀度下,电缆长度越大,补偿的等效电抗 ΔX 越大,对应需要的 HCSR 单臂自感 X_L 则越大。在文中研究的计算条件下,当电缆采用一字排布、单点接地时、长度为 20 km、间距为 0.46 m 时,需要的 HCSR 单臂自感最大为 5.85 mH。

参考文献

- [1] 陈飞,李征,孙义,等. 并联电缆参量差异对其载流分配的影响[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 227-233.
CHEN Fei, LI Zheng, SUN Yi, et al. Influence of Parameter difference between parallel cables on current-carrying distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 227-233.
- [2] 林福昌. 高电压工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [3] 宋微,贾步超,张鹏,等. 基于IRC法和局部放电法的车载高压电缆绝缘状态评估[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 118-127.
SONG Wei, JIA Buchao, ZHANG Peng, et al. Insulation condition assessment of vehicle high voltage cable based on IRC method and partial discharge method[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 118-127.
- [4] 温才权,韦鑫,王杰,等. 基于CEEMD-PSD算法的变电站控制电缆故障定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(7): 80-89.
WEN Caiquan, WEI Xin, WANG Jie, et al. A fault location method of substation control cables based on CEEMD-PSD algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 80-89.
- [5] 高春林,刘国锋,胡意茹,等. 基于拓展峭度的电缆缺陷高分辨率定位方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 159-166.
GAO Chunlin, LIU Guofeng, HU Yiru, et al. High resolution locating method of cable defect based on extended kurtosis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 159-166.
- [6] 刘凤莲,卢金奎,张涵轶,等. 高压电缆接头防火防爆措施的有效性研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 258-268.
LIU Fenglian, LU Jinkui, ZHANG Hanyi, et al. Study on effectiveness of fire-proof and explosion-proof measures for high-voltage cable joints[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 258-268.
- [7] 景巍巍,谢坤,李鸿泽,等. 硅橡胶绝缘高压电缆附件的老化特性研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 201-210.
JING Weiwei, XIE Kun, LI Hongze, et al. Research on aging characteristics of silicone rubber insulated high voltage cable accessories[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 201-210.
- [8] 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. Asymmetry analysis of line parameters of multiple parallel cables [J]. High Voltage Technology, 2010, 36(12): 3119-3124.
- [9] 曹玉石,张慧媛,许军,等. 基于行波相位特征的海上风电柔直电缆故障保护方法的研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 81-87.
CAO Yushi, ZHANG Huiyuan, XU Jun, et al. Research on fault protection method of offshore wind power flexible direct cable based on traveling wave phase characteristics[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 81-87.
- [10] 伍美娟,陈阳,梁振锋,等. 架空-电缆混合线路接地故障距离保护整定研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(6): 77-83.
WU Meijuan, CHEN Yang, LIANG Zhenfeng, et al. A study on setting of ground-fault distance protection for the overhead-cable hybrid line[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(6): 77-83.
- [11] 王兆琛,段玉兵,魏艳慧,等. 高压电缆绝缘热老化特性及破坏机理研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 56-64.
WANG Zhaochen, DUAN Yubing, WEI Yanhui, et al. Research on insulation thermal aging characteristic and destruction mechanism of high voltage cable[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 56-64.
- [12] 牛荣泽,张凯,谢芮芮,等. 基于随机森林的电缆管网综合监测系统研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 74-81.
NIU Rongze, ZHANG Kai, XIE Ruirui, et al. Research on monitoring system of cable network pipeline based on random forest[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 74-81.
- [13] 曾令诚,刘永,孟晨旭,等. 110 kV单芯电缆中间接头温度轴向感知模型的材料参数敏感性[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 41-50.
ZENG Lingcheng, LIU Yong, MENG Chenxu, et al. A study on the material parameter sensitivity of the intermediate joint temperature axial sensing model of 110 kV single core cable[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 41-50.
- [14] 秦剑华,刘洋,杨景刚,等. 电力电缆局放及温度的多维度检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 92-96.
QIN Jianhua, LIU Yang, YANG Jinggang, et al. Research on multi-dimensional detection method of partial discharge and temperature of power cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 92-96.
- [15] 郭春明. 高压单芯电缆金属护套环流分析及抑制方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- [16] 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 Technology, 2010, 36(10): 2607-2612.
- [17] 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.

- LIU Yugen, SHANG Longlong, TIAN Jinhu, et al. Study on optimization of 220 kV quad high-voltage cable laying in parallel with 2 parallel cables [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 25-32.
- [18]王辉. 某220 kV同相两根并联电缆输电方案设计[D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- [19]徐乐平, 牛海清, 陈泽铭, 等. 基于高压电缆载流量的同相多根并联电缆布置方式研究与相序优化[J]. 南方电网技术, 2019, 13(10): 54-61.
- XU Leping, NIU Haiqing, CHEN Zeming, et al. Research on the layout of same-phase parallel multi-cable and its phase sequence optimization based on ampacity of high voltage cable [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 54-61.
- [20]王晓彤, 项祖涛, 陈珍珍, 等. 500 kV XLPE海底电缆线路的电气参数及其不平衡度分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3812-3819.
- WANG Xiaotong, XIANG Zutao, CHEN Zhenzhen, et al. Analysis on electrical parameters and its unbalance factors for 500 kV XLPE submarine cable lines [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3812-3819.
- [21]王晓彤, 项祖涛, 宋新立, 等. 采用垂直排列的500 kV双回电缆线路参数的不平衡度分析[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 132-138.
- WANG Xiaotong, XIANG Zutao, SONG Xinli, et al. Analysis on unbalance factor of electrical parameters for 500 kV double-circuit cable line with vertical arrangement [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 132-138.
- [22]白亦澜, 涂扬, 李珊珊, 等. 500 kV高压单芯电缆并联运行关键技术研究[J]. 四川电力技术, 2021, 44(4): 27-32.
- BAI Yilan, TU Yang, LI Shanshan, et al. Research on key technology of parallel operation of 500 kV high-voltage single-core cable [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2021, 44(4): 27-32.
- [23]涂静芸. 基于护层环流法的高压电缆故障诊断与定位技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [24]林桂辉, 朱鹏宇, 王灿, 等. 基于Carson理论和EMTP的220 kV多回电缆线路电气参数及不平衡度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 142-148.
- LIN Guihui, ZHU Pengyu, WANG Can, et al. Analysis of electrical parameters and unbalance degree of 220 kV multi-loop cable lines based on Carson theory and EMTP [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 142-148.
- [25]王雄伟. 同并联电缆布置方式优化与继电保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [26]罗楚军, 冯玉雷, 李健, 等. 并联电缆负载容量利用率分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 127-136.
- LUO Chujun, FENG Yulei, LI Jian, et al. Analysis of load capacity utilization for parallel cables [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 127-136.
- [27]冯玉雷. 并联电缆运行特性及保护适用性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [28]向常圆. 基于高耦合分裂电抗器自动均限流技术的限流器运行工况研究[D]. 武汉: 中国电力科学研究院, 2020.
- [29]刘俊翔, 叶菁菁, 袁召, 等. 一种基于高耦合分裂电抗器的500 kV限流器拓扑[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2828-2837.
- LIU Junxiang, YE Jingjing, YUAN Zhao, et al. A 500 kV current limiter topology based on a highly coupled split reactor [J]. High Voltage Technology, 2021, 47(8): 2828-2837.
- [30]罗威. 基于高耦合分裂电抗器的限流器接入系统关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [31]尹婷, 陈轩恕, 杜砚, 等. 采用紧耦合电抗器的大容量高压断路器设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1577-1582.
- YIN Ting, CHEN Xuanshu, DU Yan, et al. Design of high-capacity high-voltage circuit breaker with tightly coupled reactor [J]. High Voltage Technology, 2010, 36(6): 1577-1582.
- [32]冯伦, 王培人, 苏海博, 等. 耦合分裂电抗器型限流器容量试验等效方法设计与实施[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 204-210.
- FENG Lun, WANG Peiren, SU Haibo, et al. Design and implementation of equivalent method for capacity test of coupled split reactor-type current limiter [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 204-210.
- [33]徐明. 故障限流器用复杂高耦合分裂电抗器建模及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- 作者简介:**
张珏(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事高压电缆运维与管理相关研究。E-mail: 13570212561@139.com。
朱浩楠(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术相关研究。E-mail: zhn2000@yeah.net。