

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802078

10 kV 与 110 kV 电缆线路混合敷设对环流影响研究

郭卫¹ 任志刚¹ 齐伟强¹ 郭鑫宇¹ 王名远¹ 戴润东² 方春华³(1.国网北京市电力公司电力科学研究院 北京 100075; 2.国网北京电力检修公司 北京 100069;
3.三峡大学 电气与新能源学院 宜昌 443002)

摘要:近年来,随着城市不同等级地下多回路电缆线路敷设的增多,其多回路造成的电缆金属护套环流损耗问题也趋于严重。基于电磁感应原理,计算了10、110 kV单芯电缆线路金属护套交叉互联时护套感应电压,并通过建立电缆线路阻抗模型推导环流矩阵方程,获得了不同电压等级线路中金属护套环流及相互影响。结果表明,混合敷设会造成10 kV线路环流增加和110 kV线路环流的减小;10、110 kV线路相间距增大会增加自身环流但相互影响却不同,110 kV线路相间距增大200 mm,10 kV线路环流增加48.99%,10 kV线路相间距增大200 mm,110 kV线路环流几乎不会发生变化;10、110 kV线路交叉互联单元内三段电缆段长改变会影响自身环流,但不会影响临近线路;负载电流增加均会极大影响环流;不同电压等级回路垂直距离越大,环流越小;环流最大相序组合为BAC-CAB(10~110 kV),最小环流相序为CBA-ACB(10~110 kV)。以上分析结果对电缆线路规划和设计提供了理论支持和数据支撑。

关键词: 电缆线路;混合敷设;交叉互联;环流

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.7099

Research on impact of mixed laying of 10 kV and 110 kV cable line on circulating current

Guo Wei¹ Ren Zhigang¹ Qi Weiqiang¹ Guo Xinyu¹ Wang Mingyuan¹ Dai Rundong² Fang Chunhua³

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China;

2. State Grid Beijing Electric Maintenance Company, Beijing 100069, China;

3. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In recent years, more and more multi-circuit cable lines of different voltage levels are laid underground of the cities, multi-circuit can cause the problems of circulation loss on cable metal sheath become severe, the different voltage levels of the cable lines are mixed laid, which have a greater impact on circulating current. Based on the principle of electromagnetic induction, calculating the induced voltage of 10, 110 kV single core cables in this paper, both of sheaths with applied cross-bonding connection. Circulating current matrix equation is figured out by the impedance model, and finally get the result of circulating current on the metal sheath of different voltage cable lines and the interdependent of each other. The results show that mixed-laying will lead the 10, 110 kV line circulating current increase and decrease; 10, 110 kV line's circulating current will increase with the increasing of space between different phases, but interaction between them is different, 10 kV line circulating current increased by 48.99% when 110 kV line phase spacing increased 200 mm, 10 kV line phase spacing increased 200 mm, the 110 kV line circulating current almost did not change; the arrange of three segments length of cable on cross-bonding unit will affect their own circulating current, but does not impact the circuit which next to; the varies of load current influence circulating current greatly; The greater the vertical distance between the 10, 110 kV line, the smaller the circulating current is; the circulating current is the largest as the phase sequence is BAC-CAB(10~110 kV), the smallest circulating current appears when the phase sequence is CBA-ACB(10~110 kV). The results above will have good reference for cable route planning and design.

Keywords: single-core cable; mixed laying; cross bonding; circulating current

0 引 言

随着城市中电缆使用量的上升,多回路电缆敷设于同一电缆通道内的情况也在增多。由于多回路的电缆处于同一个电缆通道内,各回路中通过的电流会对周围的电缆产生影响,并在各电缆间产生环流^[1-2],这不仅会给电力传输带来极大的损耗,同时也可能会损坏电缆的绝缘层,给电缆的安全运行带来隐患,因此,对于多回路电缆敷设带来的环流特征近年来时国内外研究的方向之一。文献[3-6]通过仿真与实验结合的方式计算了 110 kV 电缆的护套环流以及对应的影响因素,指出当 110 kV 线路的其他参数一样,单回路和双回路环流分别为 1.60 和 2.37 A,环流增加了 48.12%,这说明回路数增多对 110 kV 线路环流存在较大影响。文献[7]研究了 220 kV 电压等级线路下,相间距、交叉互联不同段长、不同相序等因素对环流的影响规律,并给出了一种电缆线路布置的优化方案。

以上文献研究表明同一电压等级线路多回路敷设对环流存在较大影响。但是目前只有较少文献涉及不同电压等级线路多回路混合敷设的情况,如 10 kV 和 110 kV 线路、10 kV 和 220 kV 线路对环流的影响规律等,这些敷设方式对于电缆环流的影响还亟待研究。

本文针对 10、110 kV 线路多回路混合敷设的情况,分析了回路间距、分段长度、入地距离、电缆电流、相序排列这 5 种不同工况下^[8-11],10 kV 与 110 kV 线路金属护套的环流大小和变化规律。研究结果可以为电缆多回路混合敷设提供数据参考和支持。

1 电缆金属护套环流解析计算

由于电磁效应,当电缆线路中存在时变的电流时,电缆周围会产生交变的磁场,进而在电缆周围产生磁通。随着磁通的变化,金属护套的感应电压也会改变,一旦金属护套与大地形成回路时,金属护套上便会产生环流^[12-13]。

研究环流最有效的方法是基于电力电缆的阻抗模型。该模型中忽略了充电电流和泄漏电流的影响,其电气接线简化图和环流计算阻抗模型等值电路分别如图 1、2 所示。

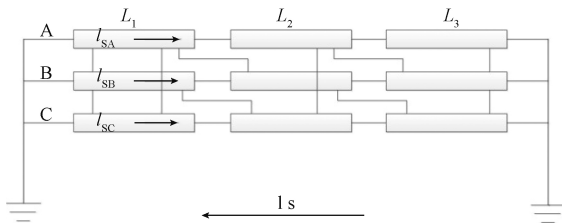


图 1 金属护套接地的模型简化图

其中 $L_1、L_2、L_3$ 为交叉互联单元三段长度,单位为 m; $I_{SA}、I_{SB}、I_{SC}$ 为 A、B、C 三相金属护套中环流,单位为 A; I_s 流入大地中的总的护套环流,单位为 A; $R_s、R_c$ 分别为护套电阻、大地漏电阻,单位为 Ω ; $R_1、R_2$ 为接地电阻,单位为

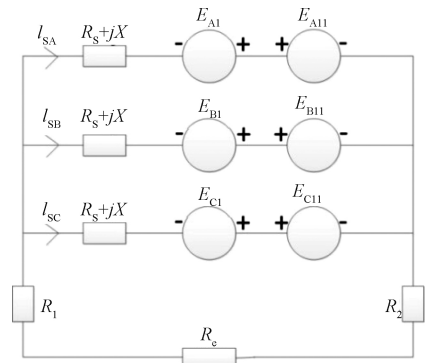


图 2 阻抗模型

Ω ; X 为护套自感抗,单位为 Ω ; $E_{A1}、E_{B1}、E_{C1}$ 为芯线电流在护套上的感应电压,单位为 V; $E_{A11}、E_{B11}、E_{C11}$ 为除自身以外其他两相环流在其护套上产生的感应电压^[14-16],单位为 V。

A、B、C 三相中金属护套上的感应电压 E :

$$E_A = \omega \times L_1 \times \varphi_A \times j + \omega \times L_2 \times \varphi_B \times j + \omega \times L_3 \times \varphi_C \times j$$

$$E_B = \omega \times L_1 \times \varphi_B \times j + \omega \times L_2 \times \varphi_C \times j + \omega \times L_3 \times \varphi_A \times j$$

$$E_C = \omega \times L_1 \times \varphi_C \times j + \omega \times L_2 \times \varphi_A \times j + \omega \times L_3 \times \varphi_B \times j \quad (1)$$

式中: $L_1、L_2、L_3$ 长度均为 500 m,整个线路长度为 1 500 m。 ω 为角频率。推导得到计算环流的矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} Z & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:方程的等号左边第 1 项为参数矩阵, Z 表示护套自阻抗,其余表示互阻抗,单位为 Ω ;等号右边代表感应电压,单位为 V;等号左边第 2 项为待求解环流,单位为 A。计算阻抗矩阵中参数和感应电压,即可求解各相环流大小。

2 10 kV 和 110 kV 电缆计算参数

高压、低压电缆均为交联聚乙烯绝缘电力电缆,详细电缆结构参数如表 1 所示。

大地漏电阻取默认值为 0.049 3 m Ω /m,大地电阻 $R_1、R_2$ 按 GB50168-2006 规定,均取 0.5 Ω 。10 kV 电缆金属护套的半径为 18.5 mm,110 kV 电缆金属护套的几何半径为 43 mm,金属护套电阻为 0.41 Ω 。

电缆通道内,10 kV 和 110 kV 电缆混合敷设的示意图如图 3 所示。

表1 10 kV、110 kV单芯电缆参数

名称	10 kV	110 kV
导体截面积/mm ²	300	600
绝缘层厚度/mm	5.0	17
外护套厚度/mm	3.1	1.5
成缆外径/mm	37	86

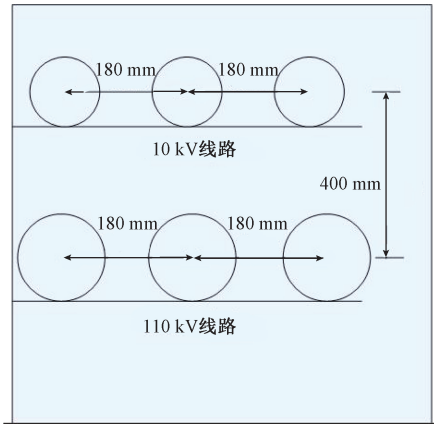


图3 混合敷设简易图

图3中,10 kV单芯电缆位于上方,三相电缆的相间距为180 mm;下排为110 kV单芯电缆,相间距为180 mm;上下排之间的垂直距离为400 mm。

3 混合回路对环流的影响

电缆沟内单独敷设10 kV双回路或110 kV双回路线路,两者布置方式一样时,电缆电压等级和缆芯电流成为影响环流的主要因素。结果如表2所示。

表2 不同电压等级双回路线路环流对比表

电压等级/kV	A相/A	B相/A	C相/A
10	2.03	2.03	2.03
110	3.80	3.80	3.80

混合敷设线路中,10、110 kV线路环流结果如表3所示。

表3 不同电压等级双回路线路混合敷设环流对比表

电压等级/kV	A相/A	B相/A	C相/A
10	2.40	2.40	2.40
110	2.84	2.84	2.84

混合敷设时110 kV线路环流降低,而10 kV线路环流增大。相比10、110 kV双回路线路单独敷设的情况,10 kV和110 kV线路混合敷设时环流分别增加18.23%和减小25.26%。

由阻抗模型可知缆芯电流越大,感应电压越大,相应环流也越大。10 kV线路中线芯电流要小于临近的110 kV线路,相比两条线路各自单独敷设时的情况,混合敷设时出现110 kV电缆环流降低而10 kV电缆增大的现象。

4 混合敷设线路相间距、段长、垂直距离的影响

4.1 10 kV线路相间距、段长对混合线路的影响

相间距会影响相与相之间互感抗大小,导致阻抗矩阵中互阻抗的不同,从而影响环流。10 kV线路相间距改变,环流结果如表4所示。

表4 10 kV、110 kV线路环流变化表1

相间距/ mm	10 kV			110 kV		
	A相/A	B相/A	C相/A	A相/A	B相/A	C相/A
100	2.38	2.38	2.38	2.83	2.83	2.83
200	2.40	2.40	2.40	2.84	2.84	2.84
300	2.42	2.42	2.42	2.85	2.85	2.85

10 kV线路相间距从100 mm变为300 mm时,10 kV环流增加0.04 A,增加1.65%;110 kV线路环流增加0.02 A,增加幅度为0.71%。从变化幅度上看,两种电压等级线路环流变化均较小。

在交叉互联的单元内,各电缆的长度理论上相等,但在实际工程中,由于施工中的路径变化等原因,会导致部分分段的长度与其他两段不同,这会造成分段段长不均匀。本文的仿真计算为10 kV线路中出现一段长度变化时,10和110 kV线路中护套环流的变化情况。如图4所示,图中 $L_1=L_2$,而 L_3 变化,计算结果如表5所示。

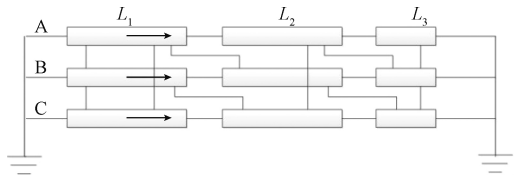


图4 段长不等

表5 10 kV、110 kV线路环流变化表2

L_3 段长/ m	10 kV			110 kV		
	A相/A	B相/A	C相/A	A相/A	B相/A	C相/A
450	6.27	2.63	2.75	2.80	2.87	2.88
480	3.95	1.63	2.22	2.83	2.86	2.86
510	1.63	3.02	2.64	2.86	2.84	2.84

10 kV线路中环流最大值出现在线路分段最不均匀的情况,即 $L_1=L_2=525$ m, $L_3=450$ m,此时三相环流相差也最大,环流最大值为6.27 A。段长只会影响自身线路上感应电压和同一回线路中相间互感抗大小,因此,10 kV线路段长不均匀对110 kV线路环流几乎没有影响,110 kV

线路环流均为 2.8 A 左右。

4.2 110 kV 线路相间距、段长对混合线路的影响

改变 110 kV 线路相间距,计算分析 10 kV 和 110 kV 线路护套环流变化情况,结果如表 6 所示。

表 6 10 kV、110 kV 线路环流变化表 3

相间距/ mm	10 kV			110 kV		
	A 相/A	B 相/A	C 相/A	A 相/A	B 相/A	C 相/A
100	1.98	1.98	1.98	2.56	2.56	2.56
200	2.51	2.51	2.51	2.92	2.92	2.92
300	2.95	2.95	2.95	3.23	3.23	3.23

110 kV 线路相间距从 100 变为 300 mm,10 kV 线路环流增大 0.97 A,增幅为 48.99%,而 110 kV 线路环流增加 0.67 A,增幅为 26.17%。一般情况下,电压等级越高则负载电流越大,相应线路上感应电压越大。同时相间距增大导致阻抗矩阵中系数变小,参照式(2)得知 110 kV 线路对整个线路的环流影响程度大于 10 kV 线路相间距改变对混合线路的影响。

讨论 110 kV 线路中 $L_1=L_2$,而 L_3 变化时,10 和 110 kV 线路中护套环流的变化情况。经计算可得结果如表 7 所示。

表 7 10 kV、110 kV 线路环流变化表 4

L_3 段长/ m	10 kV			110 kV		
	A 相/A	B 相/A	C 相/A	A 相/A	B 相/A	C 相/A
450	2.35	2.43	2.43	7.60	3.57	3.72
480	2.38	2.41	2.41	4.35	2.03	2.58
510	2.41	2.39	2.39	2.11	3.44	3.07

同 10 kV 线路段长不均匀所得结果一样,段长只会影响自身线路上感应电压和互感抗大小,而不会影响临近 110 kV 线路。

4.3 垂直距离对混合敷设线路的影响

10 kV 线路和 110 kV 线路上下排列,改变两回线路之间垂直距离,可以得到结果如表 8 所示。

表 8 环流变化

垂直距离/mm	10 kV	110 kV
50	3.88	4.11
100	3.66	3.89
200	3.31	3.61
300	2.58	2.97
400	2.40	2.84
500	2.23	2.70

由表 8 可知,随着垂直距离的增加,混合线路中环流均呈减小的趋势。环流随垂直距离的增加的变化曲线如图 5 所示。

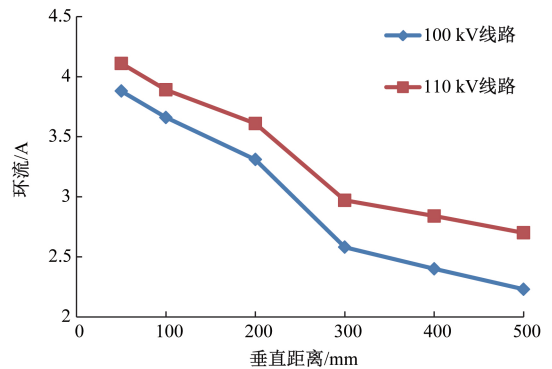


图 5 环流变化曲线 1

垂直距离从 200 增加到 300 mm,曲线斜率最大,表明环流改变最显著,10 kV、110 kV 线路环流分别减小 22.05%、17.73%。说明混合敷设线路中研究垂直距离,并优化垂直距离的必要性。

5 负载电流对混合敷设线路的影响

根据我国标准 IEC60364 和 JB/T10181 中查阅可知,导体温度达到 90 °C,环境温度为 25 °C 的情况下,10、110 kV 电缆各自允许的载流量分别为 450 和 635 A。实际中,根据实测情况,10 kV 负载电流一般在 100~400 A,而 110 kV 负载电流在 300~600 A。相关部门提供的运行资料中,该线路中,10 kV 的负载电流为 262 A,而 110 kV 线路的负载电流为 412.2 A。

110 kV 线路负载电流为 412.2 A 时,10 kV 线路负载电流在 100~400 A 变化,10、110 kV 线路环流变化情况如图 6 所示。

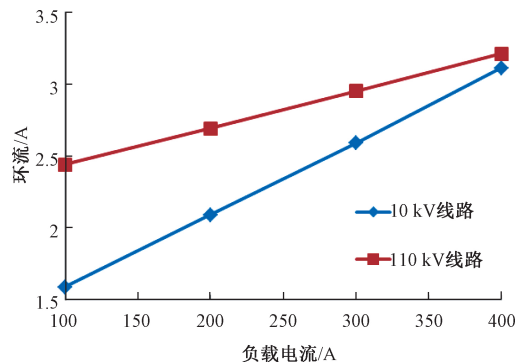


图 6 环流变化曲线 2

10 kV 线路中负载电流从 100 A 升到 400 A 时,环流增加 1.52 A,增长 95.60%;110 kV 线路环流增加 0.77 A,增长 31.56%。

10 kV 线路负载电流为 262 A,110 kV 线路负载电流在 300~600 A 变化,线路环流变化情况如图 7 所示。

110 kV 线路缆芯电流从 300 A 增加到 600 A,10 kV 线路环流增加 2.28 A,增幅 108.06%;110 kV 线路环流增

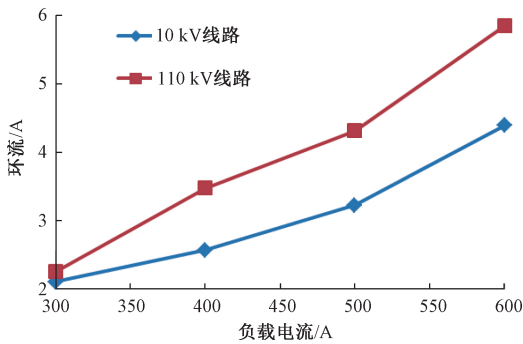


图7 环流变化曲线3

加 3.58 A,增幅 158.41%。负载电流决定感应电压大小,感应电压影响环流大小;电压等级越高,则负载电流和感应电压越大,对环流影响程度相应越大。所以 110 kV 线路负载电流变化对 10 kV、110 kV 线路中护套环流的影响大于 10 kV 线路中负载电流对环流影响。

6 相序对混合敷设线路的影响

当改变电缆的相序排布时,其原本的空间对称性也发生改变,这将直接影响到环流中电流的幅值,通过对改变相序后的环流进行测量并分析,可以得到最为理想的三相电缆空间布局的方式。对于每一个回路,相序的排列顺序有 A_3^3 即 6 种。

10 kV 线路相序改变,10、110 kV 线路环流分别如图 8 和 9 所示;110 kV 线路相序改变,10、110 kV 线路环流分别如图 10 和 11 所示。

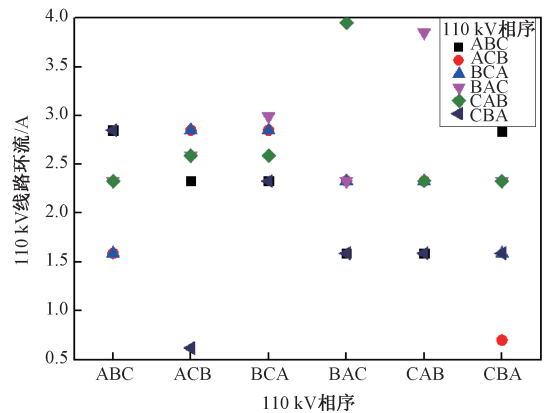


图9 110 kV 环流变化曲线 1

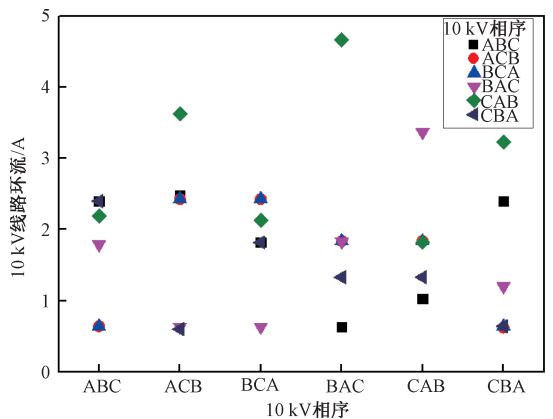


图10 10 kV 环流变化曲线 2

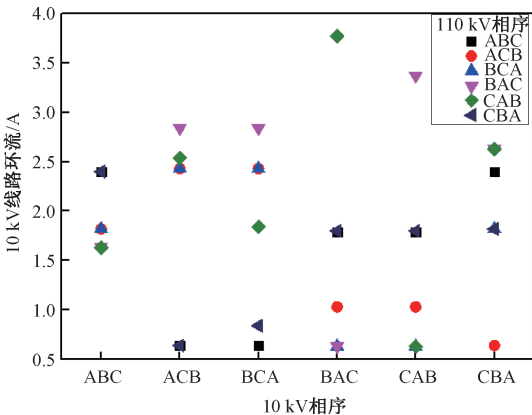


图8 10 kV 环流变化曲线 1

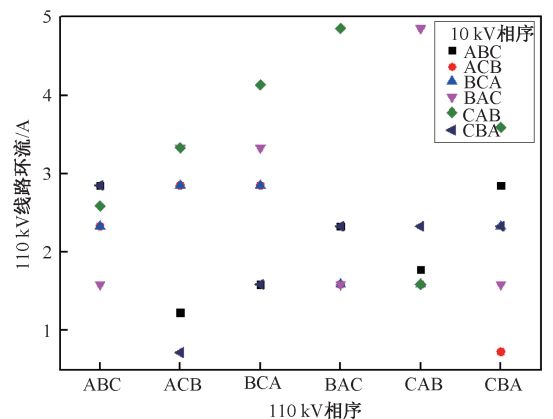


图11 110 kV 环流变化曲线 2

10 kV 相序改变时,10、110 kV 线路环流最大相序组合为 BAC-CAB,环流达到 4 A 左右;110 kV 相序改变时,10、110 kV 线路环流最大相序组合也为 BAC-CAB,环流达到 5 A 左右。无论是 10 kV 还是 110 kV 线路相序改变,相序组合 CBA-ACB 环流最小,大小为 0.5 A 左右。混合敷设线路中推荐 CBA-ACB 作为最优化相序组合。最大环流与最小环流相比差 10 倍,这说明研究混合敷设线路相序组

合的经济性。

7 结 论

本文采用解析计算的方法,分析了 10 kV 线路与 110 kV 线路混合敷设时环流变化规律,得到结论如下。

1)与单独敷设 110 kV 线路或 10 kV 线路相比,混合敷设线路中 110 kV 线路环流减小 25.26%,10 kV 线路环流

增加 18.22%。

2) 10 kV 线路相间距改变对环流影响很小, 间距从 300 mm 减小为 100 mm 时, 10、110 kV 线路环流分别减小 1.65%、0.71%; 110 kV 线路相间距对环流影响较大, 间距从 300 mm 减小为 100 mm 时, 10、110 kV 线路环流分别减小 48.99%、26.17%。

3) 混合敷设的各电压等级线路之间不因交叉互联分段段长不同而相互影响; 不同电压等级的两回路间垂直距离对环流具有较大影响, 尤其当垂直距离从 200 mm 增加到 300 mm 时, 10、110 kV 线路环流分别减小 22.05% 和 17.73%。

4) 负载电流对 10 kV 和 110 kV 混合线路环流均存在较大影响, 特别是 110 kV 线路负载电流从 300 A 增加 600 A 时, 两条线路环流增幅均超过 100%。

5) 混合线路中相序组合对环流具有很大影响, 不同相序组合, 环流变化幅度非常大, 最优组合和最差组合环流相差 10 倍左右。

参考文献

- [1] CZAPP S, DOBRZYNSKI K, KLUCZNIK J, et al. Computer-aided analysis of induced sheath voltages in high voltage power cable system [C]. IEEE the 10th International Conference on Digital Technologies, 2014.
- [2] 蔡成良. 浅谈湖北电网高压电缆金属护套环流问题[J]. 湖北电力, 2010, 34(4): 21-22, 75.
- [3] 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.
- [4] 刘英, 王磊, 曹晓珑. 双回路电缆护套环流计算及影响因素分析[J]. 高电压技术, 2007(4): 143-146.
- [5] 毛为民. 电力电缆相序阻抗计算与分析[J]. 供用电, 2002(4): 24-25.
- [6] GODDARD K F, PILGRIM J A, CHIPPENDALE R, et al. Induced losses in three-core SL-type high-voltage cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1505-1513.

- [7] 魏新劳, 朱博, 庞兵, 等. 长距离三相电力电缆绝缘在线监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2079-2086.
- [8] KONG X P, WANG Y X, ZHANG Z. Calculation of induced voltage in metal shield of single-core cable operated in parallel [C]. International Conference on Power System Technology, 2010.
- [9] 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.
- [10] 高俊国, 于平澜, 李紫云, 等. 基于有限元法的电缆金属护套感应电压仿真分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 714-720.
- [11] 方雷, 李勇, 王耀辉. LG 水电站 500 kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆金属护套感应电压计算[C]. 电气学术会议, 2013.
- [12] 罗俊华, 张丽, 刘毅刚, 等. 超高压大截面电力电缆线路热膨胀计算分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1281-1286.
- [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.
- [14] 赵作斌, 张克杰. 长距离不同电压等级电缆降压混合运行的实践方式[J]. 农村电气化, 2012(6): 29-30.
- [15] 刘泽元, 冯尧, 梁硕, 等. 航天器热试验加热电缆绝缘自动测试系统的设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(9): 252-256.
- [16] 刘鸿, 刘磊, 林圣, 褚继峰, 等. 电缆局放检测振荡波测试系统仿真与开发[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11): 6-10.

作者简介

郭卫, 博士, 主要研究方向为输电线路防雷以及电力系统接地技术。

E-mail: guoweiwhu@126.com