

运行方式对同塔线路的感应电压与电流影响分析

袁康龙

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]分析同塔四回架设的线路的感应电压、感应电流受相互间运行方式影响作用。[方法]通过以某实际工程为案例,对不同回路的停运方式组合、输送潮流大小等运行方式变化对感应电压、感应电流的影响进行分析。[结果]研究表明:被检测回路的电磁感应电流受同塔四回路中其它线路输送功率潮流增大而增大,且不同的回路停运方式主要通过改变运行回路与被检测回路的空间距离和电磁耦合,影响静电感应电压和电磁感应电流的大小。[结论]对同塔四回路两侧变电站的接地开关开合能力在不满足要求的情形下,提出了通过调整运行方式配合线路检修和投运的策略。

关键词: 运行方式; 感应电压; 感应电流; 线路检修

中图分类号: TM7; TM726

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0065-06

Analysis of Operation Mode on Induction Voltage and Induction Current of the Circuit Line of the Same Tower

YUAN Kanglong

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] The induction voltage and induction current of the four circuit of the same tower are greatly influenced by mutual operation mode. [Method] According to an example of practical project, the influence of different operation modes such as shutdown combination and transmission power flow on the induced voltage and induced current was analyzed. [Result] The results show that the electromagnetic induction current of the circuit under test increases with the increase of power flow on other transmission lines, and different outage modes affect the magnitude of electrostatic induction voltage and electromagnetic induction current by changing the space distance and electromagnetic coupling between the operation loop and the detected loop. [Conclusion] When the grounding switches of substations failed to meet the requirements to control the induction voltage and induction current, a strategy of adjusting the operation mode to cooperate with the line overhaul and put into operation is introduced.

Key words: operation mode; induction voltage; induction current; maintenance strategy

在城市负荷中心地区,土地资源日益紧张,线路走廊问题成为制约电力建设的关键因素。同塔多回输电技术可提高线路走廊的利用率,降低建设成本,已在线路走廊紧张的地区推广应用。目前同塔多回输电线路以同塔四回为主,包括混压架设和同一电压等级架设。与同塔双回路架设相比,同塔四回路中各导线之间存在更为复杂的静电和电磁耦合

关系,在感应电压、感应电流问题中停运检修线路将受同杆并架的其它线路的运行方式影响较大,计算将变得更为复杂。

文献[1-7]分析了同塔双回线路的感应电压和电流的计算问题,提出了同塔双回间的线路长度和输送功率对感应电压、感应电流的影响等因素。文献[8]分析了500 kV/220 kV同塔四回的停运工况、潮流大小、线路相序、四回路段占线路长度的比例、土壤电阻率等因素对混压同塔多回路感应电压、感应电流的影响。文献[9]中对500 kV五邑-狮洋和糯扎渡-顺德同塔四回线路的感

收稿日期: 2018-02-24 修回日期: 2018-05-28

基金项目: 中国能建广东院科技项目“同塔多回线路电气协同优化研究”(EV04051W)

应电压和感应电流进行研究,计算结果表明线路采用异相序或逆相序排列,对感应电压和感应电流影响不大。文献[10]分析了220 kV/110 kV混压同塔四回线路中线路长度、电压等级、线路运行电流和导线间距等参数对感应电压、感应电流的影响。文献[11]对同走廊的330 kV线路对在在建线路的感应电压、感应电流的影响分析,若线路距离较远,可忽略不计。

本文以广东地区某新建220 kV同塔四回线路作为案例,分析同塔架设的其它回路的不同运行方式对被检修回路的感应电压、感应电流的影响,确定最严重的运行方式,为新建变电站的接地开关设备选型提供依据。并分析了对侧变电站或同塔架设的其它两回线路两侧变电站接地开关在不满足要求的情况下进行线路停运或投运需采取的运行控制策略。

1 同塔四回路的感应电压、感应电流原理

对于一般的同塔四回路架设的线路,设第*i*回路的正常运行电压和运行电流分别 U_i 和 I_i ,设第*i*回路的自电容和与第*j*回路的互电容分别为 C_{ii} 和 C_{ij} ,设第*i*回路的自阻抗和与第*j*回路的互阻抗分别为 Z_{ii} 和 Z_{ij} 。对于静电感应,有:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于电磁感应,有:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

若对第4回线路进行检修,设其它线路的电压矩阵、电流矩阵分别简化为 U_e 和 I_e ,其它线路的自电容和与第4回路的互电容矩阵分别为 C_e 和 C_{e4} ,其它线路的自阻抗和与第4回路的互阻抗矩阵分别为 Z_e 和 Z_{e4} 。则计算第4回路的静电感应电压时,线路两端悬空, $I_4=0$,有:

$$\begin{bmatrix} C_e & C_{e4} \\ C_{e4}^T & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_e \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$U_4 = -C_{44}^{-1}C_{e4}^T U_e \quad (4)$$

计算第4回路的电磁感应电流时,线路两端节点, $U_4=0$,有:

$$\begin{bmatrix} Z_e & Z_{e4} \\ Z_{e4}^T & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_e \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$I_4 = -Z_{44}^{-1}Z_{e4}^T I_e \quad (6)$$

因此,被检修线路的感应电压、感应电流除了受导线之间的静电和电磁耦合程度影响外,与其它线路的运行电压和电流有密切关系。

2 运行方式影响分析

对于同塔四回架设的回路,涉及的回路停运运行方式工况包括单回停运、双回停运、三回停运等7种不同的工况,运行方式及检测工况分类如表1所示。

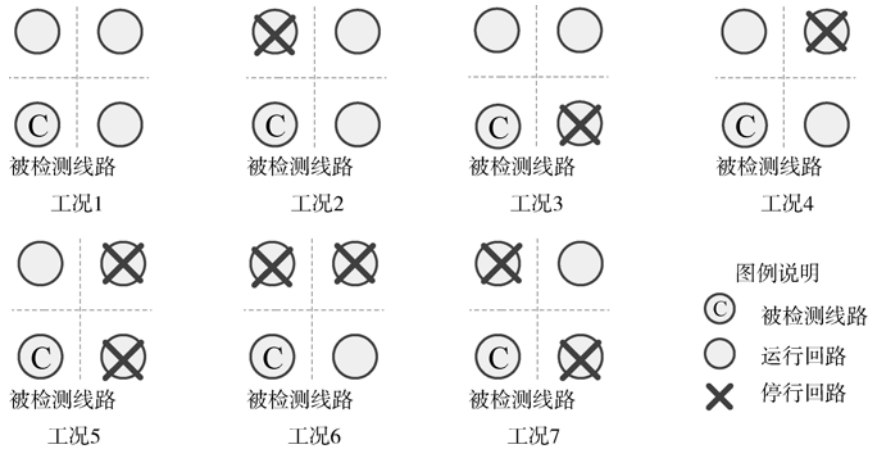
表1 同塔四回架设线路校验的运行方式及检测工况
Tab. 1 The operation mode and testing condition of transmission line check of the four circuit line of the same tower

停运回路数	运行方式及检测工况
1	被检测回路停运,其余三回正常运行
2	被测量回路和另一回停运,包括同侧、水平或对角分布
3	仅一回正常运行,在被测量回路同侧、水平或对角位置

以同塔四回路中左下方的回路作为被检测回路,则各种工况的示意图如图1所示。

以广东某地区的新建变电站及配套的220 kV同塔四回架设线路作为案例进行分析,其中变电站S1至变电站S2的220 kV线路全长约10 km,其中同塔双回路长约2 km,与变电站S3至变电站S4线路同塔四回路架设段全长约8 km,导线截面为 $2 \times 630 \text{ mm}^2$,最大输送容量按650 MVA考虑。变电站S3至变电站S4线路全长15 km,其中同塔双回路长约7 km,与变电站S1至变电站S2线路同塔四回路架设段全长约8 km,导线截面为 $4 \times 300 \text{ mm}^2$,最大输送容量按900 MVA考虑,电网接线示意图和同塔四回线路架设示意图如图2和图3所示。

以S1至S2甲线作为被检测回路,采用电磁暂态仿真软件ATP-EMTP建立上述模型^[12-13],对各种运行工况进行仿真计算。由于静电感应电流和电磁感应电压相对较小,一般情况下不同类型的接地



注：工况 1 为 1 回线路停运；工况 2 为 2 回线路同侧停运；工况 3 为 2 回线路水平停运；工况 4 为 2 回线路对角停运；工况 5 为 3 回线路停运同侧带电；工况 6 为 3 回线路停运水平带电；工况 7 为 3 回线路停运对角带电。

图 1 各种工况的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of various operation conditions

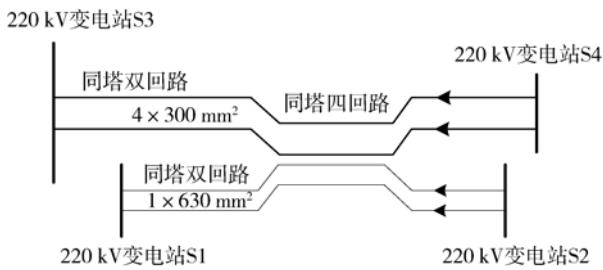


图 2 电网接线示意图

Fig. 2 Topology of the power grid

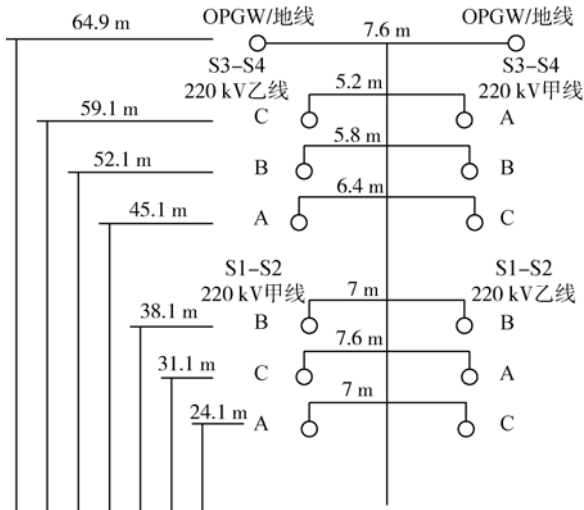


图 3 同塔四回线路塔型布置图

Fig. 3 Block diagram of four circuits on the same tower

开关能力均能满足开合要求，因此以下主要针对静电感应电压和电磁感应电流进行详细计算和分析。各种工况下电磁感应电流计算结果如表 2 ~ 表 6 所

示，静电感应电压计算结果如表 7 所示。

表 2 工况 1 电磁感应电流计算结果

Tab. 2 The calculation of electromagnetic induced current in operation condition 1

S3 至 S4 双回潮流/MVA	S1 至 S2 乙线潮流/MVA	S1 至 S2 甲线最大电磁感应电流/(有效值, A)
900	650	125
900	520	121
900	200	113
700	650	116
700	520	97
700	200	88
400	650	96
400	520	84
400	200	54

表 3 工况 2 电磁感应电流计算结果

Tab. 3 The calculation of electromagnetic induced current in operation condition 2

S3 至 S4 甲线潮流/MVA	S1 至 S2 乙线潮流/MVA	S1 至 S2 甲线最大电磁感应电流/(有效值, A)
900	650	108
900	520	101
900	200	80
700	650	107
700	520	92
700	200	79
400	650	100
400	520	89
400	200	41

表4 工况3电磁感应电流计算结果

Tab. 4 The calculation of electromagnetic induced current in operation condition 3

S3至S4双回潮流/MVA	S1至S2甲线最大电磁感应电流/(有效值, A)
900	98
700	86
400	50

表5 工况4电磁感应电流计算结果

Tab. 5 The calculation of electromagnetic induced current in operation condition 4

S3至S4乙线潮流/MVA	S1至S2乙线潮流/MVA	S1至S2甲线最大电磁感应电流/(有效值, A)
900	650	288
	520	284
	200	278
700	650	181
	520	177
	200	168
400	650	142
	520	137
	200	127

表6 工况5~工况7电磁感应电流影响分析计算

Tab. 6 The calculation of electromagnetic induced current in operation condition 5 to condition 7

工况	S3至S4乙线潮流/MVA	S1至S2甲线最大电磁感应电流/(有效值, A)
工况5	900	276
	700	215
	400	130
工况	S1至S2乙线潮流/MVA	S1至S2甲线最大电磁感应电流/(有效值, A)
工况6	650	77
	520	65
	200	36
工况	S3至S4甲线潮流/MVA	S1至S2甲线最大电磁感应电流/(有效值, A)
工况7	900	70
	700	52
	400	32

如考虑在本工程案例的S1至S2双回线路中间采取逆换相,则上述各种最严重工况下S1至S2甲线的电磁感应电流计算结果如表8所示。

表7 各种工况下静电感应电压计算结果

Tab. 7 The calculation of electrostatic induced voltage in various operation conditions

工况	停运回路数/回	甲线最大静电感应电压/(有效值, kV)
工况1	1	21
工况2	2(同侧停运)	11
工况3	2(水平停运)	20
工况4	2(对角停运)	27
工况5	3(同侧带电)	25
工况6	3(水平带电)	7.5
工况7	3(对角带电)	4.8

注:停运回路均未接地。

表8 考虑换相后各种工况下电磁感应电流计算结果

Tab. 8 The calculation of electromagnetic induced current in all the operation conditions after phase commutation

工况	S3至S4潮流/MVA	S1至S2乙线潮流/MVA	S1至S2甲线最大电磁感应电流/(有效值, A)
工况1	900(双回)	650	82
工况2	900(甲回)	650	93
工况3	900(双回)	—	67
工况4	900(乙回)	650	87
工况5	900(乙线)	—	85
工况6	—	650	55
工况7	900(甲线)	—	51

由上述计算结果可知:

1)被检测回路的电磁感应电流受同塔的其它运行回路的输送潮流影响较大,且随着输送潮流的增大而增大。

2)不同的运行方式及检测工况主要是通过改变运行回路与被检测回路的空距离,从而改变各回路之间的电磁耦合,进一步影响被检测回路的电磁感应电流大小。

3)由于本工程案例的线路较短,在不存在相序转换情况,在各种运行工况中,工况4中被检测回路的上方回路和水平回路运行,对角线方向回路故障,由于受上层双回线路 $N-1$ 故障,另一回健全线路在故障后潮流较重,被检测线路的电磁感应电流较重。

4)若考虑换相影响,各种工况下的静电感应电流会发生不同程度的变化,在本工程案例中为下降

趋势, 工况 2 中被检测线路的电磁感应电流较重, 因此, 需结合工程实际情况, 对各种停运方式下的电磁感应电流进行全面计算后, 才能确定最严重的工况。

5) 类似地, 对于静电感应电压, 不同的运行方式及检测工况主要是通过改变运行回路与被检测回路的空间距离, 影响各回路之间的静电耦合和被检测回路的静电感应电压, 需结合工程实际情况, 对各种停运方式下的静电感应电流进行全面计算后, 才能确定最严重的工况。

3 检修和投运策略分析

在新建输变电工程中涉及同塔四回线路的情况, 需在设计阶段按照较为严苛的工况进行感应电压、感应电流计算校核, 以确定本工程的接地开关选型和对侧或同塔架设的另外两回线路的接地开关是否需要更换^[14]。若对侧或同塔架设的线路的接地开关不满足感应电压、感应电流要求且未得到更换的情况下, 需要采用调整同塔架设线路的运行方式进行检修和投运操作。结合第 2 节中的案例, 以 S1 至 S2 甲线的检修和投运操作为例, 对各种情形进行分析。

3.1 变电站 S1 侧接地开关满足要求, 仅对侧变电站 S2 侧不满足要求

变电站 S1 侧接地开关为超 B 类(切合静电感应电压能力为 40 kV, 电磁感性电流能力为 300 A), 变电站 S2 侧接地开关为 B 类(切合静电感应电压能力为 12 kV, 电磁感性电流能力为 80 A)。若需对 S1 至 S2 甲线进行检修, 在变电站 S2 侧不满足开合静电感应电压情况下, 需优先对变电站 S1 侧的节点开关进行接地操作; 若需对 S1 至 S2 甲线进行投运, 在变电站 S2 侧不满足开合电磁感应电流情况下, 可优先对变电站 S1 侧的节点开关进行打开操作, 则无需限制其它回路的输送潮流。

3.2 变电站 S3 和 S4 侧的接地开关均满足要求, 变电站 S1 和 S2 侧的接地开关不满足要求

设变电站 S3 和 S4 侧接地开关为超 B 类, 变电站 S1 和 S2 侧接地开关为 B 类。若需对 S1 至 S2 甲线进行检修, 在变电站 S1 和 S2 侧均不满足开合静电感应电压情况下, 需先对 S3 至 S4 乙线进行停运, 实现工况 2 的运行方式后, 将静电感应电压降低至 B 类接地开关的开合能力范围内再对 S1 或 S2

侧进行接地操作; 若对 S1 至 S2 甲线进行投运, 建议先对 S3 至 S4 乙线进行停运, 实现工况 2 的运行方式, 需要时再配合限制 S1 至 S2 乙线的输送潮流, 将电磁感应电流降低至 B 类接地开关的开合能力范围内再对 S1 或 S2 侧进行打开操作。

3.3 变电站 S1 至 S4 侧的接地开关均不满足要求

同塔四回线路两侧的接地开关都为 B 类, 均不满足直接开合静电感应电压和电磁感应电流的要求。在未更换设备的条件下, 线路检修过程中仅能通过调整运行方式以实现线路的检修和投运操作。若对 S1 至 S2 甲线进行检修, 需先将 S3 至 S4 乙线停运, 实现工况 2 的运行方式后, 将 S1 至 S2 甲线的静电感应电压降低至接地开关可开合的能力范围内操作, 若仍不能满足要求, 则需将 S3 至 S4 双回线路同时停运, 实现工况 6 的运行方式后确保降低至开合静电感应电压的设备能力范围内再进行接地操作; 若对 S1 至 S2 甲线进行投运, 需将 S3 至 S4 双回线路同时停运, 实现工况 6 的运行方式确保降低至开合电磁感应电流设备能力范围内再进行打开操作。

4 结论

本文分析了同塔四回路中其它回路的运行方式对被检修线路的感应电压、感应电流的影响, 以广东某地区的新建 220 kV 同塔四回架设线路作为案例, 通过对同塔架设线路之间不同的停运工况的计算, 得出感应电压和感应电流最大的运行方式作为接地开关选型依据。由于被检测回路的静电感应电压和电磁感应电流大小与线路实际相序布置关系密切, 需结合工程实际情况, 对各种停运方式下的感应电压电流进行全面计算后, 才能确定最严重的工况。最后基于上述分析, 本文提出了在对侧或同塔架设的线路的接地开关不满足感应电压、感应电流操作要求情况下, 通过调整运行方式进行线路检修和投运的控制策略。

参考文献:

- [1] 尤爱秀. 输电线路感应电压分析与计算 [J]. 山西电力技术, 2000, 95(6): 14-16.
YOU A X. Analysis and calculation of electromagnetic influence voltage on transmission line [J]. Shanxi Electric Power, 2000, 95(6): 14-16.
- [2] 韩彦华, 黄晓民, 杜秦生. 同杆双回线路感应电压和感应电

- 流测量与计算 [J]. 高电压技术, 2007(1): 140-142 +159.
- HAN Y H, HUANG X M, DU Q S. Induced voltage and current on double circuits with same tower [J]. High Voltage Engineering, 2007(1): 140-142 +159.
- [3] 周航. 500 kV 同杆并架双回线路感应电压和感应电流的计算及接地开关的选择 [J]. 红水河, 2010, 29(6): 102-104.
- ZHOU H. Inductive current and voltage calculation and grounding switch selection for 500 kV common-tower double transmission line [J]. Hong Shui River, 2010, 29(6): 102-104.
- [4] 胡丹晖, 涂彩琪, 蒋伟, 等. 500 kV 同杆并架线路感应电压和电流的计算分析 [J]. 高电压技术, 2008(9): 1927-1931.
- HU D H, TU C Q, JIANG W, et al. Calculation of inductive voltage and current for 500 kV double circuits transmission lines on single tower [J]. High Voltage Engineering, 2008(9): 1927-1931.
- [5] 李立峰, 鲁珊珊. 220 kV 同塔双回线路感应电流和感应电压的主要影响因素分析 [J]. 国网技术学院学报, 2015, 18(4): 1-5.
- LI L F, LU S S. Analysis on main influence factors of induced current and voltage of 220 kV double circuits on the same tower [J]. Journal of State Grid Technology College, 2015, 18(4): 1-5.
- [6] 程思勇, 曾能先, 季严飞, 等. 基于二端口等值电路的输电线路感应电压与电流的精确计算方法 [J]. 广东电力, 2016, 29(8): 96-100 +110.
- CHENG S Y, ZENG N X, JI Y F, et al. Accurate calculation method for induced voltage and current of power transmission line based on two port equivalent circuit [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 96-100 +110.
- [7] 苏超, 刘振声, 李黎, 等. 220 kV 架空输电线路下工频电场的电磁感应仿真分析 [J]. 广东电力, 2018, 31(1): 106-112.
- SU C, LIU Z S, LI L, et al. Simulation analysis on electromagnetic induction of power frequency electric field under 220 kV overhead transmission lines [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1): 106-112.
- [8] 麻敏华, 汪晶毅. 500 kV/220 kV 混压同塔四回路感应电压、感应电流的研究 [J]. 广东电力, 2012, 25(4): 30-35 +52.
- MA M H, WANG J Y. The research of induced voltage and current of 500 kV/220 kV four-circuits on the same tower [J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(4): 30-35 +52.
- [9] 蔡广林, 曹华珍, 王晓彤. 500 kV 同塔四回线路感应电压与感应电流分析 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(增刊1): 141-144.
- CAI G L, CAO H Z, WANG X T. The analysis of induced voltage and induced current for 500 kV parallel-four-circuit transmission lines [J]. Southern Power System Technonlogy, 2009, 3(Supp. 1): 141-144.
- [10] 罗日成, 李志前, 李稳, 等. 同塔四回混压输电线路感应电压与电流分析 [J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1): 52-59.
- LUO R C, LI Z Q, LI W, et al. Induced voltage and current analysis for four-circuit transmission line with dsifferent voltage classes on the same tower [J]. Journal of Electric Power Science and Technonlogy, 2015, 30(1): 52-59.
- [11] 邱国斌, 汪晶毅, 梁盼望, 等. 同走廊内多回交流线路对在建线路的感应电压电流影响研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(4): 76-81.
- QIU G B, WANG J Y, LIANG P W, et al. Influence research on induced voltage and current of multi AC transmission lines to the power line under construction in the same corridor [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(4): 76-81.
- [12] 单蒙, 刘为雄. 基于 EMTP 的高压输电工程电磁暂态研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 57-60.
- SHAN M, LIU W X. Research on electromagnetic transient of HV power transmission project based on EMTP [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 57-60.
- [13] 熊鑫欣, 李春亮, 江子豪, 等. 同塔多回线路感应电压的电路模型与有限元模型的计算及分析 [J]. 广东电力, 2017, 30(4): 115-119.
- XIONG X X, LI C L, JIANG Z H, et al. Calculation and analysis on circuit model and finite element model of induced voltage of multi-circuit transmission lines on the same tower [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 115-119.
- [14] 周春阳, 胡忠山, 焦华. 断路器检修状态下感应电流对继电保护的影响 [J]. 广东电力, 2016, 29(8): 67-70 +78.
- ZHOU C Y, HU Z S, JIAO H. Influence of induced current of breaker on relay protection in the state of maintenance [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 67-70 +78.

作者简介:



YUAN K L

袁康龙(通信作者)

1988-, 男, 广东阳江人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统规划设计研究 (e-mail) yuankanglong@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)