

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181608

# 基于联合电压判据的高压并联电容器单相接地故障保护方法

马伟东, 孔圣立, 刘超, 宋闯, 刘尧

(国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 针对目前电容器组单相接地故障保护存在的不足, 提出了一种通过比较三相对地电压来进行单相接地故障判别的联合电压判据保护方法。对构造联合电压判据的电压幅值比较法和电压相位比较法进行了理论分析, 给出了保护定值的计算方法。通过分析比较两种方法的优劣, 推荐采用电压幅值比较法来构造联合电压判据, 并通过仿真计算, 验证了联合电压判据的可行性。由于只有在三相电压均满足条件时, 保护才能动作, 故联合电压判据具备较好的防止 PT 断线造成保护误动的能力。

**关键词:** 联合电压; 电压幅值; 电压相位; 比较; 并联电容器; 单相接地

## Single-phase earth fault protection method based on combined voltage criterion in high voltage shunt capacitor

MA Weidong, KONG Shengli, LIU Chao, SONG Chuang, LIU Yao

(State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In allusion to the insufficiency of capacitor bank single-phase fault protection at present, this paper puts forward a combined voltage criterion protection method by comparing three-phase ground voltage to distinguish the single-phase earth fault. Aiming at constructing combined voltage criterion, voltage value comparison method and voltage phase comparison method are analyzed theoretically and a protection setting calculation method is given. Through analyzing and comparing the advantage and disadvantage of the two methods, voltage value comparison method is recommended to construct the combined voltage criterion. Furthermore, the feasibility of combined voltage criterion is verified by simulation. Since the protection will act only if all the three phase voltages are satisfied, the combined voltage criterion has a better function to prevent protection misoperation caused by PT breaking.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52170218000M).

**Key words:** combined voltage; voltage value; voltage phase; comparing; shunt capacitor; single-phase earth fault

## 0 引言

并联电容器是我国电力系统中主要的无功补偿设备<sup>[1]</sup>, 对于保障电力系统无功平衡、提高电能质量具有重要作用。但近年来电容器缺陷和严重事故经常发生, 如: 广东电网 2010 年曾接连发生 35 kV 电容器组群爆事故<sup>[2]</sup>; 浙江宁波电网仅 2007—2010 年就发生电容器组群爆事故 2 起<sup>[3]</sup>; 广西电网不断发生 10 kV、35 kV 电容器组保护跳闸事件<sup>[4]</sup>。电容器故障的接连发生严重威胁电网的安全稳定运行。

为保障并联电容器的运行安全, 众多高校学者和研究人员对并联电容器的安装分组方式、保护方式和定值整定方法进行了研究。但对于电容器继电保护针对的故障类型主要集中于其内部故障, 如文献[3,5-7]提出要建立电容器组的在线监测系统, 能够实时监测并记录电容器的运行环境, 同时还记录故障、投切状态的电压、电流信息, 电容器单元的容量及温度, 以实现电容器故障预警和分析; 文献[8-11]对目前并联电容器组配置的保护方式进行了研究, 并针对保护的整定值和初始值计算进行了改良和优化; 文献[12-14]重点研究了电容器组不平衡保护的影响因素和定值计算方法。在这些文献当

中均未涉及电容器组外部故障, 尤其是单相故障的保护方法。

另外, 在并联电容器组的相关标准当中对电容器接地故障保护的规定并不完善。《GB 50227-2008 并联电容器装置设计规范》中对接地保护的描述为“当电容器组的电容器外壳直接接地时, 宜装设电容器接地保护”; 《DL/T 5014-2010 330 kV~750 kV 变电站无功补偿装置设计技术规定》中明确规定了并联电容器保护应对电容器组单相接地故障应做出有选择性的切除或发出信号; 而《Q/GDW 10767-2015 10 kV~110(66) kV 元件保护及辅助装置标准化设计规范》中没有给出任何可反映单相接地故障的保护。在变电站实际的保护配置中, 主变低压侧和电容器保护均配置有零序电压保护。它们使用的电压值由低压母线 PT 的相同绕组提供, 故在实际运行中一般投入主变低压侧的零序电压保护, 而电容器零序电压保护一般不投入。但是主变低压侧零序电压保护定值相对较高, 电容器组部分位置发生接地故障时, 产生的零序电压达不到保护动作定值。

虽然为提高供电可靠性, 运行规程规定小电流接地系统允许带单相接地故障运行 1~2 h, 但长期带故障运行会造成非故障相绝缘损坏, 扩大故障范围<sup>[15]</sup>。更为严重的是当并联电容器组投切时, 会有操作过电压和涌流<sup>[16-17]</sup>, 如果带单相接地故障投切可能使电容电压分布不均衡, 造成电容绝缘击穿, 引起故障扩大, 严重时可能导致爆炸。因此, 研究并联电容器组单相接地故障保护方法十分必要。本文提出了一种新的电容器组单相接地故障保护方法, 利用电压的幅值和相位设计了两种保护判据构造方法, 并分析两种判据的优劣, 得出优选方法。

## 1 电容器组单相接地故障特点

根据《DL/T 5014-2010 330 kV~750 kV 变电站无功补偿装置设计技术规定》规定, 330~750 kV 变电站中的并联电容器采用中性点不接地的星形接线方式。本文研究内容即针对此类电容器组。

电力系统接地故障的选相与判别历来是继电保护研究的重点<sup>[18]</sup>, 而小电流接地系统的单相接地故障由于故障电流小, 并且受到消弧线圈的影响, 一直是一个难点, 到目前为止也没有得到根本性的解决<sup>[19-21]</sup>。但是无功补偿用的并联电容器组与一般的小电流接地系统又有不同, 它有其本身的特点:

(1) 其三相电容电感值差异很小, 三相参数较为平衡; (2) 不存在消弧线圈的影响; (3) 当发生单相接地故障时, 其故障相电压下降水平与故障位置有关, 且呈阶梯形特点; (4) 其接于主变压器低压侧, 而主

变低压侧一般不带负荷或负荷很小, 故其电压电流受负荷影响较小。

中性点不接地的并联电容器组发生单相接地故障时, 会造成故障相端电压降低, 非故障相端电压升高, 利用此特点可构造单相接地故障的保护判据。

## 2 联合电压判据构造

联合电压判据是指对三相对地电压同时进行比较, 当三相电压均满足保护所设置的定值时, 保护才出口。

目前电网中高压并联电容器的结构分为单星形接线方式和双星形接线方式, 如图 1、图 2 所示。

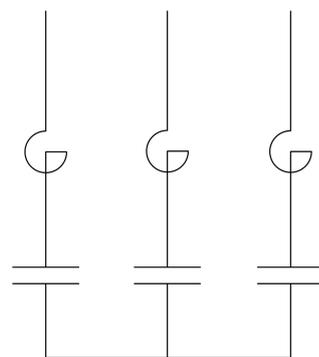


图 1 单星形电容器组结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of single-star capacitor bank

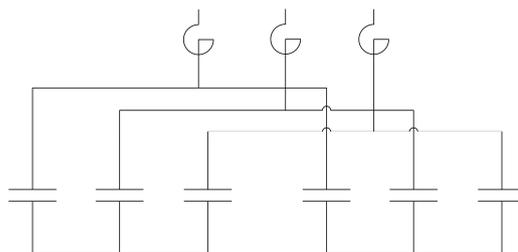


图 2 双星形电容器组结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of dual-star capacitor bank

### 2.1 电压幅值比较法

本文用最常用的单星形接线电容器组来进行分析计算。如图 3 所示, 其串联段数为 4。以 A 相为故障相设置 4 个故障点, 很明显④处故障时, 故障相端电压降低幅值最小, 非故障相电压增大幅值最小, 即故障特征最不明显。①处故障相端电压降低幅值最大, 非故障相电压增大幅值最大。为使保护能够覆盖整个电容器组, 在④处故障时考虑保护的整定值, 以电压幅值比较的方式来进行整定。

在实际工程中一般取母线电压作为电容器组电压。设故障点至中性点的电压为  $\Delta U$ , 三相对地电压如式(1)所示。

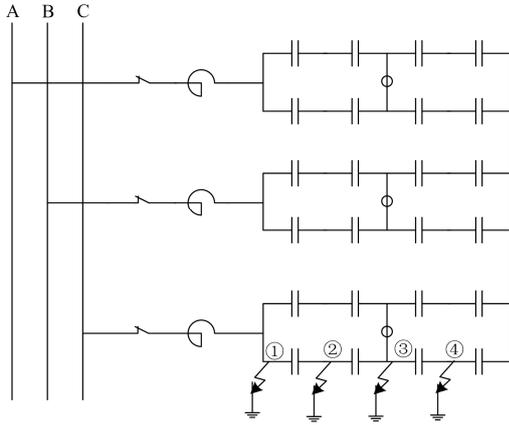


图 3 电容器组故障点示意图

Fig. 3 Fault points of capacitor bank

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{U}_{A0} - \Delta\dot{U} \\ \dot{U}_B = \dot{U}_{B0} + \Delta\dot{U} \\ \dot{U}_C = \dot{U}_{C0} + \Delta\dot{U} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 为电容器组端电压，即对地电压； $\dot{U}_{A0}$ 、 $\dot{U}_{B0}$ 、 $\dot{U}_{C0}$ 为电容器组相电压，即中性点电压。则可设置 A 相接地故障判据为

$$\begin{cases} U_A < U_{setA} \\ U_B > U_{setB} \\ U_C > U_{setC} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $U_{setA}$ 、 $U_{setB}$ 、 $U_{setC}$ 可按照式(3)进行整定。

$$\begin{cases} U_{setA} = |\dot{U}_{A0} - \Delta\dot{U}| \cdot k_1 \\ U_{setB} = |\dot{U}_{B0} + \Delta\dot{U}| \cdot k_2 \\ U_{setC} = |\dot{U}_{C0} + \Delta\dot{U}| \cdot k_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中， $k_1$ 、 $k_2$ 为可靠系数， $k_1 > 1$ ， $k_2 < 1$ 。

无功补偿用电容器组一般为集中布置，线路较短，可忽略其电阻。则

$$\Delta\dot{U} = \dot{U}_{A0} \cdot \frac{\frac{1}{4} \cdot X_C}{X_C - X_L} \quad (4)$$

一般  $X_C \gg X_L$ ，设

$$X_C - X_L = d \cdot X_C \quad d = 1 - \rho$$

$\rho$ 为电抗率，则

$$\Delta\dot{U} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{d} \cdot \dot{U}_{A0} > \frac{1}{4} \cdot \dot{U}_{A0} \quad (5)$$

式中： $X_C$ 为电容器组 A 相的容抗； $X_L$ 为串联电抗器的感抗。根据《GB 50227-2008 并联电容器装置设计规范》规定电抗率的选择有：0.1%~1%、4.5%~5%、12%、4.5%~5%与 12%混装。可根据实

际工程中电容器组的电抗率的选择计算  $\Delta\dot{U}$ 。

同理，可构造 B、C 相接地故障判据，当 A、B、C 任意一相满足条件时，保护发出告警信号或跳闸。

## 2.2 电压相位比较法

电容器组发生单相接地故障时，电容器组三相端电压矢量示意图如图 4 所示。

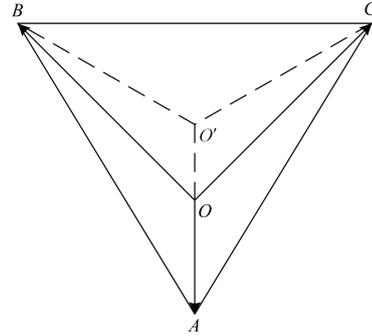


图 4 三相电压相位图

Fig. 4 Three phase voltage vector diagram

图 4 中， $\overrightarrow{O'A}$ 、 $\overrightarrow{O'B}$ 、 $\overrightarrow{O'C}$ 为故障前三相对地电压， $\overrightarrow{OA}$ 、 $\overrightarrow{OB}$ 、 $\overrightarrow{OC}$ 为 A 相发生接地故障时，三相对地电压。由图 4 可知，当电容器组发生单相接地故障时，其三相电压除了幅值会发生变化外，非故障相的电压相位也会发生变化，根据此特点也可构造电容器组 A 相接地故障判据。

$$\begin{cases} 150^\circ > \arg \frac{\dot{U}_A}{\dot{U}_B} > 120^\circ \\ 150^\circ > \arg \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}_A} > 120^\circ \end{cases} \quad (6)$$

当式(6)全部满足时即可判定，A 相发生了单相接地故障。同理可构造 B、C 相的接地故障判据。

## 3 仿真计算验证

以河南省某 500 kV 变电站的并联电容器组为例，用 Matlab 搭建仿真模型。电容器组参数如表 1 所示，主接线图如图 5 所示。

表 1 电容器组参数

Table 1 Parameters of capacitor bank

参数	数值	参数	数值
额定电压	35 kV	单只电容器额定电容量	11.5 $\mu$ F
额定电流	911 A	电容器数量	180 只
额定频率	50 Hz	额定电抗	1.473 $\Omega$
额定容量	60 120 kvar	母线 PT 变比	35 kV/100 V
额定电抗率	5%	-	-

### 3.1 电压幅值比较仿真计算

按照图 3 所示方法，分别在 A 相设置 4 个故障

点。通过仿真计算可得 4 个点分别发生故障时, 三相母线电压幅值如表 2 所示, 表中所示电压均已计算为二次值。

表 2 三相母线电压幅值

Table 2 Three-phase bus voltage amplitude

故障点	A 相电压/V	B 相电压/V	C 相电压/V
①	1.2	100.8	100.8
②	13.5	88.3	88.3
③	28.2	76.6	76.6
④	42.9	66.2	66.2

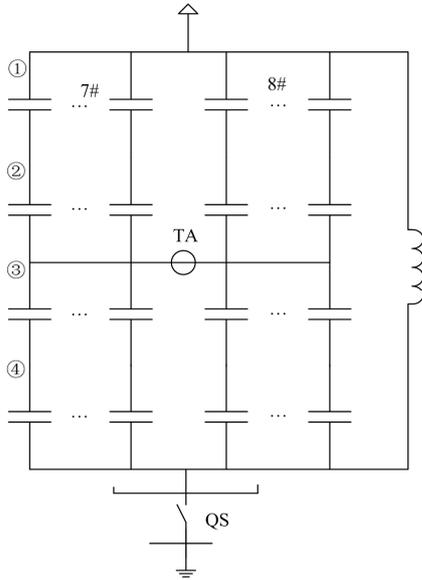


图 5 主接线图

Fig. 5 Main drawing

联合电压定值为

$$\begin{cases} U_{\text{setA}} = |\dot{U}_{\text{Ao}} - \Delta\dot{U}| \cdot k_1 = 42.9 \cdot k_1 \\ U_{\text{setB}} = |\dot{U}_{\text{Bo}} + \Delta\dot{U}| \cdot k_2 = 66.2 \cdot k_2 \\ U_{\text{setC}} = |\dot{U}_{\text{Co}} + \Delta\dot{U}| \cdot k_2 = 66.2 \cdot k_2 \end{cases}$$

设  $k_1 = 1.1$ ,  $k_2 = 0.9$ , 则

$$\begin{cases} U_{\text{setA}} = 47.2 \\ U_{\text{setB}} = 59.6 \\ U_{\text{setC}} = 59.6 \end{cases} \quad (7)$$

用表 2 中电压值与式(7)进行比较, 可知 4 个故障点故障造成的母线电压变化均能达到保护动作定值。但上述联合电压定值是按照 35 kV 母线电压在额定电压运行时所得的结果, 而在实际运行中, 母线电压会有一些的上下浮动。按照母线电压上下浮动极限为 10%再次进行仿真计算, 同样设置 4 个故障点, 可得: 电压上浮 10%, 4 个点分别发生故障时, 三相电压幅值如表 3 所示; 电压下降 10%时,

4 个点分别发生故障时, 三相电压幅值如表 4 所示。

表 3 三相电压幅值(上浮 10%)

Table 3 Three-phase bus voltage amplitude (increased by 10%)

故障点	A 相电压/V	B 相电压/V	C 相电压/V
①	1.3	110.7	110.7
②	14.9	97.0	97.0
③	31.0	84.2	84.2
④	47.1	72.7	72.7

表 4 三相电压幅值(下降 10%)

Table 4 Three-phase bus voltage amplitude (decreased by 10%)

故障点	A 相电压/V	B 相电压/V	C 相电压/V
①	1.1	90.6	90.6
②	12.2	79.4	79.4
③	25.4	68.9	68.9
④	38.6	59.6	59.6

由表 3、表 4 可知, 当运行母线电压上下浮动 10%以内时, 式(7)所设定值依然可以保证 4 个点发生单相接地故障时保护可靠动作。并且由于采用了三相的联合电压判据, 可保证运行母线电压上下浮动时, 保护不会误动。另外, 由于联合电压判据需要三相电压均满足条件时才能出口, 当 PT 断线时, 不会造成保护误动, 具有天然的防止 PT 断线造成保护误动的能力。

### 3.2 电压相位比较仿真计算

同样分别设置 4 个故障点, 在额定电压条件下, 电压相位比较法的仿真验证结果如表 5 所示。

表 5 三相母线电压相位

Table 5 Three-phase bus voltage phase

故障点	$\arg \frac{\dot{U}_A}{\dot{U}_B} / (^\circ)$	$\arg \frac{\dot{U}_A}{\dot{U}_C} / (^\circ)$
①	1.7	29.7
②	1.5	145.44
③	1.3	138.78
④	1.1	130.86

将表 5 中的数据代入式(6)进行比较, 可知在②③④处发生单相接地故障时, 能够达到保护动作定值, 而①处发生故障时, 达不到保护动作定值。

母线电压上下浮动时的仿真计算不再累述。

### 3.3 两种方法的比较

通过上述计算分析可知, 电压幅值比较法能够在 4 个设置的故障点分别发生单相接地故障时满足保护动作判据, 达到动作定值, 而电压相位比较法在故障点①处发生故障时, 达不到保护动作定值, 其保护范围较电压幅值比较法要小。

两种方法的保护灵敏度如表 6 所示, 其灵敏度

计算采用联合判据中灵敏度最小的那个作为整个判据的灵敏度，其比较均在额定电压条件下进行。

表 6 灵敏度比较

Table 6 Sensitivity comparison

故障点	电压幅值比较法	电压相位比较法
①	1.69	-
②	1.48	1.02
③	1.29	1.07
④	1.11	1.09

通过上述比较可知，电压相位比较法与电压幅值比较法相比，不仅保护范围小，而且其判据的灵敏度较小。而且由式(6)可知，其相位比较均需要用到 A 相电压，当 A 相发生 PT 断线时，可能会造成保护误动，所以电压相位比较法不具备防止 PT 断线的能力。故推荐采用电压幅值比较法来构造联合电压判据。

### 4 结论

本文根据并联电容器组三相参数对称以及其所处运行环境的特点，提出了一种通过同时比较三相相对地电压的联合电压判据保护方法来保护电容器组的单相接地故障。对构造联合电压判据的对幅值比较法和相位比较法进行了仿真计算，对仿真结果进行比较可知，幅值比较法保护范围更广，灵敏度更高，且具备较好的防止 PT 断线造成保护误动的能力。推荐采用幅值比较法来构造联合电压判据。

另外在实际的工程应用中，联合电压判据的构建无需增加任何硬件设备，只需在原有的微机保护中增加一个功能模块即可实现，有很高的推广应用价值。

但本文未考虑过渡电阻对于判据的影响，而且当电容器串联段数增加，其靠近末端处发生单相接地故障时，保护判据的灵敏度将进一步降低，这将是下一步的研究方向。

### 参考文献

[1] 马亮, 钱珞江. 谐波对集合式并联电容器内部故障保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 87-90. MA Liang, QIAN Luojiang. Impact of harmonics on the internal fault protections of assembling capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 87-90.

[2] 陈庆祺, 刘锦兰. 35 kV 并联电容器组群爆故障分析及其零序差流保护的参数整定[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 67-74. CHEN Qingqi, LIU Jinlan. Analysis on colony fusing failure of 35 kV parallel capacitors and parameters set on

its zero sequence difference current protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 67-74.

[3] 孙珑, 翁晖. 基于差动电压的并联电容器在线监测系统的设计[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 16-20. SUN Long, WENG Hui. Design of online monitoring system for shunt capacitors based on differential voltage[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(2): 16-20.

[4] 李涛, 王刚, 周谢. 并联电容器组仿真模型建立与案例分析[J]. 广西电力, 2017, 40(4): 6-9. LI Tao, WANG Gang, ZHOU Xie. Establishment of simulation model of shunt capacitor bank and case analysis[J]. Guangxi Electric Power, 2017, 40(4): 6-9.

[5] 甘景福, 王增平, 林一峰. 并联电容器保护与监测一体化实施方案[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(5): 11-15. GAN Jingfu, WANG Zengping, LIN Yifeng. Research on the implementation scheme of shunt capacitor protection and monitoring[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(5): 11-15.

[6] 马学民, 樊晓军, 胡飞, 等. 新型高压并联电容器在线监测系统的研制[C] // 陕西省电网节能与电能质量技术学会, 2017年12月, 中国, 西安: 161-164. MA Xuemin, FAN Xiaojun, HU Fei, et al. Design of a new type of high voltage shunt capacitor on line monitoring system[C] // Memoir of Electric Power Quality and Saving, December 2017, Xi'an, China: 161-164.

[7] 张建军, 袁继军, 孙红华, 等. 35 kV 及以上并联电容器装置保护方式研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(5): 16-20. ZHANG Jianjun, YUAN Jijun, SUN Honghua, et al. Research on protection mode of shunt capacitors at 35 kV and above[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(5): 16-20.

[8] 王永红, 孟荣, 王玥, 等. 500 kV 变电站并联电容器组保护整定的若干问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 144-147. WANG Yonghong, MENG Rong, WANG Yue, et al. Problems on settings of shunt capacitor bank protection in 500 kV substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 144-147.

[9] 洗冀. 并联电容器保护配置的研究及其可靠性分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2015. XIAN Ji. Study on the protection configuration and reliability analysis of shunt capacitor[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.

[10] 柏瑜. 高压并联电容器组的整定计算及故障分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.

- BAI Yu. Study on the setting calculation and fault analysis of high voltage shunt capacitor banks[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [11] 李振, 庞素红. 高压并联电容器装置的保护整定[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(1): 7-10.
- LI Zhen, PANG Suhong. Protection setting on high voltage shunt capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1): 7-10.
- [12] 盛国钊, 林浩, 严飞, 等. 不对称接线内熔丝高压并联电容器组的不平衡保护计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(6): 60-65.
- SHENG Guozhao, LIN Hao, YAN Fei, et al. Imbalance protection calculation on high voltage shunt capacitor bank with internal fuse and asymmetric wiring[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(6): 60-65.
- [13] 李凯枫. 并联电容器组电容量变化对不平衡电流保护的影响分析[J]. 广西电力, 2017, 40(1): 56-66.
- LI Kaifeng. Influence analysis of capacitance change of shunt capacitor bank on unbalance current protection[J]. Guangxi Electric Power, 2017, 40(1): 55-56.
- [14] 张彦, 胡锦泓. 双星形电容器组中性点不平衡电流计算及配平方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(5): 12-17.
- ZHANG Yan, HU Jinhong. Study on calculation and balancing of neutral point imbalance current in double star capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5): 12-17.
- [15] 赖平, 周想凌, 邱丹. 小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 51-57.
- LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan. Research on transient-current frequency analysis and faulty line detecting method in indirectly grounding power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 51-57.
- [16] 司马文霞, 姜雄伟, 彭庆军, 等. 35 kV 并联补偿电容器组继电保护动作时过电压的分析及防护[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 1-8.
- SIMA Wenxia, JIANG Xiongwei, PENG Qingjun, et al. Analysis and protection of overvoltage of 35 kV shunt compensation capacitor bank when relay protection take action[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 1-8.
- [17] 吴玮琼, 黄宝莹, 燕立, 等. 1000 kV 变电站主变 110 kV 侧并联电容器装置的参数选择[J]. 电网技术, 2009, 33(10): 42-47.
- WU Yiqiong, HUANG Baoying, YAN Li, et al. Parameters selection of shunt capacitor device at 110 kV side of main transformer in 1000 kV substation[J]. Power System Technology, 2009, 33(10): 42-47.
- [18] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [19] 刘柱揆, 曹敏, 董涛. 基于波形相似度的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 89-95.
- LIU Zhukui, CAO Min, DONG Tao. Fault line selection of neutral indirectly grounding system based on waveform similarity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 89-95.
- [20] 徐铭铭, 高淑萍, 常仲学, 等. 基于模型识别的消弧线圈接地系统单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 73-78.
- XU Mingming, GAO Shuping, CHANG Zhongxue, et al. Model recognition based single-phase earthed faulty line selection method of Petersen coil grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 73-78.
- [21] 张乃刚, 张加胜, 郑长明, 等. 基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 120-125.
- ZHANG Naigang, ZHANG Jiasheng, ZHENG Changming, et al. Fault section location based on similarity of zero sequence current amplitude distribution in non-solidly-earthed network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 120-125.

收稿日期: 2018-12-27; 修回日期: 2019-04-03

作者简介:

马伟东(1987—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、智能变电站技术。E-mail: mwdong2000@163.com

(编辑 葛艳娜)