

船舶环形配电网无通道保护方法研究

张芳¹, 毕大强², 曾祥君¹, 曾宪敏¹, 倪凤燕³

(1. 智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 长沙理工大学, 湖南 长沙 410076; 2. 电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084; 3. 中国船舶重工集团公司第七〇四研究所, 上海 200031)

摘要: 环形配电网结构具有较高船舶生命力和供电可靠性, 在大型船舶电力系统中逐渐得到应用。然而在环网中, 传统的保护方法很难在短时间内切除电站附近的故障。针对船舶环形电网的特点, 提出了两种无通道保护方法。两种方法都利用了短路故障和线路一侧保护跳闸引起另一侧支路的电流变化, 方法一和方法二分别通过加速保护的動作时限特性和电流比值判据来判断故障区间, 最终实现相继速动。通过 Matlab/Simulink 仿真验证了两种方法的可靠性和速动性。

关键词: 环形配电网; 大型船舶; 无通道保护方法; 加速过流保护; 继电保护

Research on methods of non-communication protection for shipboard loop power distribution systems

ZHANG Fang¹, BI Daqiang², ZENG Xiangjun¹, ZENG Xianmin¹, NI Fengyan³

(1. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

2. State Key Lab of Power System, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. 704th Research Institute, CSIC, Shanghai 200031, China)

Abstract: Owing to the high shipboard's survivability and power supply reliability, the loop power distribution systems has been increasingly used in the large shipboard power systems. However, the conventional protection has a longer tripping time for the relay near to source, so that it can not clear the fault. This paper presents two methods of non-communication protection according to the characteristics of shipboard loop power distribution systems. In the methods, the changing of current through the local relay is adopted when the fault occurs and the remote breaker of the line is tripped. The two methods respectively use the time coordinations and the current ratio criterion of the accelerated overcurrent protections to determine the fault zone, and then accelerated trip of the local break. The simulation results of the Matlab/Simulink verify the reliability and the speed.

Key words: loop power distribution systems; large shipboard power systems; non-communication protection; accelerated overcurrent protection; relay protection

中图分类号: TM773; U66 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0084-06

0 引言

随着综合电力系统(Integrated Power System, IPS)的提出, 供电连续性和可靠性成为衡量船舶电力系统生命力的重要指标之一^[1]。环形配电网中的设备因从线路的两个方向获得电源, 具有较高的供电连续性和可靠性, 从而在高端民用船舶、大中型战斗舰艇中得到了广泛的应用^[2-3]。然而, 船舶电力系统工作环境恶劣, 短路成为电站运行过程中最常见的电气故障之一。对于复杂的环形配电网, 短路电流大且保护装置整定困难, 传统的继电保护方法难以满足环网的需要。

目前, 陆地配电系统广泛采用基于通信的馈线

自动化方式或者基于重合器方式^[4-5], 但这些保护方法切除故障的选择性不高, 难以应用在闭环运行的系统中^[6]。

差动保护虽然能够解决船舶复杂供电网络中输电线路和母线短路保护的选择性问题, 但对通信系统有很高的要求, 且需另外配置后备保护^[7-12]。

近年来, 随着电力系统保护技术的发展, 无通道方向过流保护技术在输电线路保护上得到了广泛的应用。所谓无通道保护, 就是无需通道而能实现全线相继速动或者全线速动的保护^[13-14]。该保护操作简单方便, 对故障判别精确。文献[15]利用了不对称故障时产生的电流序分量和叠加信号作为动作判据, 实现了非对称故障条件下的线路保护, 但负

荷的投切和外界干扰都会产生一定的电流负序和零序分量, 极易造成保护误跳。文献[16]利用发生对称故障前后正序电流变化情况来实现线路保护, 但当靠近电源侧母线故障时, 对应的方向保护并不能加速跳闸, 且对于母线上不挂负荷的输电线路, 加速保护装置也难以判断故障区域。

本文分析了船舶环网的传统保护方法, 并针对船舶环网的特点, 提出了两种无通道保护方法。第一种是通过比较本端故障电流的变化来判别对端断路器的动作状态, 再按照时限特性加速启动本端保护的方法。第二种是利用对端断路器动作前后所造成的本端故障电流的变化比值来识别区内、外故障, 再决定是否加速本端断路器跳闸的方法。仿真表明, 与传统的过流保护方法相比, 无通道保护方法能够缩短切除故障线路的时间, 保证重要负载的供电连续性。

1 传统的环网保护方法

传统的环网保护方法采用基于电流时间原则的方向过电流保护装置^[17-18], 其选择性是依靠系统不同位置的保护装置动作时间级差来实现。

图1为船舶电力系统环网结构图, 包括两台船舶电站、两台主推电机、若干负载、方向过流保护 $R_1 \sim R_{12}$ 和电缆, 详细参数见附录A。为保证重要负荷的供电连续性, 电机均连接于主配电板上, 其中, 电缆长度分别为 $l_{AB}=l_{BC}=l_{CD}=l_{DE}=l_{EF}=l_{FG}=0.05$ km。

根据环网传统保护方法, 规定保护 $R_1 \sim R_6$ 动作方向为顺时针方向, 保护 $R_7 \sim R_{12}$ 为逆时针方向。

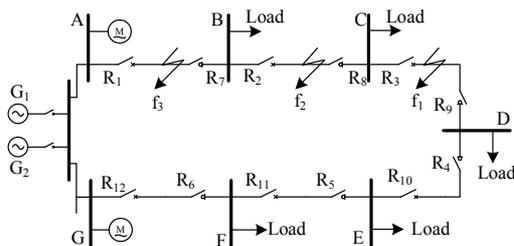


图1 环形网络结构图

Fig. 1 One-line diagram of the loop power system

图2为方向过电流保护的阶梯型时限特性, 设上下级时间差为 0.4 s, 时间延迟最短的保护 R_6 和 R_7 在故障发生后 0.1 s动作。假设当 f_1 点发生短路故障时, 保护装置 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_9 、 R_{10} 、 R_{11} 和 R_{12} 检测到故障信号, 根据阶梯时限特性, 保护 R_9 和 R_3 分别延时至 0.9 s和 1.3 s跳闸, 使电网完全切除故障线路。

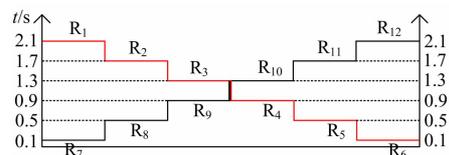


图2 方向过电流保护的阶梯型时限特性

Fig. 2 Time coordination of the over-current protections

该保护方法具有很高的选择性, 能保证非故障线路的供电连续性, 但对电站附近的故障切除时间较长。例如, 当 f_2 和 f_3 点发生故障时, 电网完全切除故障时间分别为 1.7 s和 2.1 s。可见, 故障点离电站越近, 切除故障线路所需时间越长, 从而对电站和电网的影响越大, 所以该方法具有很大的局限性。

2 无通道保护方法一

2.1 基本思想和时限整定

当船舶电力系统环网运行时, 短路电流将通过两条支路向短路点提供短路电流, 但当一侧断路器断开后, 另一侧支路将承担系统的全部电流。电网因为采用电缆输电, 线路阻抗远小于系统阻抗, 所以短路点对端断路器跳闸前后, 短路点的短路电流几乎不变, 从而导致本端支路将承担全部的短路电流, 使流过本端保护的短路电流增大^[1]。例如当 f_2 点发生短路时, 保护 R_8 跳闸前后 f_2 点短路电流几乎不变, 而流过保护 R_1 和 R_2 的短路电流会增大。特别地, 当短路点 f_1 靠近配电板D时, 电站通过两条支路对短路点 f_1 提供电流, 且大小基本相等, 当 R_9 跳闸后, 流过 $R_1 \sim R_3$ 的短路电流将增大一倍; 而当短路点 f_3 靠近配电板A时, 电缆短的那条支路承担了绝大部分的短路电流, 故 R_9 跳闸后, 流过 R_1 的短路电流基本不变。

现将方向保护装置 $R_1 \sim R_{12}$ 分为两组, 且保护动作方向与传统的保护方向相同。第一组包括 R_7 、 R_8 、 R_9 、 R_4 、 R_5 和 R_6 , 为传统的方向保护装置, 其动作时限如图2所示; 第二组包括 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_{10} 、 R_{11} 和 R_{12} , 为方向加速保护装置, 其动作时间略慢于其对端的传统保护。当线路发生短路故障时, 对应的传统保护装置先动作, 此时加速保护装置检测到对端保护动作后再动作。

图3为加速保护的时限特性图, 考虑加速保护本身的计算、判断与动作时间以及裕度, 最快动作的保护 R_3 和 R_{10} 将在对端断路器断开后 0.1 s时动作, 其余保护等对端断路器断开后按图3时限特性动作。

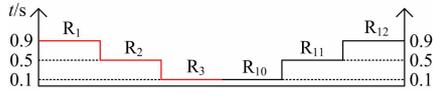


图3 加速过电流保护的阶梯型时限特性

Fig. 3 Time coordination of the accelerated protection schemes

2.2 加速保护的算法设计

故障时，设短路电流将大于一个整定值 I_{set} 。

$$I > I_{set} \quad (1)$$

式中， I_{set} 为距离电站最远处故障时流过断路器的最小短路电流，式(1)表示当电流大于 I_{set} 时，线路发生短路故障。

当传统保护断开后，另一侧支路承担的短路电流将增大为原来的 1~2 倍。故定义判据

$$r = I_k / I_{(k-n)} \quad (2)$$

式中： k 为采样时刻； n 为周期数； I_k 、 $I_{(k-n)}$ 分别表示相隔 n 个周期的电流采样值。正常运行时，式(2)的理论值为 1；当发生故障时，对端断路器断开后，式(2)的理论值的范围应为 1~2，为保证可靠性，式(2)的值需至少保持一段时间 τ ，加速保护再跳闸，此处取 $\tau=0.01$ s。

当加速保护满足式(1)、式(2)的条件时，保护立即按图 3 的时限特性动作，保护流程图如图 4(a)所示。例如，当 f_2 点发生短路故障时，保护 R_8 延时 0.5 s 后跳闸，此时保护 R_1 和 R_2 将检测到电流突变，满足 $1 < r \leq 2$ ，所以 R_1 和 R_2 均满足跳闸条件，但根据图 3 时限特性可知， R_2 延时更短，所以 R_2 在 R_8 跳闸后 0.5 s 时跳闸，从而抑制了 R_1 的动作。因此， f_2 点短路时，完全切除故障时间为 1.0 s。同理， f_1 点短路时，切除故障时间为 1.0 s。

3 无通道保护方法二

3.1 算法改进

根据上述基本原理可知，当短路点对端断路器跳闸后，电站对短路点提供的短路电流几乎不变，电站相当于一个恒流源。以 f_2 点短路为例，设 f_2 点按逆时针方向到电站的电缆长度为 l_1 ，按顺时针方向到电站的电缆长度为 l_2 ，电缆的单位阻抗为 z 。

传统保护动作前，有

$$I_{pre} = \frac{u_{pre}}{l_1 z} \quad (3)$$

$$I_{f-pre} = \frac{u_{pre}}{l_1 z} + \frac{u_{pre}}{l_2 z} \quad (4)$$

传统保护动作后，短路点的短路电流基本保持不变，故有

$$I_{post} = I_{f-post} = I_{f-pre} \quad (5)$$

根据式(3)~ 式(5)，推得

$$\frac{I_{post}}{I_{pre}} = \frac{l_1 + l_2}{l_2} \quad (6)$$

式中： I_{pre} 、 I_{post} 表示故障后，对端传统保护断开前、后分别流过本端加速保护的短路电流； u_{pre} 为对端保护断开前，电站与短路点间的电压； I_{f-pre} 、 I_{f-post} 表示对端保护断开前、后短路点的短路电流。由式(6)可知，对端断路器动作前后所造成的本端故障电流的变化比值与短路点距电站的电缆长度有关，此时式(6)的值即为判据 r 。根据各保护安装的位置，加速保护的判据 r 值均不同。如当配电板 D 发生故障时， $l_1=l_2=0.15$ km， $r=\frac{l_1+l_2}{l_2}=2$ 。同理，当配电板 A、B、C 发生故障时， r 的值分别为 1、1.2 和 1.5。

如表 1 所示，当加速保护满足表 1 中的 r 时，说明为区内故障，保护在对端断路器断开后 0.1 s 时跳闸；否则，为区外故障，保护不动。横线表示保护处于闭合状态。

表 1 加速保护装置的動作判据

Table 1 Criteria of the accelerated protection schemes

r	1~1.2	1.2~1.5	1.5~2
R_1	跳闸	—	—
R_2	—	跳闸	—
R_3	—	—	跳闸
R_{10}	—	—	跳闸
R_{11}	—	跳闸	—
R_{12}	跳闸	—	—

该方法保护流程如图 4(b)所示。

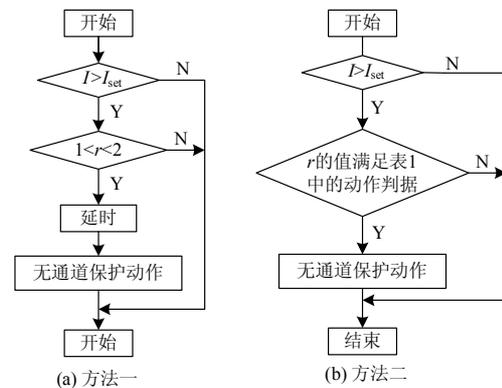


图 4 保护流程图

Fig. 4 Protecting flowchart

3.2 仿真分析

通过对图 1 环网进行仿真，分析比较点 f_1 、 f_2 和 f_3 故障时，保护 R_1 、 R_2 和 R_3 的响应情况。其中，

设短路点 f_1 、 f_2 和 f_3 为 CD、BC 和 AB 的中点。

3.2.1 f_1 发生短路故障

f_1 点在 0 s 时发生短路故障, 保护 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_9 、 R_{10} 、 R_{11} 和 R_{12} 检测到故障信号, 根据传统保护的動作时限特性, R_9 在 0.9 s 时最先跳闸, 图 5~图 7 为 R_9 跳闸前后加速保护 R_1 ~ R_3 的响应特点, 图 8 为短路点 f_1 的电流有效值的波形图。

从图 5~图 7 可知, 短路故障后, 流过各加速保护的电流 I 迅速增大, 满足式(1)。当 R_9 跳闸后, 流

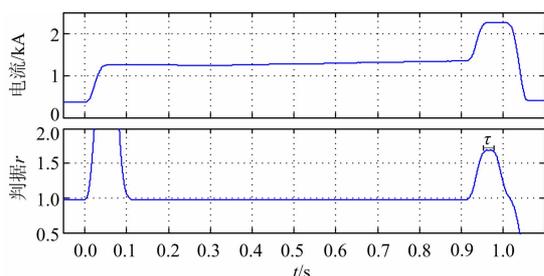


图 5 f_1 点短路时保护 R_1 的响应波形图 (区外故障)

Fig. 5 Responses of R_1 when fault occurs on f_1

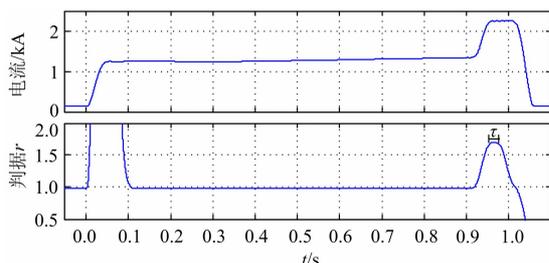


图 6 f_1 点短路时保护 R_2 的响应波形图 (区外故障)

Fig. 6 Responses of R_2 when fault occurs on f_1

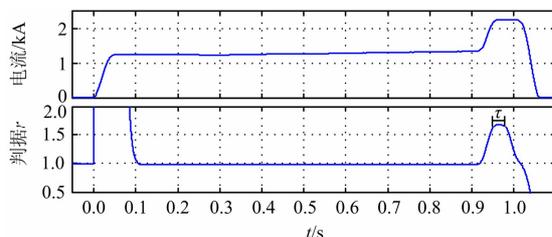


图 7 f_1 点短路时保护 R_3 的响应波形图 (区内故障)

Fig. 7 Responses of R_3 when fault occurs on f_1

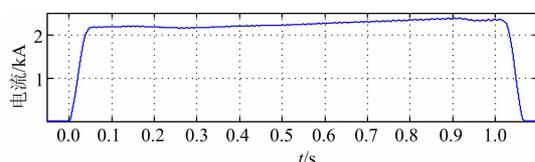


图 8 短路点 f_1 的电流有效值的波形图

Fig. 8 RMS values of fault current at f_1

过 R_1 ~ R_3 的短路电流迅速增大, 且判据 $r=1.7$, 满足表 1 中 R_3 跳闸条件, 故 1 s 时 R_3 跳闸, 电网完全切除故障线路。从图 8 可知, R_9 跳闸后短路点 f_1 的短路电流基本保持不变。

3.2.2 f_2 发生短路故障

f_2 点在 0 s 时发生短路故障, 保护 R_1 、 R_2 、 R_8 、 R_9 、 R_{10} 、 R_{11} 和 R_{12} 检测到故障信号, 但 R_8 在 0.5 s 时最先跳闸, 图 9、图 10 为加速保护 R_1 和 R_2 的响应情况, 图 11 为短路点 f_2 的电流有效值的波形图。

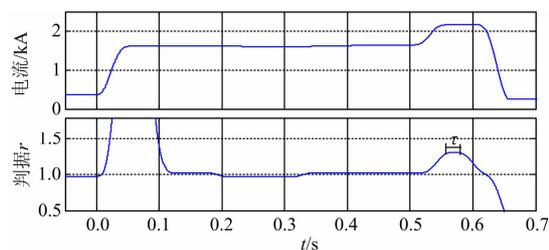


图 9 f_2 点短路时保护 R_1 的响应波形图 (区外故障)

Fig. 9 Responses of R_1 when fault occurs on f_2

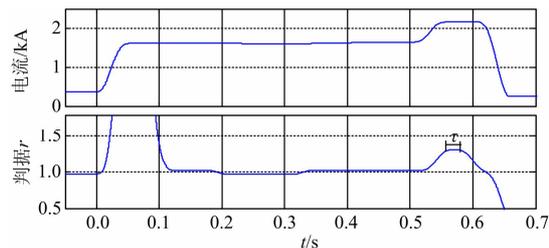


图 10 f_2 点短路时保护 R_2 的响应波形图 (区内故障)

Fig. 10 Responses of R_2 when fault occurs on f_2

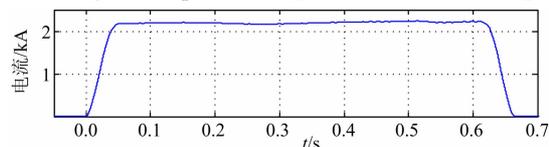


图 11 短路点 f_2 的电流有效值的波形图

Fig. 11 RMS values of fault current at f_2

从图 9、图 10 可知, 故障后, 流过各加速保护的电流 I 迅速增大, 满足式(1)。 R_8 跳闸后, 流过 R_1 和 R_2 的短路电流迅速增大, 且 $r=1.3$, 满足表 1 中 R_2 的跳闸条件, 故 0.6 s 时 R_2 跳闸, 电网完全切除故障线路。如图 11 所示, R_8 跳闸后短路点 f_2 的短路电流基本保持不变。

3.2.3 f_3 发生短路故障

f_3 点在 0 s 时发生短路故障, 保护 R_1 、 R_7 、 R_8 、 R_9 、 R_{10} 、 R_{11} 和 R_{12} 检测到故障信号, 但 R_7 在 0.1 s 时最先跳闸, 图 12 为加速保护 R_1 的响应特点, 图 13 为短路点 f_3 的电流有效值的波形图。

从图 12 可知, 短路故障后, 流过加速保护的电流 I 迅速增大, 满足式(1)。当 R_7 跳闸后, 流过 R_1

的短路电流迅速增大, 且 $r=1.1$, 满足表 1 中 R_1 的跳闸条件, 故 0.2 s 时 R_1 跳闸, 此时电网完全切除故障线路。从图 13 可知, R_7 跳闸后短路点 f_3 的电流基本保持不变。

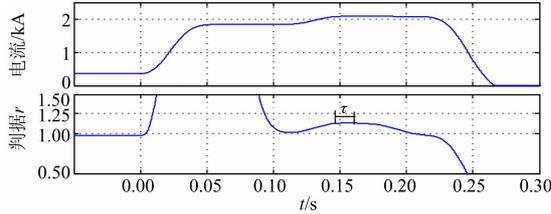


图 12 f_3 点短路时保护 R_1 的响应波形图 (区内故障)

Fig. 12 Responses of R_1 when fault occurs on f_3

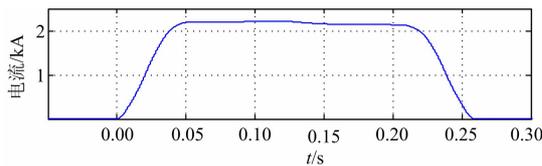


图 13 短路点 f_3 的电流有效值的波形图

Fig. 13 RMS values of fault current at f_3

3.3 方案性能对比

表 2 列出了不同位置短路时, 不同保护方法切除故障所需的时间。其中, 方法一切除故障线路时间均为 1.0 s, 明显优于传统的保护方法; 而方法二切除电站附近的故障线路只需 0.2 s, 切除故障最长时间也只要 1.0 s, 大大提高了保护的動作速度。

表 2 完全切除故障所需时间

Table 2 Time of removing the fault

短路点的位置	切除故障时间/s		
	传统保护方法	保护方法一	保护方法二
f_1	1.3	1.0	1.0
f_2	1.7	1.0	0.6
f_3	2.1	1.0	0.2

4 结论

本文针对船舶环形配电网提出了两种无通道保护方法。方法一是对端断路器断开后, 本端保护按照前后级保护装置动作时限的级差实现保护的选择性, 该方法简单易行, 能缩短切除故障的时间。方法二是利用对端断路器动作引起的本端故障电流的变化来识别故障区域, 再决定本端断路器是否跳闸, 该方法能有效提高线路保护的動作速度, 特别是对于电站附近的故障。仿真表明, 这两种无通道保护方法都能迅速切除线路的短路故障, 保证重要负载的供电连续性。对于多电源环网系统的无通道保护方法, 将在随后发表的文章中给出。

附录 A

图 1 为船舶中压交流供电网络, 系统电源电压为 6 600 V, 其发电机数据如表 A1 所示, 负荷数据如表 A2 所示, 电缆参数如表 A3 所示。

表 A1 发电机参数

Table A1 Parameters of generators

电机类型	容量/MVA	数量/台
柴油发电机	7.5	2

表 A2 负荷数据

Table A2 Data of loads

配电板	S/MVA	配电板	S/MVA
A	4	E	1.2
B	2	F	2
C	1.2	G	4
D	0.035	--	--

注: 负荷功率因数为 0.8。

分配电板之间电缆型号一样, 此处只列举 AB 间电缆参数。

表 A3 电缆参数(单相单根导体每 1 000 m 数据)

Table A3 Parameters of cables

电缆	长度/m	阻抗/ Ω	
		R	X
AB	50	0.152 604	0.081
电动机支路	15	0.327 145	0.089 167

参考文献

- [1] 邵能灵, 王鹏, 倪明杰. 大型船舶电力系统关键技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 94-101.
- [2] 吴世君, 王立辉. 舰船电力环形网络综合逻辑判断保护法研究[J]. 船舶, 2011, 22(3): 41-43.
WU Shijun, WANG Lihui. On integrated logic judgment protecting method for warship electrical network[J]. Ship & Boat, 2011, 22(3): 41-43.
- [3] 冀路明, 张怀亮. 舰船配电网结构研究[J]. 船舶工程, 2009, 31(2): 35-38.
JI Luming, ZHANG Huailiang. Research on network configuration of power distribution system in ships[J]. Ship Engineering, 2009, 31(2): 35-38.
- [4] 齐郑. 基于电压-时间型重合器的配电网单相接地故障自动隔离技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 33-36.
QI Zheng. Technology research of fault automatic isolation in distributed single-phase-to-ground based on voltage-time type recloser[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 33-36.
- [5] 张延辉. 10 kV 馈线自动化解决方案探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 150-156.

- ZHANG Yanhui. Discussion of 10 kV feeder automation solutions[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 150-156.
- [6] 张项安, 张新昌, 李卫星, 等. 基于差动保护的配电网闭环运行方式探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 41(3): 102-106.
- ZHANG Xiangan, ZHANG Xinchang, LI Weixing, et al. On the closed-loop operation mode for differential protection-based distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2010, 41(3): 102-106.
- [7] 王秘. 大型船舶电力系统自适应保护原理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- WANG Mi. Study on principle of adaptive protection for large shipboard power system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.
- [8] 范啸平, 王威, 邵能灵, 等. 船舶电网电流差动保护的应用研究[J]. 船电技术, 2012, 32(2): 5-7.
- FAN Xiaoping, WANG Wei, TAI Nengling, et al. Application of current differential protection to ship power grids[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2012, 32(2): 5-7.
- [9] 张宁, 董新洲, 薄志谦, 等. 输电线路综合电流差动保护方案的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2007, 22(4): 16-19.
- ZHANG Ning, DONG Xinzhou, BO Zhiqian, et al. Research of synthetic current differential protection schemes for transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2007, 22(4): 16-19.
- [10] 张兆云, 陈卫, 张哲, 等. 一种广域差动保护实现方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 297-303.
- ZHANG Zhaoyun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 297-303.
- [11] 朱超, 梅军, 王椿丰, 等. 基于低延迟有限冲击响应滤波器的差动保护采样率转换算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 241-248, 319.
- ZHU Chao, MEI Jun, WANG Chunfeng, et al. FIR filter with reduced group delay based a sampling frequency conversion algorithm for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 241-248, 319.
- [12] 王业, 陆于平, 徐以超, 等. 一种用于差动保护的新型重采样方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 239-247.
- WANG Ye, LU Yuping, XU Yichao, et al. A novel resampling method for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 239-247.
- [13] 侯跃. 配电线路无通道保护分析[J]. 科技传播, 2012(23): 171-172.
- HOU Yue. The analysis of non-communication protection for distribution systems[J]. Public Communication of Science & Technology, 2012(23): 171-172.
- [14] 施慎行, 董新洲, 刘建政, 等. 配电线路无通道保护研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 31-34.
- SHI Shenxing, DONG Xinzhou, LIU Jianzheng, et al. Research on protection of non-communication for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(6): 31-34.
- [15] BO Z Q, DONG X Z, CAUNCE B RJ. Accelerated protection of distribution systems with tapped off loads[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission, and Distribution, 2004(151): 461-468.
- [16] BO Zhiqian. Adaptive non-communication protection technique for transmission lines BO Scheme 3 - the accelerated open approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1): 97-104.
- [17] 陈红. 两端供电及环形网络过流保护的原理及应用[J]. 中国西部科技, 2013(12): 26-27.
- CHEN Hong. The principle and application of the over current protection for power lines[J]. Science and Technology of West China, 2013(12): 26-27.
- [18] LI Bin, YU Xuan, BO Zhiqian. Protection schemes for closed loop distribution network with distributed generator[C] // 1st Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN 2009, Nanjing, China, April 6-7, 2009: 1-6.
-
- 收稿日期: 2014-04-10; 修回日期: 2014-08-12
- 作者简介:
- 张芳(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为船舶电力系统保护与控制; E-mail: zhangfan8665@qq.com
- 毕大强(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用;
- 曾祥君(1972-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统微机保护与控制。