

船舶选择性微机漏电保护系统

张琦兵¹, 王鹏², 邵能灵¹, 倪明杰², 卫卫²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 中国船舶工业集团公司第七〇八研究所, 上海 200011)

摘要: 漏电保护对保证船舶安全具有重要作用, 大型船舶由于结构复杂, 其漏电保护系统还需要具有选择性, 所以必须对零序电流保护的电容电流进行补偿。提出了基于支路 π 形等效的时域补偿方法, 仿真结果表明, 与常规的稳态补偿相比, 时域补偿会有更好的保护效果。在此基础上, 研究了漏电保护在微机中的实现, 介绍了软硬件的实现方案, 具有较广的应用前景。

关键词: 船舶电力系统; 选择性; 微机漏电保护; 时域补偿

Microcomputer-based selective leakage protection system of marine electric power system

ZHANG Qi-bing¹, WANG Peng², TAI Leng-ling¹, NI Ming-jie², WEI Wei²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract: Leakage protection plays an important role in protecting the marine. Due to the complexity structure of marine electric power system, selectivity is necessary for today's leakage protection, and the compensation of capacitive current is essential for zero-sequence current protection. This paper presents a new time domain compensate method based on π -equivalent of line. The simulation results show that comparing with the general state compensate method, the new method is more effective. Based on the time domain compensate method, this paper discusses the realization of microcomputer-based leakage protection and presents the scheme of hardware and software. The new scheme can be used to constitute a selective leakage protect system in marine electric power system.

Key words: marine electric power system; selective; microcomputer-based leakage protection; time domain compensate

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0060-05

0 引言

船舶电力系统由于工作环境恶劣, 潮湿、振荡与盐腐蚀等因素易造成电力设备的绝缘降低, 从而引起漏电故障。而船舶由于空间的限制, 船员经常与各用电设备接触, 漏电故障会危及船员安全; 对于大型油船或 LNG 船, 漏电故障更有可能引起火灾等安全事故^[1]。所以, 船舶漏电保护对船员的人身安全、船舶电力系统的可靠性及安全性有极其重要作用。

本文主要分析各种漏电保护原理在船舶电力系统中的应用情况。针对零序电流保护方案, 提出基于馈电线路 π 形等效的电流时域补偿方法。仿真结果表明, 与常规的稳态电流补偿相比, 时域补偿拥有更好的保护性能。在零序电流时域补偿的基础上, 研究了船舶漏电保护在微机中的实现, 介绍了软硬件实现方案, 新方案能为船舶电力提供具有选择性

的漏电保护系统。

1 船舶电力系统漏电保护应用分析

1.1 概述

对于三相四线制的供电系统, 可以用一个电流互感器测量三相线与中性线的电流和, 形成漏电保护器。对于小电流接地系统, 从原理上, 漏电保护分为附加直流源检测保护原理、零序电压保护原理、零序电流及零序方向保护原理。另外, 有学者提出基于自然直流的选择性漏电保护原理^[2-6]。在上述保护原理中, 只有零序电流、零序方向及自然直流具有选择性。

考虑到供电的安全性与可靠性, 在船舶电力系统中, 一般采用三相三线制、中性点不接地的供电方式^[7,8], 所以并不能应用三相四线制的漏电保护方案。另外, 由于附加直流检测与自然直流都有人为接地点, 对于安全性较高的大型船舶并不适合。再

者, 船舶母线/配电板处馈线出线较多, 无选择性的漏电保护不能满足供电可靠性要求。所以, 船舶电力系统中应该重点考虑零序电流及零序方向保护。

1.2 零序电流保护

如图 1 为典型船舶电力系统出线图, r 和 C 为各支路对地导纳与电容。支路 N_j 发生接地故障后, 系统各支路都会出现零序电流。故障支路的零序电流等于其它支路零序电流之和, 根据零序电流的大小变化, 可以形成零序电流保护。

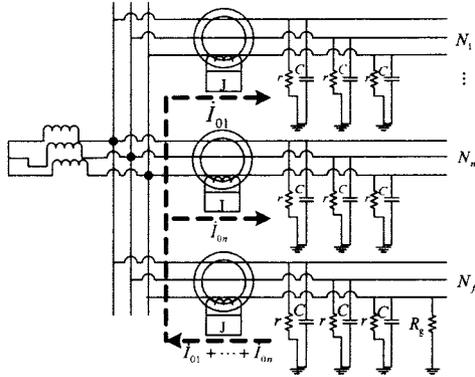


图 1 典型船舶电力系统出线图

Fig.1 A typical marine electric power system

对于零序电流保护, 当母线出线支路分布电容分散性较大时, 必须进行电流补偿以满足选择性^[1]。文献[9]提出了一种较为实用的稳态电流补偿方法, 但该方法未能考虑故障发生后系统的暂态过程。本文提出一种新的微机漏电保护及电流补偿方法, 由软件实现电流补偿, 既能保证船舶的安全性, 又能改善零序电流保护的性能。

2 电流时域补偿法

如图 2 为图 1 系统图经过支路 π 形等效后的故障零序网络图。 $C_{01}=C_{02}$ 为线路对地零序电容, R_0 为线路零序电阻, L_0 为线路零序电感。根据零序网络图可得任意健全支路零序电流与零序电压的关系:

$$i_0 = (C_1 + C_2) \frac{du_0}{dt} + C_1 C_2 (R_0 \frac{d^2 u_0}{dt^2} + L_0 \frac{d^3 u_0}{dt^3}) - C_2 (R_0 \frac{di_0}{dt} + L_0 \frac{d^2 i_0}{dt^2}) \quad (1)$$

令补偿电流:

$$i_{cp0} = (C_1 + C_2) \frac{du_0}{dt} + C_1 C_2 (R_0 \frac{d^2 u_0}{dt^2} + L_0 \frac{d^3 u_0}{dt^3}) - C_2 (R_0 \frac{di_0}{dt} + L_0 \frac{d^2 i_0}{dt^2}) \quad (2)$$

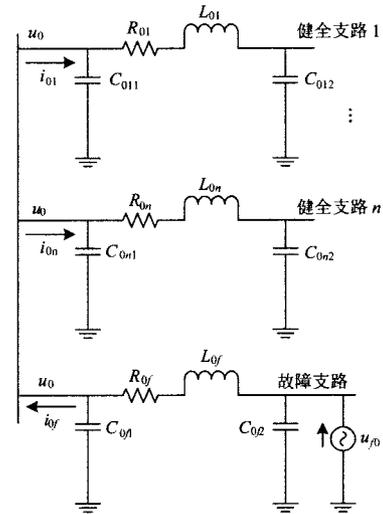


图 2 支路分布电容 π 形等效后的零序网络

Fig.2 Zero-sequence network with π models

将式(2)离散化, 令:

$$\begin{cases} u_0 = u(k); i_0 = i(k) \\ \frac{du_0}{dt} = \frac{u(k) - u(k-2)}{2T} \\ \frac{di_0}{dt} = \frac{i(k) - i(k-2)}{2T} \\ \frac{d^2 u_0}{dt^2} = \frac{u(k) - 2u(k-1) + u(k-2)}{T^2} \\ \frac{d^2 i_0}{dt^2} = \frac{i(k) - 2i(k-1) + i(k-2)}{T^2} \\ \frac{d^3 u_0}{dt^3} = \frac{u(k) - 3u(k-1) + 3u(k-2) - u(k-3)}{T^3} \end{cases} \quad (3)$$

根据式 (3) 得到:

$$i_{cp0}(k) = \left[\frac{C_1 + C_2}{2T} + \frac{R_0 C_1 C_2}{T^2} + \frac{L_0 C_1 C_2}{T^3} \right] u(k) - \left[\frac{2R_0 C_1 C_2}{T^2} + \frac{3L_0 C_1 C_2}{T^3} \right] u(k-1) + \left[\frac{R_0 C_1 C_2}{T^2} + \frac{3L_0 C_1 C_2}{T^3} - \frac{C_1 + C_2}{2T} \right] u(k-2) - \frac{L_0 C_1 C_2}{T^3} u(k-3) - \left(\frac{R_0 C_2}{2T} + \frac{L_0 C_2}{T^2} \right) i(k) + \frac{2L_0 C_2}{T^2} i(k-1) - \left(\frac{L_0 C_2}{T^2} - \frac{R_0 C_2}{2T} \right) i(k-2) \quad (4)$$

式中: $u(k)$ 、 $i(k)$ 分别为故障发生后第 k 个采样点的零序电压和零序电流; T 为继电器的采样时间间隔。

式(4)中有大量常数, 而且采样时间间隔对于保

护来说一般是固定的。所以微机保护中,式(4)可以存储成7个常系数,在程序运行计算时只需要进行简单的线性组合计算,计算量很小。值得注意的是式(4)基于瞬时值,所以补偿式应为:

$$i_{op}(k) = i_0(k) - i_{cp0}(k) \quad (5)$$

利用式(5)得到动作值序列 $i_{op}(k)$,再用傅氏算法可以得到其幅值,进而形成零序电流的保护判据。

3 仿真分析

利用 PSCAD/EMTDC 建立如图3所示仿真模型;系统电压等级为6.6 kV,电源中性点不接地。设置图3所示共七个故障点,每个故障点仿真单相接地和两相接地短路共6种故障,接地过渡电阻考虑0~35000 Ω 共计10种情况。考虑到船舶馈线支路分布电容分散性大,特设定三条分布电容有较大差异的支路,各支路零序 π 形等效参数如下:

- N1: $C_1 = C_2 = 0.13834073 \mu\text{F}$;
 $R = 10.6279236 \Omega$; $L = 0.1191635 \text{ H}$
- N2: $C_1 = C_2 = 0.069170367 \mu\text{F}$;
 $R = 5.3139618 \Omega$; $L = 0.05958177 \text{ H}$
- N3: $C_1 = C_2 = 0.011528395 \mu\text{F}$;
 $R = 0.8856603 \Omega$; $L = 0.00993029 \text{ H}$ 。

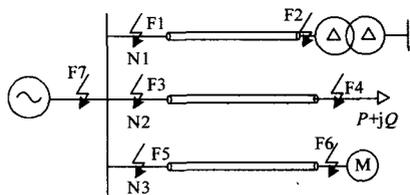


图3 系统仿真图

Fig.3 Simulation system network

仿真得到故障数据并进行数据处理,每个周波40点采样。比较零序电流保护、带稳态补偿的零序电流保护与基于时域补偿的零序电流保护三种方案在反向故障与正向故障时的保护动作情况。

表1为支路N1在F7点单相故障,即反方向故障时三种零序电流继电器不误动作的最小整定值(反向故障时继电器可能误动作,继电器的整定值须大于反向故障时可能出现的最大值),表2为支路N1在F1点单相故障,既正向故障时能动作的最大整定值(正向故障时,若要继电器动作,继电器的整定值须小于出现的最大值)。图4与图5为支路N3在反方向故障与正方向故障时三种零序电流保护动作值随过渡电阻的变化情况。

表1 F7点单相接地故障时支路N1的动作值
Tab.1 Phase to ground leakage fault on point F7

R_g / Ω	不补偿	稳态补偿	时域补偿
0	478.34	158.96	71.62
10	475.29	157.99	66.40
1 000	425.75	143.81	59.97
2 000	354.20	119.17	48.41
3 000	290.70	102.49	38.76
5 000	204.50	79.38	26.95
8 000	136.63	58.81	18.04
10 000	110.86	50.13	14.67
16 000	110.86	50.13	14.67
35 000	110.86	50.13	14.67

表2 F1点单相接地故障时支路N1的动作值
Tab.2 Phase to ground leakage fault on point F1

R_g / Ω	不补偿	稳态补偿	时域补偿
0	280.79	749.73	745.66
10	278.84	747.72	743.50
1 000	249.34	675.49	671.88
2 000	207.25	565.12	558.91
3 000	169.88	468.96	458.66
5 000	119.21	337.43	322.55
8 000	79.45	230.18	215.40
10 000	64.40	188.14	174.72
16 000	64.40	188.14	174.72
35 000	64.40	188.14	174.72

由表1的数据可以看出,反方向故障时,稳态补偿和时域补偿都能对动作电流进行相应补偿,防止继电器误动作。数据对比可以明显看出时域补偿比稳态补偿的效果更显著,可见时域补偿更能有效地防止反方向漏电故障时继电器误动,提高继电器的可靠性。

表2数据表明,正方向故障时,稳态补偿与时域补偿皆能大幅提高继电器的动作值。这对于继电器的动作十分有利,有效提高继电器的灵敏度。稳态补偿与时域补偿的数据对比可以看出,时域补偿的动作值略小。

对于零序电流继电器的选择性,最主要考虑的是背侧母线处故障时的动作情况,在图3所示系统图中即为F7点故障。表1和表2的数据对比表明,没有补偿的零序电流保护并不具有选择性。稳态补偿后选择性得到一定的满足,但是整定范围较小,灵敏度和可靠性都很低。对于时域补偿,其选择性是很明显的,并且整定范围更大,灵敏度和可靠性都能有很好的裕度。

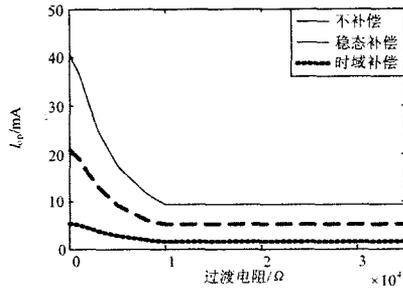


图4 F7点单相接地故障时支路N3的动作电流
Fig.4 The I_{op} of line N3 with leakage fault on point F7

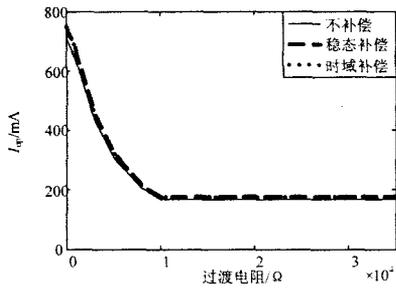


图5 F5点单相漏电故障时支路N3的动作电流
Fig.5 The I_{op} of line N3 with leakage fault on point F5

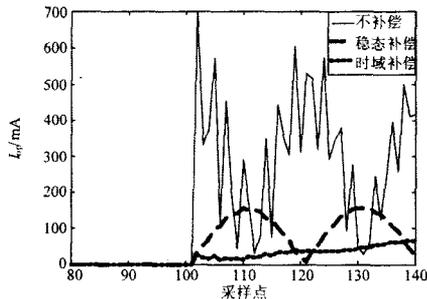


图6 反向故障后第一周波动电流随采样点的变化
Fig.6 The I_{op} of the first circle after a out zone leakage fault

图4和图5则是支路N3在反向故障与正向故障时三种保护方案的动作值。由图可见,支路N3的变化情况及补偿效果与支路N1基本相同,说明无论线路分布电容的大小,时域补偿皆有很好的效果。

图6是反向故障后第一周波内三种保护方案动作值随采样点的变化情况。从图可以看出,由于故障后暂态过程的影响,零序电流变化剧烈。稳态补偿后,由于补偿过程中并未计及暂态过程的影响,仍然存在两个波峰,易造成继电器误动。时域补偿可以将此暂态过程的电流波动很好补偿,使电流变化趋于平缓,能有效防止继电器的误动作。

从以上仿真分析可以得出如下结论:

1) 零序电流保护在应用时须进行电流补偿;电

流补偿后,不仅能降低反向故障时的动作值,还能提高正向故障时的动作值,保护的可靠性及灵敏度都有提高;

2) 与稳态补偿相比,时域补偿能更好地抑制故障后暂态过程、提高保护的灵敏度与可靠性;

3) 时域补偿对支路分布电容的分散性并不敏感,无论支路分布电容大小,都能有很好地补偿效果。

4 硬件装置与主程序流程图

如图7是微机选择性漏电保护装置硬件框图。同一母线下所有馈线的漏电保护在同一台微机中实现,采集的数据主要是各馈线的零序电流以及母线零序电压。其中前置滤波和A/D转换可以由CPU的时钟中断控制多路开关进行分时复用。程序存储器主要存储保护程序、保护的整定参数及一些常数(如式(4)中的七个常数)。数据存储器主要存储记录采样数据、故障支路以及故障发生的时间等。人机交互主要是键盘与显示屏,便于船舶工作人员的整定与监视。通信/继电器出口是漏电故障时的报警与继电器出口跳闸等。

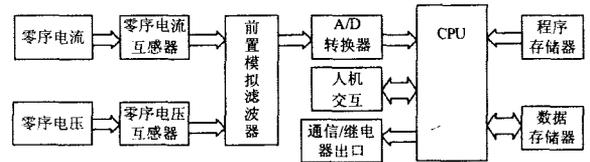


图7 微机选择性漏电保护装置硬件框图

Fig.7 Hardware block diagram of microcomputer-based selective leakage protection set

图8是保护主程序流程图。流程图中电流补偿采用性能更好的时域补偿法。

基于电流时域补偿的微机选择性漏电保护具有很好的选择性,对于同电压等级上、下级之间,可以配以一定的延时构成具有纵向选择性的漏电保护。而对于不同的电压等级,由于船舶电力系统中的变压器皆采用不接地的联接方式,不同电压级间的零序网络并无关联,并不影响漏电保护的整定。所以,利用微机选择性漏电保护装置,可以在船舶电力系统中构成一个完整的船舶微机选择性漏电保护系统。保证有选择性地切除漏电故障,加大了电力系统安全性,对船舶工作人员的人身安全和船舶安全有重要作用。

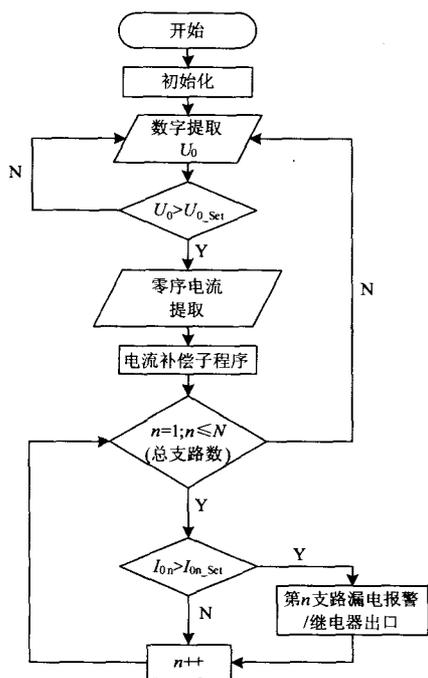


图 8 选择性漏电保护主程序流程图

Fig.8 Software diagram of selective leakage protection

5 结论

对于零序电流保护，由于船舶的高压母线和低压配电板出线较多，支路分布电容分散性大，所以保护中电流补偿是必须的。带算法补偿的零序电流保护不需要有附加的接地点，能有效提高船舶电力系统供电安全性。因此本文提出微机选择性漏电保护，并对电流补偿算法进行了研究。仿真结果表明，本文提出的电流时域补偿法比常规的稳态电流补偿效果要好，能有效提高漏电保护的可靠性与灵敏度。

参考文献

[1] 唐轶.选择性漏电保护[M].北京:煤炭工业出版社,1995.
TANG Yi. Selective Leakage Protection[M].Beijing:Coal Industry Press, 1995.

[2] 唐翔, 张文海, 宋连启.自然直流选择性漏电保护原理分析[J].工矿自动化,2002, (3): 22-23.
TANG Xiang, ZHANG Wen-hai, SONG Lian-qi. The Analysis of Natural DC Selective Leakage Protection Principle[J]. Industry and Mine Automation,2002,(3):22-23.

[3] 沈祥云, 袁振海.自然直流选择性漏电保护的研究[J].工矿自动化, 2004, (2): 10-13.

SHEN Xiang-yun, YUAN Zhen-hai. Study on Selective Leakage Protection System Based on Natural DC[J]. Industry and Mine Automation, 2004,(2): 10-13.

[4] 沈祥云. 自然直流选择性漏电保护原理的研究[D]. 南京: 南京工业大学,2005.
SHEN Xiang-yun. Study on Selective Leakage Protection System Based on Natural DC[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology,2005.

[5] 晁先发, 袁振海. 自然直流小电流选线系统中的漏电流初步研究[J]. 微计算机信息, 2006, (32):315-317.
CHAO Xian-fa, YUAN Zhen-hai. The Introduction Analysis of Grounding Current in Nature DC Small Current Choice Line System[J]. Micro Computer Information,2006,(32):315-317.

[6] 晁先发, 袁振海. 自然直流小电流选线系统中的漏电流的深入分析[J]. 电气应用, 2007, (2):67-69,73.
CHAO Xian-fa, YUAN Zhen-hai. The Embedded Analysis of Grounding Current in Nature DC Small Current Choice Line System[J]. Electrotechnical Application, 2007,(2) :67-69,73.

[7] 肖乐明.船舶电气新式安全系统[J].船舶,1998, (2):23-27.
XIAO Le-ming. A New Safety System for Ship's Electric System[J].SHIP&BOAT,1998,(2):23-27.

[8] 史际昌.船舶电气设备及系统[M].大连:大连海事大学出版社, 1998.
SHI Ji-chang.Ship Electrical Equipment and Systems[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press,1998.

[9] 于群, 刘兴邦, 曹娜.基于电流补偿法的矿井高压电网漏电保护系统[J].煤矿机电,2004,(3): 31-33.
YU Qun, LIU Xing-bang, CAO Na. The Selective Leakage Protection System of High-Voltage Distribution Network for Mine Based on Current Compensation Method[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2004,(3):31-33.

收稿日期: 2008-12-02

作者简介:

张琦兵(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事继电保护研究; E-mail: zqb_312@163.com

王 鹏(1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事船舶电气研究设计工作;

邵能灵(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事继电保护方向和电力市场方向的研究。