

基于电流饱和深度的船舶电网接地故障定位装置的研究

庄劲武, 杨锋, 沈兵

(海军工程大学电气工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 针对船舶交流电网接地故障的特点, 比较了现有接地故障选线方法的利弊, 提出基于饱和深度的零序电流幅值比较法, 并研制出实际装置, 实船应用验证了装置原理和方法的合理性和有效性。

关键词: 船舶; 交流电网; 接地; 定位

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)05-0038-04

0 引言

船舶电力系统普遍采用中性点浮地的交流三相三线制, 这种系统的优点是当单相对地短路时不会出现短路跳闸而导致供电中断, 从而保证了船舶供电的连续性和可靠性。随着现代船舶电力系统容量不断增大, 电力网络也越来越复杂和密集, 同时, 船舶的实际环境, 如温度、湿度、盐雾、霉菌等条件比较恶劣, 使得电力系统绝缘故障的发生率较高, 并由此引发的火灾和相间短路的严重事故屡见不鲜。长期以来, 限于技术手段, 难以对绝缘状态实时监测, 且一旦出现故障, 对绝缘故障点的定位(查找)只能依靠人工对数百条负载支路逐条断电来实现, 严重破坏了供电连续性。因此, 亟待研制出适合于船舶电力系统的接地故障定位装置。

1 船舶电网接地故障定位问题的提出

1.1 船舶电网接地故障的特点

船舶电网在无接地故障时, 各条负载支路的零序电流为零; 当出现接地故障时, 如图1所示, 第*f*条支路出现接地故障, 接地电阻为*R_f*, 此时, 故障支路和非故障支路的零序电流皆不为零。故障支路的零序电流为

$$I_{0f} = \frac{(C - C_f) E_A}{\sqrt{1/9 + C^2 R_f^2}} \quad (1)$$

非故障支路的零序电流为

$$I_{0i} = \frac{C_i E_A}{\sqrt{1/9 + C^2 R_f^2}} \quad (2)$$

其中, *C*为电网相对地电容; *C_f*和 *C_i*分别为故障和正常负载支路的相对地电容; *E_A*为相电压。为

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2004ABA026)

分析故障时零序电流的范围, 根据式(1), 可列出接地电流和对地电容及接地电阻的关系如表1所示, 并假设故障支路电容 *C_f* 远小于电网对地电容 *C*。

另外, 船舶电网不同于陆地供电网络, 在分析接地故障特点时有以下几方面的特点:

1) 接地电容较大, 且随工况变化而变化, 导致不同支路发生接地故障的电流大小不同, 发生接地故障的零序电流整定值无法确定。

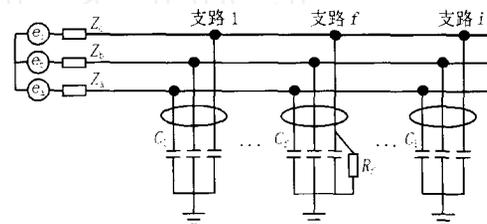


图1 船舶电网接地故障示意图

Fig 1 Schematic diagram of earth fault in the shipboard power network

表1 不同阻容状态对应的接地电流大小

Tab 1 Earth current of different resistances and capacitances

<i>R_f</i> /k	<i>I_{0f}</i> /mA		
	<i>C</i> = 5 μF	<i>C</i> = 10 μF	<i>C</i> = 20 μF
10	22	22	22
5	44	44	44
1	215	218	219
0	103.3	206.6	413.2

2) 供电支路电容分配不均, 且随工况变化而变化, 在电网发生接地故障时正常支路也可能有较大漏电流。

3) 接地电阻可能是金属接地, 也可能为电弧接地, 导致同一支路发生接地故障时的接地电流大小也有很大差别。

4) 电弧接地时, 由于电容值大, 导致零序电压较小。

1.2 现有方法的适应性分析

现有解决中性点浮地的三相交流系统接地故障定位的方法,实际应用的主要有零序电流的幅值比较法、零序电流的相位比较法和零序功率法^[1,2]。针对解决船舶电网接地定位问题,通过以上分析和试验对比发现,零序电流幅值比较法原理简单,但必须解决零序电流从几十毫安到几安培的大范围精确测量问题,对传感器及其放大检测电路提出了较高的要求,为解决大范围电流的测量,通常采用改变测量电流信号电路放大倍数(变量程)的方法,但对于多支路定位装置,若每条支路零序电流放大皆采用改变放大倍数的方法,将引起体积增大、价格高、控制复杂和可靠性降低等诸多不利;零序电流的相位比较法,对比于幅值比较法,在实现上要复杂许多,不仅要解决同时多路采集的问题,而且判断时间较长;零序功率法,在电弧性接地故障时,由于零序电压和零序电流都较小,而使灵敏性下降。因而需要找到适合实际船舶电网特点的故障判断方法。

2 基于饱和深度的幅值比较法

本文借鉴幅值比较法的思路,避开了大范围零序电流幅值精确测量的困难,提出了基于饱和和深度的幅值比较法这一解决方案以实现故障支路零序电流的辨别。

如图2所示,对于不同的零序电流经过放大电路后可能对应输出以下几种结果:

- 1) 接地电流幅值 $I_{0m} < 70$ mA 时,测量电路放大后的输出电压没有饱和,且测量输出电压幅值信号与接地电流 I_0 幅值成正比(见图中曲线1)。
- 2) 当接地电流幅值 $I_{0m} = 70$ mA 时,测量所得的输出电压信号处于临界饱和状态(见图中曲线2)。
- 3) 当接地电流幅值 $I_{0m} > 70$ mA 时,测量所得的输出电压信号处于饱和状态,且饱和深度与 I_0 的大小成正比(见图中曲线3、4)。

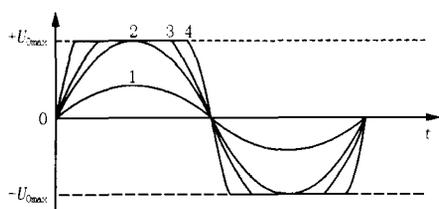


图2 不同幅值的电流测量结果示意图

Fig 2 Results of current measurement with different amplitude

因此可以通过电流传感器和放大器的合理设计,使得在小电流时,输出电压幅值与零序电流幅值成正比;在大电流时,输出电压波形的饱和深度与零序电流幅值一致。从而可通过比较饱和深度确定最大零序电流的负载支路。根据船舶电网发生接地故障时零序电流 $I_{0f} \gg I_0$ 的原理,可以方便、准确地实现故障支路定位。

3 实现方法及试验

3.1 硬件设计及试验

船舶电网接地故障定位装置的硬件框图如图3所示。在每条需要监测的负载支路上,环套漏电流传感器。传感器输出经过精密放大器,送给多路转换开关,单片机通过对多路选择开关的控制,决定选通的测量支路,并经A/D转换器,将测量结果传给单片机并存储。

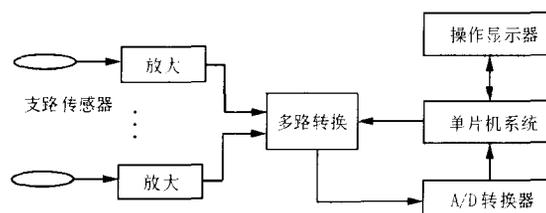


图3 定位装置硬件框图

Fig 3 Hardware structure of location equipment

为保证大范围零序电流的测量,必须在零序电流传感器和放大器及软件等方面的设计上,给予充分的考虑。首先,在零序电流传感器的设计上,应尽量提高其饱和电流,使其工作于线性放大区。研制的传感器铁心选用含镍量在85%的坡莫合金(1J85)环形绕制而成,其主要特点是磁导率极高(150 000 Gs/Oe),矫顽力低(0.02),饱和磁感应强度大(7 000 Gs)和温度稳定性好等。以120 mm穿芯式环形传感器为例,其有效截面尺寸20 × 25 mm,副边匝数为800。经过计算^[3]可知, $f = 50$ Hz时该零序电流传感器的饱和临界电流 $I_{0c} = \frac{4.44A_x N_{2n} B_n}{Z_z \times 10^8}$ = 6 589 A。零序电流 $I_0 < I_{0c}$ 时,零序电流传感器工作于线性放大区。

其中, B_n 为保护级额定磁通密度; N_{2n} 为副边匝数, A_x 为铁心有效截面积, Z_z 为二次回路总阻抗。

放大器的设计上,选择适当的 I/V 变换电阻,并采用仪用放大器7650构成反相放大器,实现电压的放大。如图4所示。巧妙利用了反相输入端与钳位

脚的短接,使电压放大器具有较宽的线性放大范围,有效地抑制了其饱和速度。

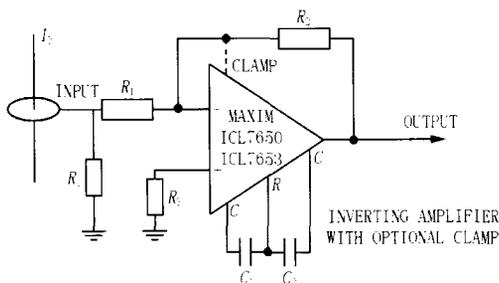


图4 ICL7650反相放大器电路

Fig 4 ICL7650 reversed amplifier circuit

图5、6、7、8给出了四种原边不同零序电流对应的副边电压波形。

可见,原边输入零序电流幅值不同时,副边输出电压波形呈现明显不同的饱和状态。且饱和程度随着原边输入零序电流幅值的增大而显著增加。

另外,可以看出不同的输入电流对应的电压过零点的斜率不一样。为使计算机能辨识到零序电流幅值的大小,笔者提出两种方法,一是比较波形在参考电压(3V)的宽度,二是比较过零点的斜率大小。第一种方法简单易实现,本文以此为例进行了试验。

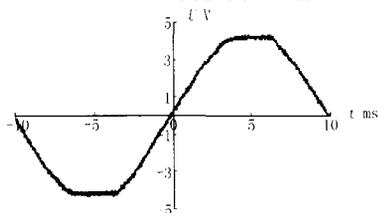


图5 原边电流为50 mA对应的输出电压

Fig 5 Output voltage of 50 mA primary current

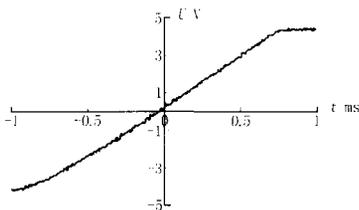


图6 原边电流为200 mA对应的输出电压

Fig 6 Output voltage of 200 mA primary current

设参考电压为3V,计算机以 $25\mu\text{s}$ 的采样周期对电压波形采集。每一条支路零序电流的大小是以大于3V和小于-3V的采样点数来描述的,文中称其为饱和点数。

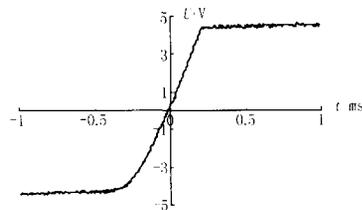


图7 原边电流为800 mA对应的输出电压

Fig 7 Output voltage of 800 mA primary current

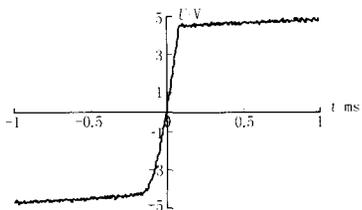


图8 原边电流为3 A对应的输出电压

Fig 8 Output voltage of 3 A primary current

表2 不同原边电流下饱和点数

Tab 2 Numbers of saturated points in different primary currents

原边电流值 /mA	大于 +3V的 点数	小于 -3V的 点数	共计饱和 点数
50	212	212	424
200	356	356	712
300	366	366	732
500	380	380	760
800	388	388	776
3000	396	406	792

由以上实验结果可知,随着输入零序电流增加,输出电压波形的饱和深度随之增加,且有着相对固定的对应关系,不同输入零序电流对应的输出电压波形的饱和点数有较大差别。据此,完全可以分辨出接地电流的大小。

在实际船舶电网中,总电容一般不超过 $20\mu\text{F}$,单条支路的电容远小于电网总电容,一般不到其十分之一。因此,单条支路的电容对于故障电流的影响基本可以忽略不计。而故障支路电流则远大于其他非故障支路的电流,一般在十倍以上。

由以上情况可知,对于故障支路 $I_{0f} < 50\text{ mA}$ 时,传感器检测到的零序电流可以在7650放大电路线性放大后明显区分出幅值大小,从而实现故障支路判断。接地电阻较小时,故障支路 I_{0f} 很大,以 $I_{0f} = 3\text{ A}$ 为例,此时非故障支路电流 $I_{0n} = 300\text{ mA}$,通过基于饱和深度的幅值比较法可以通过比较饱和点数准确地判断出故障支路。即使故障支路电流 I_{0f} 与非故障支路的电流 I_{0n} 之比减小为5,从表2中数据也可

以看出,利用基于饱和深度的幅值比较法仍然可以准确分辨出零序电流的大小,从而实现故障支路判断。

当参考电压为 3 V 时,可测得最小零序电流的有效值为 30 mA。当需要测得更低的故障电流时,可采用较小参考电压,如 1 V (对应 10 mA)。

3.2 软件设计

根据以上原理可以编制船舶电网接地故障支路定位判断程序,程序框图如图 9 所示。

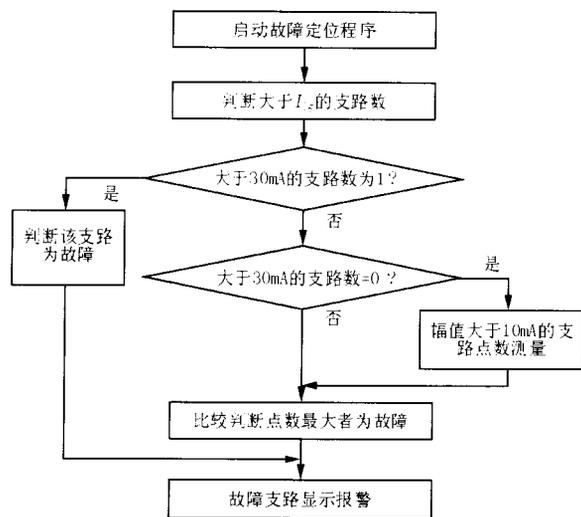


图 9 接地故障支路定位判断程序框图

Fig 9 Judgement programs of earth fault branch detection

1) 启动判据由外加直流法测量网络电阻决定。当网络电阻低于预设值时,启动接地故障支路定位程序;

2) 判断零序电流达到 30 mA 的支路数 (电压超过 3V),只有一条时直接判为故障支路;

3) 两条或两条以上时采用基于饱和深度的幅值比较法取饱和点数最大的一条为故障支路;

4) 当支路零序电流均小于 30 mA 时采用计算

超过 10 mA 点数 (电压超过 1 V)的方法比较零序电流大小,大的判断为故障支路。

4 结论

本文提出了基于零序电流判断船舶电网接地故障定位的应用方案,在接地电流较小时利用精密放大电路来判断电流大小,接地电流较大时利用基于饱和深度的幅值比较法来实现故障支路定位。该方案可以充分考虑到船舶电网接地故障时的电流特征,在较大范围的接地电流情况下实现准确定位,已成功应用于船舶电网的接地故障定位中。

参考文献:

- [1] 马珂,张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望 [J]. 继电器, 2003, 31(5): 42-46
MA Ke, ZHANG Bao-hui. Development and Prospect of the Single-phase Grounding Fault Detection in Unearthed or Compensated Neutral Networks [J]. Relay, 2003, 31(5): 42-46
- [2] 傅周兴,万耕. 小电流接地系统单相接地故障选线方法 [J]. 低压电器, 2002, (3): 43-47.
FU Zhou-xing, WAN Geng. Methods of Fault Line Selection for Single Phase to Earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral [J]. Low Voltage Apparatus, 2002, (3): 43-47.
- [3] 电机工程手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 1984.
Electrical Machine Engineering Handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 1984.

收稿日期: 2004-07-02; 修回日期: 2004-09-21

作者简介:

庄劲武 (1967 -),男,副教授,主要从事舰船电力系统自动化与安全运行等方面的教学和科研工作;

杨 锋 (1977 -),男,硕士研究生,主要从事电力系统自动化及安全运行的研究工作。

Research on fault feeder detection device for shipboard AC power system based on current saturation

ZHUANG Jin-wu, YANG Feng, SHEN Bing
(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: This paper analyzes the characteristics of earth fault in the shipboard AC power system. A new method based on the saturation of zero-sequence current is presented and practical device is developed. The application of the equipment show that this method is reasonable and effective.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Hubei Province (2004ABA026).

Key words: shipboard; AC power system; earth fault; fault feeder location