

## [船舶电气]

## 船舶中压电力系统中性点接地方式研究\*

王 鹏

(708 研究所 上海 200011)

[关键词]船舶中压电力系统;中压;中性点接地方式

[摘 要]对船舶中压电力系统的几种中性点接地方式,作了较为详细地分析。对于适用于船舶中压电力系统的不接地系统和经高阻接地系统各自的优缺点作了比较。从而得出当系统对地电容电流大于一定的值后,采用中性点经高阻接地系统较为合适。这样可以大大降低电流的等级,在大大降低配电板成本的同时,也节约了大量的电缆,提高系统的安全可靠性。

[中图分类号]TM71 [文献标识码]A [文章编号]1001-9855(2007)03-0049-06

## Neutral point earthed modes for ship intermediate voltage power system

Wang Peng

**Keywords:** ship intermediate voltage power system; intermediate voltage; neutral point earthed modes

**Abstract:** This paper compares the advantages and disadvantages of ungrounded system with earthed system via high resistance in ship intermediate voltage power system, and comes to the conclusion that when the over ground capacitive current is heavier than a certain value, it is advisable to apply neutral point via high resistance earthed system. Thus, the current class can be highly reduced, which not only cuts off the cost of switchboard but also saves great amount of cables and enhances the system safety and reliability.

## 1 前 言

随着大力发展经济时代的到来,对海洋运输提出了更高的要求。船舶,作为海洋运输的主体,无论是整体性能,还是科技含量,都与以前有了翻天覆地的变化。特别是对于电力负荷需求的猛增,使得原来的低压交流供电和配电系统不再完全适合,必须考虑使用中压交流电力系统。如装载大量冷藏集装箱的超大型集装箱船,冷藏箱数量超过 700 个,全船电力负荷超过 10 MW;某海洋工程 FPSO,船体部分最大工况负荷超过 15 MW;还有大型 LNG 船,全船电力负荷也十分惊人。当电力系统的容量达到一定的数值后,采用中压交流电力系统是一个很好的选

择,它可以大大降低短路电流的等级,在大大降低配电板成本的同时,也节约了大量电缆,提高系统的安全可靠性。

由于中压系统对设备绝缘等级的要求非常高,出于对绝缘成本、人身和设备安全等方面考虑,中性点接线方式自然而然的成为必须合理解决的问题。

## 2 中性点接地方式

中压电力系统中发电机组星形接线的公共点称为中性点,按中高压电力系统的现状可以根据系统运行的需要将中性点接地方式分为中性点直接接地,经低电阻器接地(大接地电流接地系统)、经电抗器接地或者经高电阻器接地(小接地电流接地系

\* [收稿日期]2006-9-25

[作者简介]王 鹏(1978.9-),男,汉族,工程师,上海交通大学在读工程硕士,主要从事船舶电气设计研究工作。

统)和不接地(中性点绝缘系统)。中性点接地方式是一个涉及电力系统许多方面的综合性问题,在选择中性点接地方式时,必须考虑一系列因素,主要是供电可靠性、电力系统的过电压与绝缘配合、继电保护要求和电气安全性等等。

下面简单分析一下几种接地方式及其优缺点:

## 2.1 中性点不接地

在中压电力系统发展的早期,系统一般是以中性点不接地方式运行的,这一情况可以说很自然,因为中性点和地连接起来对于正常的电力传输并无作用,而不接地却有一个好处,即运行中可以允许单相接地故障存在一段时间。若是由于雷击等引起的绝缘闪络,则绝缘可能自行恢复;当故障不能消除时,运行人员一般可以在两小时内将故障回路切除,这样,其供电可靠性就很高。同时,中性点不接地运行方式还有一个优点,经济而且工艺简单,不需要在中性点连接任何设备。

中性点不接地方式因其中性点是绝缘的,电网对地电容中储存的能量没有释放通路。在发生弧光接地时,电弧的反复熄灭与重燃,也是向电容反复充电过程。由于对地电容中的能量不能释放,造成电压升高,从而产生弧光接地过电压或谐振过电压,其值可达很高的倍数,对设备绝缘造成威胁。

由于大量的中压设备与中压电缆存在对地电容和漏电导,当发生单相接地故障时,故障点接地的三相电容电流  $I_c = 3\omega C U_e$ 。当线路不太长时,接地电流很小,不至于形成稳定的电弧,电弧一般能迅速自动熄灭。但是当线路很长,特别是电缆线路时,接地电容电流相当大,接地电弧不但不能自动熄灭,而且会出现电弧接地过电压(额定相电压的 3.5 ~ 5 倍)。电弧接地过电压持续时间长,影响面大,对线路的绝缘薄弱点和发电机绝缘威胁很大。单相接地故障存在时间一长,往往会发展成多相短路事故。

## 2.2 中性点直接接地

中性点直接接地方式,即将中性点直接接入大地。该系统运行中若发生一相接地时,就形成单相短路,其接地电流很大,使断路器跳闸切除故障。这种大电流接地系统,不装设绝缘监察装置。

中性点直接接地最重要的优点是可将过电压控制在安全水平且相应的绝缘水平低。系统的标称电压越高,这一优点越显得重要。还有,从继电保护的

角度来看,大接地电流无疑也是有利的。

在直接接地系统中,单相接地会引起断路器跳闸,对故障情况下供电连续性不利。而且单相接地电流很大,有时会超过三相短路电流,因而要影响断路器分断能力的选择。此外,接地短路电流过大,在电气安全方面的问题也比较严重。

中性点直接接地系统产生的接地电流大,故对通讯系统的干扰影响也大。当电力线路与通讯线路平行走向时,由于耦合产生感应电压,对通讯造成干扰。

## 2.3 中性点经消弧线圈接地

中性点经消弧线圈接地方式,即在中性点和大地之间接入一个电感消弧线圈。当电网发生单相接地故障时,其接地电流大于 30 A,产生的电弧往往不能自熄,造成弧光接地过电压概率增大,不利于电网安全运行。为此,利用消弧线圈的电感电流对接地电容电流进行补偿,使通过故障点的综合电流减小至 10 A 以下,能自行熄弧。通过对消弧线圈无载分接开关的操作,使之能在一定范围内达到过补偿运行,从而达到减小接地电流。这可使电网持续运行一段时间,相对地提高了供电可靠性。

该接地方式因电网发生单相接地的故障是随机的,造成单相接地保护装置动作情况复杂,寻找发现故障点比较难。消弧线圈采用无载分接开关,靠人工凭经验操作比较难实现过补偿。消弧线圈本身是感性元件,与对地电容构成谐振回路,在一定条件下能发生谐振过电压。消弧线圈能使单相接地电流得到补偿而变小,这对实现继电保护比较困难。

## 2.4 中性点经电阻接地

中性点经电阻接地方式,即中性点与大地之间接入一定电阻值的电阻。该电阻与系统对地电容构成并联回路,由于电阻是耗能元件,也是电容电荷释放元件和谐振的阻尼元件,对防止谐振过电压和间歇性电弧接地过电压,有一定优越性。中性点经电阻接地的方式有高电阻接地低电阻接地等方式。两者的目的都是为了限制瞬间电流至一个安全值,约为正常值的 250% 之内。

高阻接地方式一般不要求立即清除接地故障,因为接地故障电流已经被限制到一个极低的数值,这一低数值的标准值为 5 A。这种接地保护采用检测和警告的方式,因为这样比立即跳闸好,可以尽可

能保证运行的连续性。一般认为,电网采用高阻接地方式,线对地故障电流不应该超过 10 A。

低电阻接地方式具有立即有选择性的清除线路接地故障的优点,但要求最小接地故障电流足够大,通常在 400 A ~ 500 A 之间,便可以可靠的起动接地故障继电保护装置。

中性点经电阻接地可以直接消除不接地系统的不足:

- A. 能减少电弧接地过电压的危险性;
- B. 使灵敏而又选择性的接地保护得以实现。

另外,由于这种系统的接地电流比直接接地系统的小,高阻接地能较好地保持网络系统工作的连续性,所以对邻近的通信线路的干扰也就比较小。

### 3 船舶电力系统中性点接地方式的选择

通常情况下,中性点接地方式一般选择原则有以下几点:

- A. 单相接地故障对连续供电影响最小,设备能持续运行。
- B. 单相故障接地时,健全相的过电压倍数比较低,不致破坏系统绝缘水平。
- C. 发生单相接地故障时,能将故障电流对电机和电缆的危害限制到最低程度,同时又利于实现灵敏而又有选择性的接地保护。
- D. 尽量减少设备之间的影响。
- E. 接地设备易于订货,接地保护简单,投资少。

除了上述要求之外,电气设备对地电容电流的大小是决定用何种接地方式的关键因素。

一般来说,船舶电力系统采用的是三相三线制,中性点绝缘系统。其好处在上文“中性点不接地”一节中已经详细阐述。更重要的一点是,船体全部是钢质结构,本身是一个良好的导体,以船体作回路具有一定的风险性,尤其是液货船,许多船级社在规范中明确提出在液货船中宜采用中性点绝缘的系统。但是当全船中压系统对地电容电流的值达到一定高的程度时,不接地系统在克服过电压能力不足的缺点就反映得比较突出。单相接地故障产生的弧光接地过电压或谐振过电压,其值可达很高的倍数,对设备绝缘造成威胁。时间越长,发展成两相甚

至多相短路的可能性越大,造成的后果更加不可设想。所以两者形成了一种矛盾。

现在船舶中压电力系统普遍采用三相绝缘系统和中性点经高电阻接地系统,而其中的中性点经高电阻接地是船舶中压电力系统使用最广泛的一种。

对于液货船各船级社通常推荐使用三相绝缘系统以保证船舶的安全性,但是如果考虑到系统比较大,有比较大的电容电流会产生比较高电弧过电压,便可以采用中性点经高阻接地系统。但是规范要求由此可能产生的任何故障电流都不应该直接流过任何危险场所,事实上这点实际上很难操作。

中性点经高电阻接地系统相对于中性点绝缘系统的优点非常显著,在上文“中性点经电阻接地”一节中已经讲得非常清楚。大接地电流系统由于单相接地故障的危害性,很少考虑其在船舶中压电力系统中的应用,消弧线圈接地在陆上中压电力系统广泛使用,但其在接地故障继电保护、单相接地故障发展为多相接地故障的可能性和中性点接地系统所需费用等方面处于劣势,在船舶和海洋工程的中压电力系统中还没有工程应用的实例,其接地费用(初始投资)和继电保护方面明显不如中性点经高阻接地系统。

### 4 中性点经高阻接地系统的原理

高电阻接地是这样定义的:

电力系统中性点通过一电阻接地,其单相接地故障时的电阻电流被限制到等于或略大于系统总电容电流,即  $I_{RN} \geq 3I_{C0}$ ,如图 1 所示。图中  $R_N \leq X_{C0}/3$ ,  $R_N$  为接地电阻,  $X_{C0}$  为系统每相对地容抗,  $3I_{C0}$  为总电容电流,  $I_{RN}$  为流过电阻器的电流。

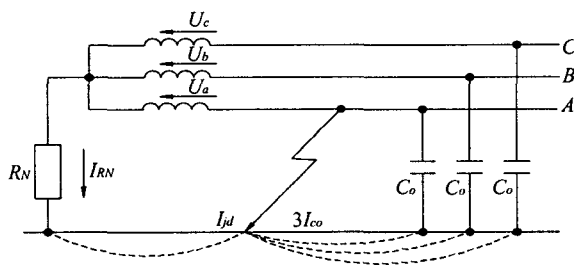


图 1 配电网中性点经高电阻接地原理图

当发生电弧接地时,接地电流为  $I_{jd} = (1/R_N + j3\omega C_0) U_A = I_{RN} + jI_C$

单相接地将使非故障相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍,变成线电压;此时,电网的线电压仍维持对称状态,对负荷没有影响。如果发生的是间歇性电弧接地故障,非故障相对地电压将大大超过3倍,而且波及整个电网,使那些绝缘薄弱环节相继发生绝缘击穿,使事故扩大。

单从降低电弧电压角度来看,电阻器  $R_N$  阻值满足  $R_N \leq 1/3\omega C$  ( $C$  是系统的每一相对地分布电容)就可以了。电弧接地时,在电弧点燃熄灭过程中,系统积累多余的电荷,使振荡过程加剧,从而产生很高的过电压。若能使这些电荷在从电弧熄灭到重燃前的一段时间(半个工频周期内)通过中性点电阻器泄漏掉,过电压就能大大降低。当  $R_N \geq 10 \times 1/3\omega C$  时,仅有  $1/4$  的电荷在半个工频周期内被泄漏掉,电弧接地引起的瞬态过程与中性点不接地系统没有很大的区别,而当  $R_N \leq 1/\omega C$  时,过电压就小得多了。因为线路对地电容向  $RN$  放电遵循  $e^{-t/T}$  规律,当满足  $R_N \leq 1/\omega C$  时,放电时间常数  $T = 3R_N C = 3/\omega = 3/2\pi f$ ,当  $t$  为半个工频周期  $t = 1/2f$  时,线路上的电荷由1降至  $e^{-\pi/3} = 0.04$ 。这说明电荷大部分泄漏掉,因而不会再产生很高的振荡过电压。在

规模不大的中压电力系统中接入这种电阻器后,接地电流不大,仍能达到接地电弧自行熄灭的条件。这样,此种称为中性点经高值电阻器接地的系统就可以保持中性点不接地系统(发生接地故障但不跳闸)的优点,同时又解决了电弧接地过电压的问题,而且高阻接地也有利于满足接地故障继电保护的要求。需要强调的是,这种高阻值接地方式比较适合于规模不大的系统(例如接地故障电流不大于  $10\text{ A}$ ,  $3 \sim 10\text{ kV}$  中压电力系统)。

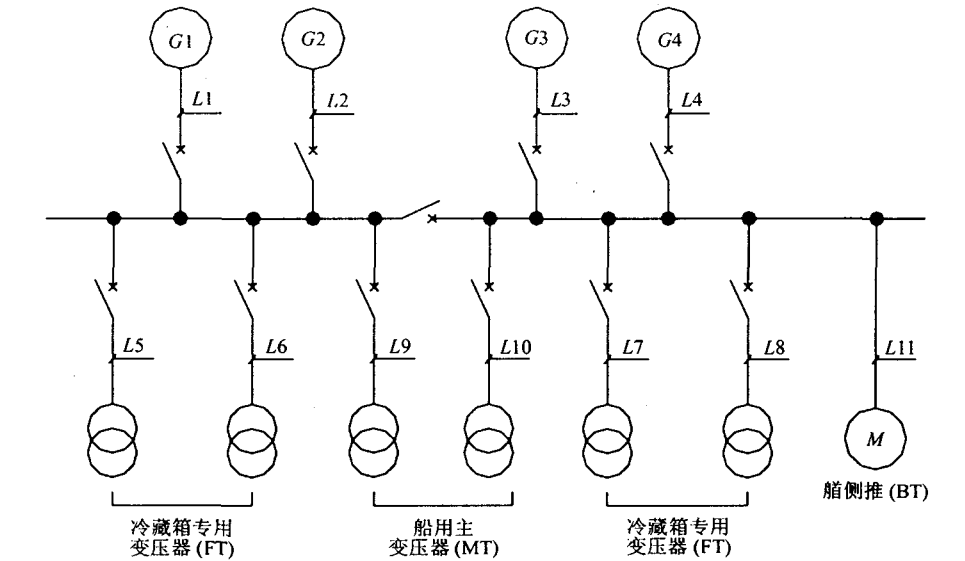
实际工程中,接地电阻值将比单相对地容抗值更小,以保证电弧过电压在比较安全的数值范围内,也就是接地故障时故障电弧能够自行熄灭,系统不会产生很高的振荡过电压。例如 DNV 规范规定,当系统中性点通过一个电阻接地,其电阻值等于或者稍小于一相与地之间容抗值的三分之一,即单相接地故障时电阻电流将等于或者略大于系统总的电容电流。

## 5 举 例

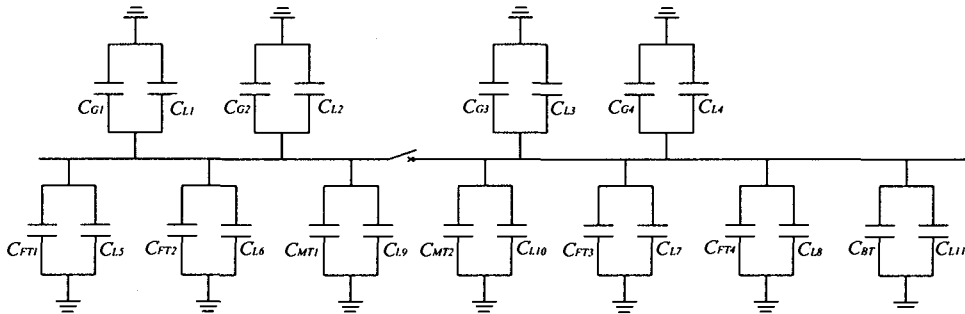
图2(a)某大型集装箱船  $6.6\text{ kV}$  交流电力系统的单线图,图2(b)是其等效的系统电容示意图。表1是发电机、变压器和电缆的主要参数。

表1 电力系统发电机、变压器和电缆主要参数

电气设备	容量	电容	电缆	规格	长度
发电机 G1	2 750 kW	0.05	电缆 L1	$2(3 \times 95)$	5
发电机 G2	2 750 kW	0.05	电缆 L2	$2(3 \times 95)$	5
发电机 G3	2 750 kW	0.05	电缆 L3	$2(3 \times 95)$	5
发电机 G4	2 750 kW	0.05	电缆 L4	$(3 \times 95)$	10
变压器 FT1	1 700 kVA	0.006	电缆 L5	$(3 \times 95)$	10
变压器 FT2	1 700 kVA	0.006	电缆 L6	$(3 \times 95)$	10
变压器 FT3	1 700 kVA	0.006	电缆 L7	$(3 \times 95)$	10
变压器 FT4	1 700 kVA	0.006	电缆 L8	$(3 \times 95)$	10
变压器 MT1	4 200 kVA	0.0015	电缆 L9	$2(3 \times 95)$	10
变压器 MT2	4 200 kVA	0.0015	电缆 L10	$2(3 \times 95)$	10
艏侧推 BT	3 000 kW	0.05	电缆 L11	$2(3 \times 95)$	320
断路器和汇流排	—	0.05	—	—	—
合计	—	0.327	—	—	—



(a) 大型集装箱船 6.6 kV 电力系统单线图



(b) 大型集装箱船 6.6 kV 电力系统等效电容示意图

图 2

5.1 接地电容的计算

输电线路和电机电器的导电部分的对地分部电容大部分可以从参考资料中查出。

对于 6 kV 电缆线路可以通过下式求得经验值：

$$I_c = \frac{95 + 2.64S}{2200 + 6S} U_r \text{ (A/km)}$$

式中  $S$ ——电缆截面( $\text{mm}^2$ )；

$U_r$ ——额定线电压(kV)。

为了方便,也可以通过查表获得电缆线路的对地电容。表 2 为具有电缆保护层的三芯电缆每相对地电容值(6 kV)

根据中压电缆的具体长度参数,可以算出全系统电缆线路总的电容电流。

$$\sum C = 0.42 \times 0.76 + 0.327 = 0.647 \text{ } \mu\text{F}$$

(当系统变压器,电动机,发电机及配电装置的电容值不详时。可以用电缆电容值乘以 1.25 得到

全系统的近似值  $C_0$ 。)

表 2

电缆截面	电缆电容值(相/每千米)	电缆总长度
10 $\text{mm}^2$	0.2 $\mu\text{F/km}$	—
16 $\text{mm}^2$	0.23 $\mu\text{F/km}$	—
25 $\text{mm}^2$	0.28 $\mu\text{F/km}$	—
35 $\text{mm}^2$	0.31 $\mu\text{F/km}$	—
50 $\text{mm}^2$	0.36 $\mu\text{F/km}$	—
70 $\text{mm}^2$	0.40 $\mu\text{F/km}$	—
95 $\text{mm}^2$	0.42 $\mu\text{F/km}$	770 m
120 $\text{mm}^2$	0.46 $\mu\text{F/km}$	—
150 $\text{mm}^2$	0.51 $\mu\text{F/km}$	—

5.2 电容电流及接地故障电流的计算

单相接地电容电流

$$I_c = \frac{U_e \omega C \times 10^{-3}}{\sqrt{3}}$$

式中  $\omega = 2\pi f$ ;

$$I_c = \frac{6\,600 \times 2 \times 3.14 \times 60 \times 0.647 \times 0.001 \times 0.001}{1.732}$$

$$= 1.609 \text{ A}$$

三相接地电容电流;

$$I_c = \sqrt{3}U_e\omega C \times 10^{-3} = 2.787 \text{ A}$$

根据“单相接地故障时电阻电流将等于或者略大于系统总的电容电流”这一原则

$$R_N \leq 1/3\omega C = 1\,367.3 \, \Omega \quad (1)$$

按接地电阻的额定功率为系统三相对地电容无功容量的 1.5 倍考虑,接地电阻  $R_N$  可由下面的公式求得:

$$R_N = \frac{1}{9\pi f c} = 911.5 \, \Omega \quad (2)$$

(1)和(2)校核无矛盾后,可以求得单相接地电流电阻分量

$$I_R = \frac{U_e}{\sqrt{3}R_N} = 6\,600/911.5/1.732 \approx 4.18 \text{ A}$$

单相接地故障电流

$$I_F = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = 5.024 \text{ A}$$

接地电阻功率

$$P_N = \frac{U_e^2}{3R_N} \times 10^3 = 15.93 \text{ kW}$$

接地故障电流动作值

$$I_{FA} \leq \frac{I_F}{3} = 1.67 \text{ A}$$

(根据中国船级社钢质海船入级规范 2006 第四篇 2.14.2.1 第二条:当采用中性点接地系统时,接地故障电流既不大于配电板上或配电板分段上最大一台发电机的满载电流,又小于其接地故障保护电器最小工作电流的 3 倍。)

## 6 结束语

随着电力需求突飞猛进的今天,原先的船舶电力系统面临着前所未有的难题。中压电力系统正越来越普遍的使用于各种类型,各种用途的大型船舶中。必须在考虑经济成本,克服技术难题的同时,加入对安全,环境更多考虑的因素,在两者之间寻找到一个合适的平衡点成为了我们需要静心研究的课题。本文着重分析了中性点经高阻接地系统在船舶中压电力系统使用的背景、条件及其优缺点,以及接地电阻的分析计算,不足之处请多指正。✕

### [参考文献]

- [1] 刘筌主编. 电气工程基础[M]. 科学出版社
- [2] 电力工程电气设计手册[M]. 水利电力出版社,1989.
- [3] 王敏. 中压配电系统在超大型集装箱船上的应用研究[R]. (MARIC 超大型集装箱船课题研究报告). 2006.
- [4] 要焕年、曹梅月. 中压电网的内部过电压和中性点接地方式[J]. 《电世界》2001. 10.
- [5] 许允之. 配电网中性点经高阻接地安全性能的分析. 2006.

(上接第 48 页)

展,舰船磁性处理技术水平也有了相应地发展,其磁性处理工艺水平也相应提高,不仅其磁性处理能力大幅度提高,而且对舰船磁场磁性处理后的稳定性以及剩余磁场的均匀度等均有大幅度的改进。

由于舰船磁性处理能力的提高和工艺水平的改进,影响和促进了舰船消磁系统的变化与改进,诸如采取对剩余磁场单独配置消磁系统绕组,这样,  $\sum_{i=1}^n AW_i \cdot l_i$  值将会大幅度的减小。这一技术我国也采用过,只是由于目前我国有关舰船磁性处理的相应配套技术的欠缺,其结果尚不能令人十分满意。

## 4 结 论

708 研究所的舰船消磁系统的研究设计至今已

有 50 多年的历史,本文所论述的舰船消磁系统的电缆选择方法,在研究设计工作中均曾应用过,且得到了满意的效果。尤其是在大型舰船消磁系统的研究设计中,可将本文所论述的五种方法(3.1~3.5)加以综合应用,相信定会得到较为满意的效果。

附注:

当舰船消磁系统绕组电缆的截面积  $S$  减小后,它将会对舰船消磁系统的总重量、总消耗功率以及经济性等带来较大的变化,研究设计者可多作几个方案,以满足舰船总体对消磁专业的要求。✕

### [参考文献]

- [1] 胡超. 试论舰船消磁系统中的电缆选择[J]. 舰船科研与设计,1998. 3.