

中性点小电阻多点接地系统 接地电阻设计研究

随着海上平台电力系统中电缆线路增多,系统容性电流增大,单相接地故障时的零序电流很大,传统的消弧线圈接地方式出现重复熄弧燃弧导致弧光过电压。小电阻接地方式可快速切除故障,限制过电压水平。为保证系统安全运行,对海上平台供电系统中性点小电阻多点接地系统接地电阻设计进行研究,提出电流均分的小电阻多点接地配置方法,并以某海上平台电网为例对所提出的方法进行验证。验证结果表明了所提出的设计方法的有效性和正确性。

鲁丰坤/湛江南海西部油田勘察设计有限公司 李卫团/中海石油有限公司
湛江分公司 康忠健 陈 醒/中国石油大学(华东)电气工程系



鲁丰坤/电气工程师

在电力系统中,发电机和变压器的中性点与大地之间的连接方式称为电力系统中性点接地方式。电力系统中性点接地方式是一个涉及电力系统供电可靠性、人身和设备安全、过电压的大小、短路电流的大小、绝缘水平、电磁环境兼容、通信干扰、继电保护和自动装置的配置以及电力系统稳定运行等许多方面的一项综合性的技术经济问题^[1-2]。

在我国的供电系统中,中性点接地方式主要有四种:中性点直接接地,一般适用于110 kV及以上系统;中性点不接地,一般适用于系统容量不大的3~60 kV的系统;中性点经消弧线圈接地,一般适用于采用架空线路的3~60 kV电力系统;中性点经电阻接地,一般适用于采用电缆线路的6~35 kV系统^[1]。

海上平台供电系统各平台间通过海底电缆相连。电缆的广泛使用导致系统单相接地故障时容性电流大大增加,传统的消弧线圈接地方式无法将容性电流补偿至可自行熄弧的故障电流水平,且

电缆不能自恢复绝缘,单相接地故障为永久性故障,应及时切除而非带故障运行,因此消弧线圈接地方式无法充分发挥其作用。而小电阻接地方式下,电阻器阻值小,接地电流大,故障易定位,可以迅速正确地切除接地故障线路,适合电缆线路组成的供电系统。

随着用电量的不断增加,电网容量和用户电网供电可靠性要求日益提高,电力电缆线路的大量使用,系统单相接地故障的电容电流大大增加,小电阻接地方式得到推广并将逐渐成为以电缆线路为主的供电系统的主要接地方式^[3]。但目前还没有配置多个中性点经小电阻接地方式的相关标准,本文采用电流均分法配置接地电阻并采用某海上平台供电系统进行验证。

中性点小电阻单点接地方式的配置

对于单电源网络,一般设置一处中性点经电阻接地。为电力系统配置小电阻接地方式需要做以下工作:确定接地电阻位置、计算系统容性电流、计算接地电阻阻值、接地电阻选型、校验标准和选型调整。

1. 接地电阻位置确定

为抑制三次谐波,电力系统一般不采用发电机中性点接地的方式,而是采用相应的变压器中性点接地方式。因此,接地电阻的位置就是中性点经电阻接地的变压器的位置。接地电阻的位置应尽可能位于送电端(靠近发电厂或变电站),目的是在一条线路因故障切除

关键词/Keywords

海上平台供电系统·
小电阻接地·
中性点接地·
多点接地·

后, 电网中仍有接地电阻, 保证其他线路故障时也能够快速切除故障。

若发电厂或变电站含有两台及以上主变压器时, 可以设置两台中性点经电阻接地的变压器, 两台变压器共用一套电阻器装置, 在实际运行中, 一台变压器的中性点经电阻实时接地, 一台作为备用, 通过切换开关进行转换。这种接地方案可以在变压器故障或隔离检修时仍保证电网有一个中性点经电阻接地。

2. 系统容性电流计算

系统容性电流指系统发生单相接地故障时的容性电流, 主要包括系统中所有电气连接的全部线路的电容电流和系统中与地之间跨接的电容器产生的电容电流^[5]。

电容电流的计算公式为

$$I_C = 3\omega C_0 U_\Phi \quad (1)$$

式中, I_C 为电网单相接地时的电容电流, A; C_0 为系统零序电容总和, F; U_Φ 为网络相电压, V。

3. 接地电阻阻值计算

接地电阻的取值需要考虑多方面的要求, 例如限制过电压倍数要求、零序保护灵敏度要求、对通信线路的干扰以及用电安全等^[4]。若进行定量计算分析, 接地电阻的阻值主要取决于系统的电压等级和系统容性电流。

对于35 kV电压等级的电网, 接地电阻计算公式为

$$R_n = \frac{U_\Phi}{(2 \sim 3)I_C} \quad (2)$$

式中, R_n 为接地电阻阻值, Ω ; U_Φ 为网络相电压, V; I_C 为系统电容电流, A。

由式(2)可知, 阻值根据系统容性电流的2~3倍来确定, 可以保证较低的过电压水平。式(2)可以求得接地电阻的阻值范围, 但阻值的选择不是随意的, 具体阻值需要根据相关标准确定。

4. 接地电阻选型

接地电阻的选型参照电力行业标准《配电系统中性点接地电阻器》。

根据行业标准, 电阻器的额定值主要有额定电压、额定频率、额定时间和额定发热电流^[7]。额

定电压是在额定频率及正常工作条件下, 允许在额定时间内加在电阻器两端未超过要求的电压有效值。在我国, 系统的额定频率为50 Hz。额定时间是电阻器在正常工作条件下, 流过额定发热电阻所允许的时间, 标准规定额定时间为10 s或长期时间2 h。额定发热电流是在电网出现接地故障条件下, 电阻器在额定时间里允许通过温升不超过标准规定值的电流有效值, 该标准推荐选用的额定发热电流值有3 A、7 A、16 A、25 A、50 A、100 A、200 A、400 A、630 A、800 A、1 000 A、1 250 A、1 600 A和2 000 A。

在进行电阻器选型时, 先根据电容电流选择标准推荐的额定发热电流, 再由下式计算电阻阻值

$$R_n = \frac{U_\Phi}{I_N} \quad (3)$$

式中, U_Φ 为接地电阻安装位置处的相电压, V; I_N 为选定的额定发热电流, A。

5. 校验标准

对于小电阻接地方式, 应控制单相接地故障电流小于1 000 A, 电流过大会导致系统电压波动且有可能对通信造成很大干扰^[8]。

校验工作可通过电力系统仿真软件进行建模仿真来实现。

6. 阻值调整

若整定的电阻阻值无法满足校验标准, 则需要重新对电阻进行选型。

单相接地故障电流过大是由接地电阻阻值过小引起的, 可以通过选择较小的额定发热电流来调整。

在进行额定发热电流的选择时可适当减小系统容性电流的倍数, 但必须保证额定发热电流大于系统容性电流, 否则无法将单相接地故障时的弧光过电压水平限制在2.5倍相电压以下^[9]。

单中性点接地的配置流程如图1所示。

中性点小电阻多点接地方式的配置

1. 电流均分法

对于含多个发电机与变压器的海上平台复杂电力系统, 需要对中性点经小电阻接地的变压

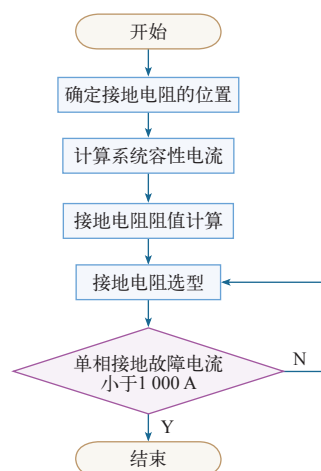


图1 接地电阻配置流程图

器的位置与数量做出合理分配。若只在一个海上平台内设置变压器的中性点经电阻接地，在电网解列时会导致部分电网处于中性点不接地的情况下，不利于电网安全运行。因此，应保证解列后的每个海上平台电网中至少有一台经电阻接地的变压器，所以，应该在每座海上平台内设置一台中性点经电阻接地的变压器。

对于含有多个海上平台的复杂电网，各平台内的接地电阻阻值，采用以下步骤对各海上平台的接地电阻进行确定：

- 1) 计算电网内总电容电流值 $\sum I_C$ 。
- 2) 额定发热电流平均分配，其范围由下式确定

$$I_N^* = \frac{(2 \sim 3) \sum I_C}{n} \quad (4)$$

式中， I_N^* 为额定发热电流范围，A； $\sum I_C$ 为系统容性电流，A； n 为海上平台个数即接地电阻个数。

- 3) 选型确定额定发热电流 I_N ，由式(3)计算接地电阻阻值。该电阻值为初选电阻值。

- 4) 接地电阻校验。多点接地系统需要校验满足两种情况：全部联网时单相接地故障电流小于1 000 A；解列运行时每一平台电网的单相接地故障电流小于1 000 A。若校验不合格则需要对各发电厂的阻值做适当调整。

2. 中性多点接地电阻配置

以含有三座发电厂的海上平台供电系统为例进行简单说明，电网结构如图2所示。

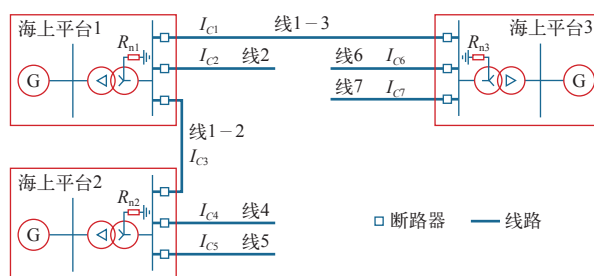


图2 含三座发电厂的海上平台供电系统

三座发电厂分别位于海上平台1、海上平台2和海上平台3上，平台间通过海缆1-2和1-3连接在一起，系统总电容电流为

$$\sum I_C = \sum_{i=1}^7 I_{Ci} \quad (5)$$

式中， I_{Ci} 为第*i*条海缆线路的电容电流，A，其中*i*=1,2,...,7。

接地电阻的额定发热电流范围均为

$$I_N^* = \frac{(2 \sim 3) \sum I_C}{3} \quad (6)$$

根据行业标准选择合适的额定发热电流 I_N ，然后由式(3)计算出电阻阻值。

校验时需要保证电网全部连接时任一处发生单相接地故障时的故障电流小于1 000 A，同时需要保证在线路1-2和1-3分别断开或同时断开时，解列后的各部分电网中任一处发生单相接地故障时的故障电流小于1 000 A。

若校验不合格，需要重新进行电阻选型。对于多发电厂的复杂网络，重新选型的方法与单电源网络相同。

一般地，只要供电系统的总容性电流 $\sum I_C$ 小于1 000 A，都可以找到满足校验条件的接地电阻值。一般情况下，35 kV配电系统容性电流约400 A^[10]，因此，采用此配置方法是可行的。

实例分析

利用本文提出的电流均分法为某35 kV电压等级的海上平台供电系统配置小电阻接地方式，并在ETAP中建模用以仿真计算单相接地故障下的故障电流水平，方便校验。

某海上平台电力系统网络结构如图3所示。

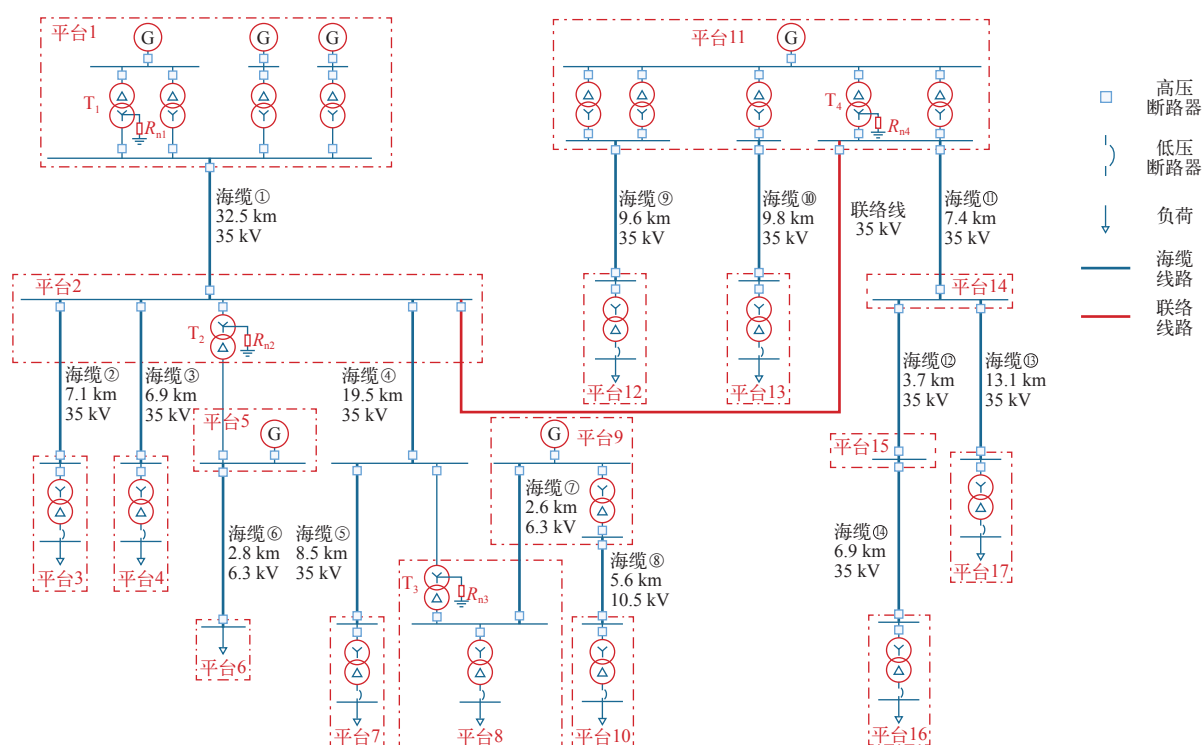


图3 某海上平台供电系统图

1. 接地电阻位置

海上平台供电系统共17座平台，其中4座发电站平台（平台1、平台5、平台9和平台11），13座负荷平台，各平台之间通过海缆连接。

由上述提到的方法，应为4座发电厂各配置一台中性点经电阻接地的变压器，经电网结构分析，确定图3中的变压器 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 为中性点经电阻接地的变压器。

2. 接地电阻选型

经计算，系统总电容电流 $\sum I_C = 319.096 \text{ A}$ 。

额定发热电流范围为： $I_N^* = \frac{(2 \sim 3) \sum I_C}{4} = 159.548 \sim 239.322 \text{ A}$ 。

选择电阻器的额定发热电流为： $I_N = 200 \text{ A}$ 。

对应的电阻阻值为： $R_n = \frac{U_\phi}{I_N} = \frac{\frac{35000}{\sqrt{3}}}{200} = 101 \Omega$ 。

3. 校验

由于电网结构复杂，出现最大单相接地故障电流的位置难以确定，若是随意选择故障位置计算零序电流比较大小是很费时的，因此选用ETAP软件

进行仿真对比，确定最大单相接地故障电流。

(1) 理论计算与仿真结果对比

在ETAP仿真模型中做相应设置，进行单相接地故障仿真。

为保证校验的准确性，对线路1中点发生单相接地故障的理论计算与仿真结果作对比。

线路1中点发生单相接地故障时，零序网络如图4所示。

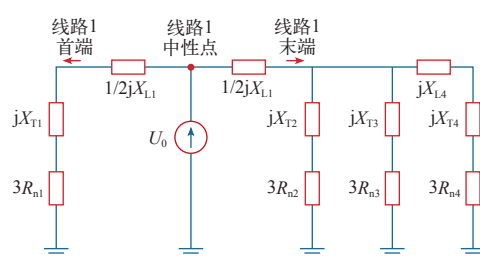


图4 零序网络

图4中， $R_{n1} \sim R_{n4}$ 为4个接地电阻， $X_{T1} \sim X_{T4}$ 为4台中性点经电阻接地的变压器零序电抗， X_{L1} 和 X_{L4} 对应线路1和线路4的零序电抗，线路零序电阻很小，忽略不计。以上各值均已知，零序电压取系统相电压： $U_0 = \frac{35000}{\sqrt{3}} \text{ V}$ 。

线路1首端零序电流为

$$3I_{(1)0} = \left| \frac{U_0}{3R_{n1} + jX_{T1} + j\frac{1}{2}X_{L1}} \right| = 196.33 \text{ A} \quad (7)$$

线路1末端零序电流为

$$3I_{(2)0}^* = \left| \frac{U_0}{j\frac{1}{2}X_{L1} + Z_{\Sigma}} \right| = 543.91 \text{ A} \quad (8)$$

式中, $\frac{1}{Z_{\Sigma}} = \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4}$; $Z_2 = 3R_{n2} + jX_{T2}$; $Z_3 = 3R_{n3} + jX_{T3}$; $Z_4 = 3R_{n4} + jX_{T4} + jX_{L4}$ 。

由于电缆线路电容电流较大, 线路4会为线路1末端提供容性电流, 大小约为 $3I'_{(2)0} = 3\omega C_{4.0}U_0 = 59.42 \text{ A}$ 。因此, 线路1末端的零序电流应为

$$3I_{(2)0} = 3I'_{(2)0} + 3I_{(2)0}^* = 603.33 \text{ A} \quad (9)$$

ETAP仿真得到线路1首末端的零序电流分别为 208 A、616 A。

两种结果及误差对比如表1所示。

表1 两种结果对比

位置	线路1首端	线路1末端
计算结果/A	196.33	603.33
仿真结果/A	208	616
误差 (%)	5.6	2.1

由表1可知, 仿真结果与计算结果相差不大, 且略大于计算结果, 其产生原因是仿真值考虑系统内杂散电容效应, 但不影响最终校验。

(2) 校验结果

仿真得到多点接地方式下全部联网及解列情况下的单相接地最大故障电流如表2所示。

表2 不同情况下的单相接地最大故障电流

运行情况	全联网	N-1运行	N-2运行	N-3运行
最大故障电流/A	859	653	434	227

表2中, N-1运行指各发电站平台之间的联络线断开1条, N-2运行指断开两条, 依次类推。由表2可知, 在各运行条件下, 故障电流均小于1 000 A, 满足校验条件。

通常情况下, 当电网全部连接的情况下满足校验条件时, 解列运行时的各部分电网也会满足校验条件。原因是单相接地故障时的对地故障电

流基本上来自故障时流经各电阻的电流值之和, 当多个接地电阻时的电流值之和小于1 000 A时, 解列运行时的接地电阻数目减少, 从而电流值减小, 也会小于1 000 A。

结束语

随着海上平台供电系统或城市供电系统容量扩大以及电缆线路的普遍使用, 中性点经小电阻接地的方式将得到广泛应用。本文提出的中性点小电阻多点接地均分容性电流配置法, 从接地电阻的位置、数量到选型和校验, 给出选择依据及定量计算标准。该方法可用于中性点单点接地与多点接地系统接地电阻的设计, 也适用于环网结构供电系统中性点小电阻接地设计。

参考文献

- [1] 尹克宁. 电力工程 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 59-63.
- [2] 余祖红, 李淳. 关于中性点接地方式的特点分析 [J]. 河南科技, 2013 (11): 24.
- [3] 干耀生, 唐庆华, 方琼, 等. 城市中压配电网中性点小电阻接地方式分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25 (3): 138-141.
- [4] 贺伟, 李鹏. 变电站主变压器35 kV系统接地改造分析 [J]. 内蒙古电力技术, 2011, 29 (3): 52-53.
- [5] 黄晓巍. 变压器中性点接地方式分析与探讨 [J]. 硅谷, 2010 (13): 88.
- [6] 于立涛. 35 kV配电网中性点经小电阻接地的改造方案分析 [J]. 继电器, 2004, 32 (16): 57-59.
- [7] DL/T 780—2001 配电系统中性点接地电阻器 [S].
- [8] 董进成. 变电站35 kV中性点经小电阻接地的成功应用 [J]. 冶金动力, 2010 (7): 16-17.
- [9] 杨俊, 许加柱, 车红卫, 等. 小电阻接地系统的方案设计及应用 [J]. 冶金动力, 2012, 27 (2): 81-85.
- [10] 赵云珍. 钢铁企业6~10 kV配电系统单相接地保护整定值的计算 [J]. 冶金自动化, 2012 (增刊1): 331-333.

(收稿日期: 2015-03-10) **EA**