海上平台供电系统接地方式改变对保护的影响及对策研究

变压器中性点由经消弧线圈接地变为经小电阻接地，电网零序网络参数发生改变。当系统发生单相接地故障时，零序电流及各相短路电流发生很大变化，对系统原有保护特别是零序保护造成影响。针对某海上石油平台供电系统接地方式变化后的单相接地故障进行仿真，分析零序电流的大小及分布，校验其对原有保护的影响。结合继电保护原理，针对不能满足继电保护要求的保护，重新整定或增设新的保护，同时进行保护优化。

李卫团[1] 姚玉洁[2] 鲁丰坤[3] 康忠健[2]/1.中海石油有限公司湛江分公司
2.中国石油大学（华东）电气工程系 3.湛江南海西部油田勘察设计有限公司

李卫团/工程师

关键词/Keywords
变压器中性点·
小电阻接地·
单相接地故障·
零序电流·

0 引言

随着海上石油平台系统不断联网，电网规模不断扩大，供电系统变电站数量及容量也在不断增加。在以电缆线路为主供电的配电网中，当中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时，非故障相电压提高$\sqrt{3}$倍，易造成绝缘击穿或相间短路。消弧线圈接地配电网在运行方式变化时，存在着消弧线圈调整困难、易造成谐振过电压、寻找故障线路时间长以及不能及时切断故障的缺点。中性点经小电阻接地方式能有效降低系统内部过电压，同时在发生单相接地故障时能快速启动零序保护并切除故障，因而海上石油平台系统采用中性点经小电阻接地方式[1-2]。

变压器中性点接地方式的改变对系统保护（特别是零序电流保护）有很大影响，变压器由经消弧线圈接地变为经小电阻接地，零序网络参数发生变化。当发生单相接地故障时，流过故障线路的零序电流及各相短路电流增大，对原有保护产生影响。短路电流增大，既可以提高故障元件的保护灵敏度，也可能使非故障元件处的电流超过其保护定值，造成保护误动作。因此，分析中性点接地方式改变对保护的影响是非常有必要的。

本文依托于某海上石油平台供电系统，在中性点由经消弧线圈接地变为经小电阻接地后，研究35 kV海缆、变压器发生单相接地故障时，零序电流对原有保护的影响及对策。

1 电网改造对零序电流大小及分布的影响

电网改造前，系统一部分变压器经消弧线圈接地；另一部分变压器经小电阻接地。且两部分电网之间有一隔离变压器，网络拓扑结构如图1所示。

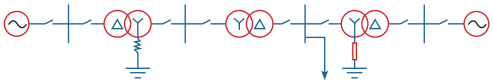

图1 中性点经消弧线圈接地网络拓扑结构

改造后，系统中接地变压器全部变为经小电阻接地，且除去隔离变压器，两条母线直接连接，网络拓扑结构如图2所示。

图2 中性点经小电阻接地网络拓扑结构

教育部中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(14CX05039A)，国家自然科学基金资助项目(61271001)。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

零序电流的分布主要取决于线路零序阻抗和中性点接地变压器的零序阻抗，与电源的数目和位置无关[3]。当发生单相接地故障时，零序电流只能在与故障点有直接电气联系的线路、接地变压器及其接地阻抗之间流通。

1.1 中性点经消弧线圈接地零序电流的大小及分布

变压器中性点经消弧线圈接地零序电流分布如图3所示。

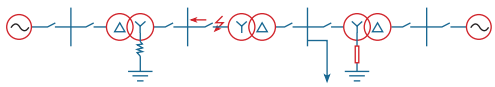

图3　中性点经消弧线圈接地零序电流分布

由于隔离变压器的存在，零序电流在右侧网络中不能流通，而正、负序电流仍能流通，利用对称分向量法将电流和电压分解为正序、负序和零序分量，并用复合序网图表示它们之间的关系[4]。根据单相接地的复合序网图，故障点处零序电流为

$$3\boldsymbol{I}_0=\frac{3\boldsymbol{U}_{f0}}{\mathrm{j}(X_0+X_1+X_2)} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{U}_{f0}$为故障点故障前电压；X_0、X_1和X_2分别为从故障点看入的系统等效零、正和负序电抗。

1.2 中性点经小电阻接地零序电流的大小及分布

变压器中性点经小电阻接地零序电流分布如图4所示。

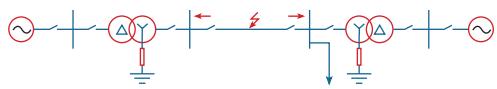

图4　中性点经小电阻接地零序电流分布

电网改造后，零序电流可以在系统右侧网络中流通，X_0、X_1和X_2均变小，左侧和右侧网络中零序电流幅值均增大，根据式（2）可得

$$\begin{cases}\boldsymbol{I}_A=\boldsymbol{I}_1+\boldsymbol{I}_2+\boldsymbol{I}_0\\ \boldsymbol{I}_a=\boldsymbol{I}_1'+\boldsymbol{I}_2'+\boldsymbol{I}_0'\end{cases} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{I}_A$、$\boldsymbol{I}_a$分别为被保护元件两侧A相电流；$\boldsymbol{I}_1$、$\boldsymbol{I}_2$、$\boldsymbol{I}_0$和$\boldsymbol{I}'_1$、$\boldsymbol{I}'_2$、$\boldsymbol{I}'_0$分别为两侧正、负和零序电流。

零序电流的增大，使相短路电流相应增大，同时可能使系统零序电流保护和其他保护误动作[5]。

2 电网改造对保护的影响及对策

2.1 电网改造对保护的影响

电网改造前，变压器配置的保护有差动保护、瞬时差动保护、过电流保护、方向过电流保护和高压侧零序电压保护。海缆配置的保护有差动保护、距离保护、方向过电流保护和零序电流保护。电网改造后，发生单相接地故障时，零序电流发生变化，可能影响短路电流，从而影响变压器、海缆的上述保护。

2.1.1 对变压器保护的影响

（1）对差动保护的影响

差动保护动作原理如下

$$\left|\boldsymbol{I}_A+\frac{\boldsymbol{I}_a}{k}\right|\geqslant\frac{1}{2}\left|\boldsymbol{I}_A-\frac{\boldsymbol{I}_a}{k}\right| \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{I}_A$、$\boldsymbol{I}_a$分别为变压器Y、D形侧A相电流，以母线指向线路为电流正方向；k为变压器电流比。

$$\begin{cases}\boldsymbol{I}_1=-\dfrac{\boldsymbol{I}_1'}{k}\\ \boldsymbol{I}_2=-\dfrac{\boldsymbol{I}_2'}{k}\\ \boldsymbol{I}_0'=0\end{cases} \tag{4}$$

接地方式改变后，当发生单相接地故障时，$\boldsymbol{I}_0$增加，$\boldsymbol{I}'_0$为0，由式（2）～式（4）可知，差动电流、制动电流均增大，对原有差动保护产生影响，具体影响需根据实际现场数据具体分析。

（2）对过电流保护的影响

当发生单相接地故障时，由式（2）可知，故障电流增大，可以提高故障元件过电流保护灵敏度，但非故障元件处的电流可能超过其保护定值，由于电网采用多电源供电，依靠时间配合继电保护很难正确动作，从而造成保护误动作，不符合继电保护要求。

（3）对高压侧零序电压保护的影响

变压器零序电压保护是在中性点电压升高时保护变压器，避免绝缘结构破坏而损坏变压器[6]。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

电网改造后，当线路发生单相接地故障时，由式（5）可知

$$\boldsymbol{U}_0=\boldsymbol{U}_{f0}-\boldsymbol{I}_0X_L \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{U}_0$为变压器高压侧零序电压；X_L为从故障点到变压器的等效零序阻抗。

零序电流增大，变压器高压侧零序电压减小，对原有高压侧零序电压保护定值产生影响。

2.1.2 对海缆保护的影响

（1）对差动保护的影响

海缆的差动保护由式（6）可知

$$\left|\boldsymbol{I}_A+\boldsymbol{I}_a\right|\geqslant\frac{1}{2}\left|\boldsymbol{I}_A-\boldsymbol{I}_a\right| \tag{6}$$

对故障海缆而言，差动电流增大，提高了保护灵敏度；对非故障海缆而言，差动电流仍为0，因而零序电流的改变对海缆差动保护的影响不大。

（2）对距离保护的影响

测量阻抗依据式（7）计算，即

$$Z_m=\frac{\boldsymbol{U}_m}{\boldsymbol{I}_m+3K\boldsymbol{I}_0} \tag{7}$$

式中，Z_m为测量阻抗；$\boldsymbol{U}_m$为测量电压；$\boldsymbol{I}_m$为测量电流；$\boldsymbol{I}_0$为零序电流；K_B为零序补偿系数。

当满足方向阻抗继电器绝对值比较动作方程式（8）时，距离保护动作，即

$$\left|Z_m-\frac{1}{2}Z_{set}\right|\leqslant\left|\frac{1}{2}Z_{set}\right| \tag{8}$$

式中，Z_{set}为海缆距离保护的整定阻抗。

电网改造后，当海缆发生单相接地故障时，由式（9）可知

$$\boldsymbol{U}_m=\boldsymbol{I}X \tag{9}$$

式中，$\boldsymbol{I}$为故障电流；X为从故障点到保护安装处的等效阻抗。

故障电流、故障电压和零序电流均增大，测量阻抗幅值、相角相应变化，影响故障线路的距离保护灵敏度。同时，其他非故障线路的测量阻抗发生变化，对其距离保护造成影响。

（3）对方向过电流保护的影响

电网改造后，当发生单相接地故障时，故障电流增大，可以提高故障元件方向过电流保护灵敏度。但非故障元件处的电流可能超过其保护定值，造成保护误动作。如在变压器Y形侧发生单相接地故障时，其相邻海缆处电流可能超过其方向过电流保护定值。若动作时间小于变压器过电流保护，则会发生保护误动作。

（4）对零序电流保护的影响

中性点变为经小电阻接地后，海缆处发生单相接地故障时，故障处零序电流增大，可提高零序保护的灵敏度，但非故障元件处的零序电流可能超过其保护定值，造成保护误动作。

除去隔离变压器，零序电流可在另一侧网络中流通，对另一侧网络中元件的零序电流保护造成影响。

电网采用多点接地，对于两端都有接地变压器的海缆，若单相接地故障发生在海缆内部，则两端零序电流保护都要动作；若故障发生在海缆外部，由于原有零序电流保护只考虑了零序电流大小而未考虑其方向，则非故障海缆两端处的零序电流可能超过其零序电流保护定值，两端保护都要发生动作，显然不能满足继电保护要求。

当一端为接地变压器、另一端为负荷的海缆发生单相接地故障时，故障海缆的零序保护动作可以满足继电保护要求。

2.2 电网改造后保护改进对策

电网改造后，差动保护仍为电力元件的主保护。正常情况下，当发生单相接地故障时，故障元件的差动保护瞬时动作切除故障，满足继电保护选择性、速动性要求，距离保护、过电流保护等作为后备保护，在故障发生时动作，切除故障后返回，使电力系统无故障部分能够继续安全运行。但在故障时，若差动保护拒动作，非故障元件的后备保护可能先于故障元件的保护动作，造成保护误动作。

为解决这一问题，针对两端有接地变压器的海缆，将零序过电流保护变为零序差动保护，对接地变压器增设零序方向电流保护作为后备保护，其整定依据如下。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（1）变压器零序方向电流保护

其整定依据[7-10]如下

$$I_{set}=0.25I_N \tag{10}$$

式中，I_{set}为变压器零序方向电流保护动作电流；I_N为变压器高压侧额定电流。

保护装置动作时限为0.5 s。

（2）海缆零序差动保护

其整定依据如下

$$\begin{cases} I_{op}\geqslant I_{res} \\ I_{op}\geqslant I_c \\ I_{res}=K\left|\boldsymbol{I}_{m0}-\boldsymbol{I}_{n0}\right| \end{cases} \tag{11}$$

式中，I_{op}为海缆零序差动动作电流；I_{res}为制动电流；I_c为动作门槛值，取0.1I_N；K_I为制动系数，取0.5；$\boldsymbol{I}_{m0}$、$\boldsymbol{I}_{n0}$分别为海缆两侧3倍零序电流。

保护装置动作时限为0.1 s。

3　实例计算

根据某海上石油平台电力系统改造后各电气设备的参数，在ETAP中搭建仿真模型，电网网络拓扑结构如图5所示。分别在两端都有接地变压器的海缆、单端有接地变压器的海缆和接地变压器处设置单相接地故障并进行分析，以海缆①处单相接地故障为例，进行分析计算。

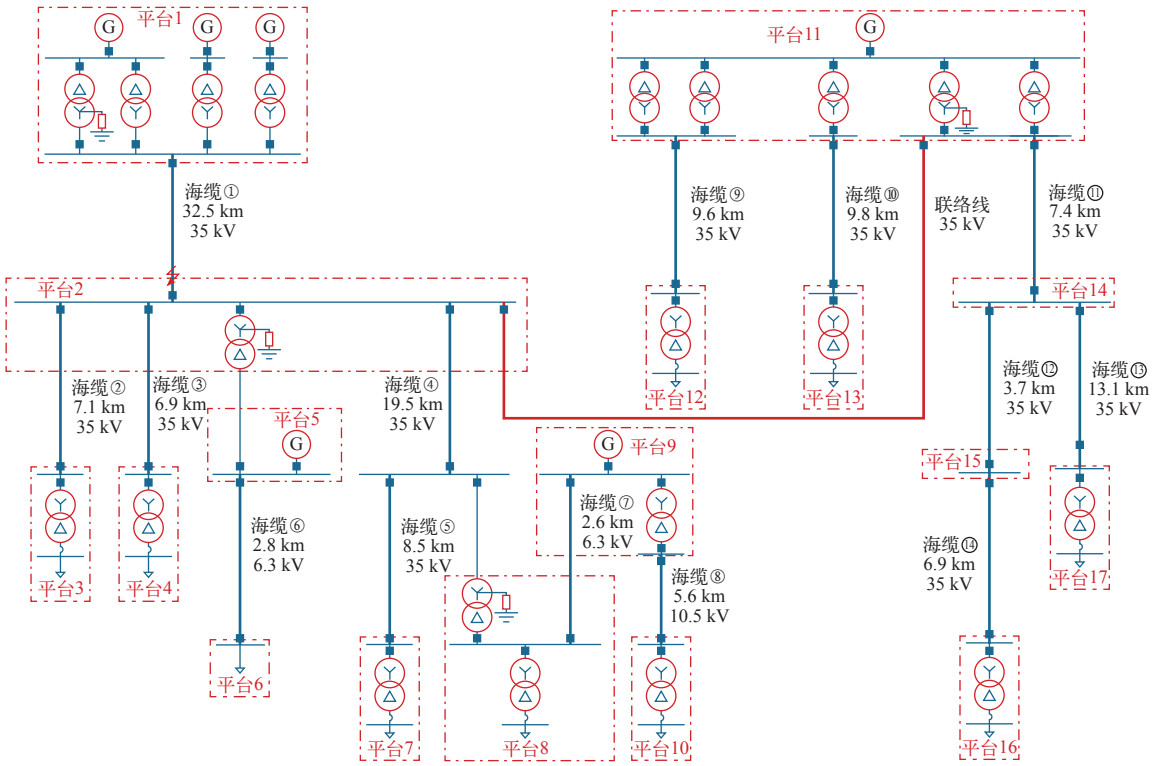

图5　海缆①末单相接地故障拓扑结构

分析结果如表1所示。

将故障电流与原有保护定值对比分析可得：

1）差动保护作为主保护，在故障发生时能瞬时跳闸，使故障元件免于继续遭到破坏，保证其他无故障部分迅速恢复正常运行。

2）在两端都有接地变压器的海缆处发生单相接地故障、差动保护拒动作时，非故障元件的零序电流保护将先于故障海缆的零序电流保护、方向过电流保护和距离保护动作，造成保护误动作。

3）在只是单端有接地变压器的海缆处发生单相接地故障时，故障海缆的零序电流保护、方向过电流保护和距离保护将发生动作并切除故障，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 海缆①末单相接地故障保护结果

故障位置	设备	保护类型		整定值	计算值	动作时间/s	动作方式
海缆①末	海缆①	差动保护	A相	480 A	789 A	0	跳两侧
	海缆④	零序电流保护	平台8侧I段	31.04 A	53 A	1	跳平台8侧
			平台2侧	32 A	53 A	1	跳平台2侧
	海缆①	零序电流保护	平台2侧	17.28 A	381 A	2	跳平台2侧
		方向过电流保护	平台2侧	328 A	355 A	2	跳平台2侧
		距离保护	平台2侧	7.73 Ω 74′	0	2	跳平台2侧
	海缆④	距离保护	平台8侧	6.18 Ω 70′	4.86 Ω 37.1′	2.6	跳平台8侧
	海缆①	零序电流保护	平台1侧I段	90 A	409 A	3	跳平台1侧
	WZIT－Tr1/Tr6/Tr7/Tr8变压器	高压侧零序电压保护		9.625 kV	18.86 kV	10	报警
	WZ12－1PAP－Tr1变压器	高压侧零序电压保护		9.625 kV	19.72 kV	10	报警
	WZ11－1N－Tr1变压器	高压侧零序电压保护		9.625 kV	19.63 kV	10	报警

电网改造对其保护影响不大。

4）在接地变压器处发生单相接地故障、变压器差动保护拒动作时，非故障元件的零序电流保护、方向过电流保护和距离保护将先于故障变压器的过电流保护动作，造成保护误动作。

由上述分析可知，在主保护差动保护拒动作时，才会发生保护误动作。将两端有接地变压器海缆的零序过电流保护变为零序差动保护，接地变压器增设零序方向电流保护后，保护分析结果如表2所示。

表2 海缆①末单相接地故障新增保护结果

故障位置	设备	保护类型	整定值/A	动作时间/s	计算值/A	动作方式
海缆①末	海缆①	零序差动保护	35.8	0.1	789.2	跳两侧
	海缆④	零序差动保护	28.9	0.1	0	
	联络线	零序差动保护	23.5	0.1	0	
	海缆⑪	零序差动保护	35.8	0.1	0	
	海缆⑫	零序差动保护	21.8	0.1	0	
	海缆⑬	零序差动保护	28.9	0.1	0	
	海缆⑭	零序差动保护	21.8	0.1	0	
	WZIT－Tr1变压器	零序方向电流保护	51.1	0.5		
	WZ12－1PAP－Tr1变压器	零序方向电流保护	51.1	0.5		
	WZ11－1N－Tr1变压器	零序方向电流保护	51.1	0.5		
	WZ12－1PUQB－Tr1变压器	零序方向电流保护	51.1	0.5		

将故障保护与新增保护对比分析可得：

1）在两端都有接地变压器的海缆处发生单相接地故障、差动保护拒动作时，故障海缆的零序差动保护优先动作，满足继电保护选择性、速动性要求。

2）在接地变压器处发生单相接地故障、变压器差动保护拒动作时，故障变压器的零序方向电流保护优先动作，满足继电保护要求。

4 结束语

由于海上平台电网规模不断扩大，越来越多的以海缆为馈线的系统中性点改为经小电阻接地，研究电网改造对保护的影响具有重要意义。本文研究变压器中性点由经消弧线圈接地变为经小电阻接地且消除隔离变压器后，发生单相接地故障对变压器、海缆与零序电流相关的一系列保

(下转第49页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

灭火系统，误动原因及联动控制方案存在的问题进行分析，提出主变压器泡沫喷淋系统防误动改进方案，并进行多方案分析比较，最终推荐通过在电气回路末端电磁阀和电动阀的起动回路串入主变压器三侧开关位置信号作为闭锁条件的控制方案，有效地解决了主变压器自动灭火系统在自动模式下误动作的问题，目前该方案试点运行效果良好，具有较高推广应用价值。

通过增加闭锁的方式有效控制了主变压器消防系统的误动，但若要从根源上解决主变压器消防系统误动问题，需要提高主变压器消防系统的抗干扰能力，建议后期考虑将主变压器消防系统电源电压提高至同变电站直流电源系统，从而提高整个系统的抗电磁干扰能力。

参考文献

[1] GA 834—2009 泡沫喷雾灭火装置 [S]. 北京：中国标准出版社，2009.

[2] 张晓镭. 山西地区220 kV户外变电站主变消防系统的比选 [J]. 山西建筑，2015，2 (6)：114-115.

[3] 傅胜兰，黄建伟，林洁. 油浸电力变压器消防系统设计技术研究 [J]. 防科学与技术，2010，29 (12)：1089-1091.

[4] 李清泉，李彦明，牛亚明. 变电站开关操作引起的瞬间电磁场及其防护 [J]. 高电压技术，2001，8 (4)：65-67.

[5] 龚学海，何金良. 变电站工频短路时的电磁环境分析 [J]. 高电压技术，2009，35 (4)：855-860.

[6] GB 50116—2013 火灾自动报警系统设计规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2013.

（收稿日期：2016－03－02）EA

(上接第20页)

护产生影响。将海缆的零序过电流保护变为零序差动保护，接地变压器增设零序方向电流保护后则可解决保护误动作问题。本文所提出的继电保护改进方法适用于其他中性点小电阻多点接地配电网系统的保护配置和整定。

参考文献

[1] 王澜. 石化系统中性点经小电阻接地系统接地保护方案探讨 [J]. 电气应用，2010 (18)：28-31.

[2] 夏天. 小电阻接地系统继电保护的研究和整定计算 [D]. 北京：清华大学，2005.

[3] 贺家李，李永丽，董新洲，等. 电力系统继电保护原理 [M]. 4版. 北京：中国电力出版社，2010.

[4] 陈怡，蒋平，万秋兰，等. 电力系统分析 [M]. 北京：中国电力出版社，2005.

[5] 曾国，何晓章，孙珊，等. 110 kV电阻接地配电网的接地保护研究 [J]. 电气制造，2013 (3).

[6] 张宇东. 中性点不接地变压器零序电压保护整定 [J]. 广东输电与变电技术，2005 (6)：45-46.

[7] 中国华电集团公司电气及热控技术研究中心. 电力主设备继电保护的理论实践及运行案例 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2009.

[8] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电手册 [M]. 3版. 北京：中国电力出版社，1999.

[9] 王维俭. 电力主设备继电保护原理及应用 [M]. 2版. 北京：中国电力出版社，2002.

[10] 陈根永. 电力系统继电保护整定计算原理与算例 [M]. 北京：化学工业出版社，2013.

（收稿日期：2015－12－20）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net