从一起10 kV高压电动机短路事故谈石化企业继电保护管理

通过对某石化企业一起10 kV高压电动机短路事故造成继电保护越级跳闸的分析，找出了造成越级跳闸的根本原因，并提出了整改措施及应从中吸取的教训，为类似供电系统提供了管理和运行经验。

郭文武/中海石油舟山石化有限公司

郭文武/工程师

关键词/Keywords
高压电动机·
短路停电·
继电保护管理·

0　引言

某石化企业10 kV主电源由地方供电局设置在该企业附近的35 kV北海变电所提供，如图1所示，北海变电所内设有两台容量为25 MV·A、电压比为35/10 kV的变压器。企业供电系统配有一台15 MW自备发电机组、一座10 kV总配电室和7座10 kV用户配电室以及14座0.4 kV低配电室，总用电负荷为33 MW，系统接线方式均为单母分段。

正常运行方式为北海变电所35 kV母线并列运行，Ⅰ段进线开关3001合闸、母分开关3100合闸、Ⅱ段进线开关3002分闸备用，10 kV母线分列运行；企业化工装置区域10 kV系统和0.4 kV系统均为分列运行，母分开关热备用，备用电源自动投入装置投入；自备电站10 kV主母线并列运行，主母Ⅰ段进线开关411合闸、母分开关1001合闸及Ⅱ段进线开关410分闸备用，厂用10 kV和0.4 kV系统分列运行，一台15 MW发电机并在10 kV主母线Ⅰ段上。

1　事故过程介绍

2009年5月9日凌晨5：00时，电气控制室事故喇叭报警，10 kV总配电室两条

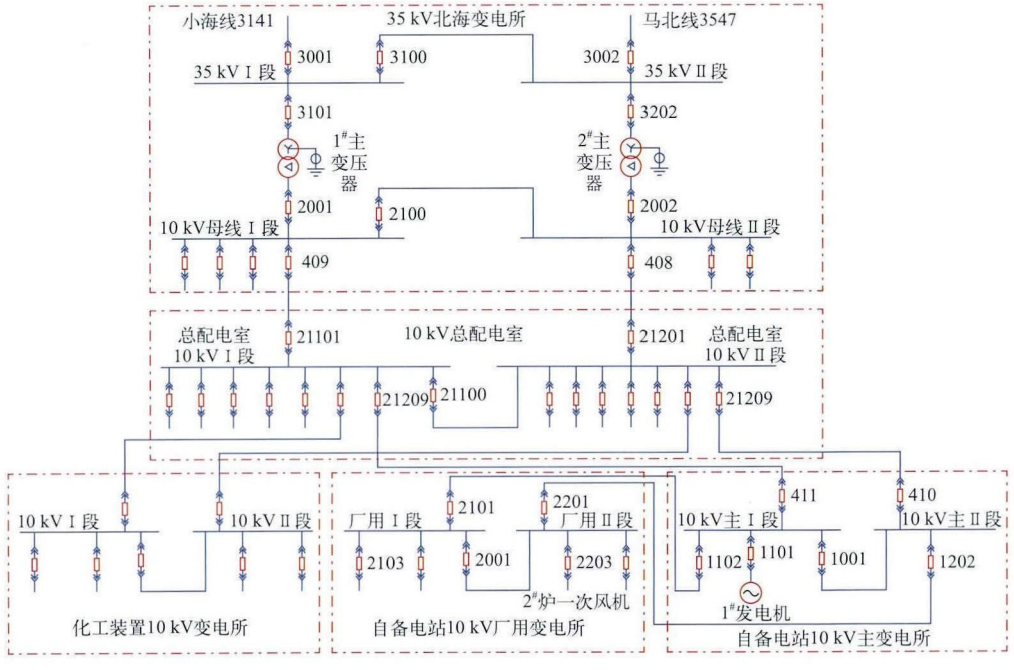


图1　供电系统一次接线示意图

进线同时失电，锅炉熄火，发电机停机，全厂停电。

经查发现自备电站2#炉一次风机10 kV高压电动机定子绕组引出线发生三相短路。接着对供电系统开关跳闸情况和继电保护装置动作情况、报警信息进行核查，发现35 kV北海变电所Ⅰ段进线开关3001继电保护装置过电流Ⅱ段动作、开关跳闸。进一步对企业10 kV系统进行检查，发现自备电站厂用10 kVⅡ段进线开关2201继电保护装置过电流Ⅰ段动作、开关跳闸，检查2#炉一次风机继电保护装置未动作，系统其他继电保护装置无动作信息。

2 事故原因分析

2.1 事故原因

1）自备电站2#炉一次风机电动机引出线三相短路是导致事故发生的直接原因。

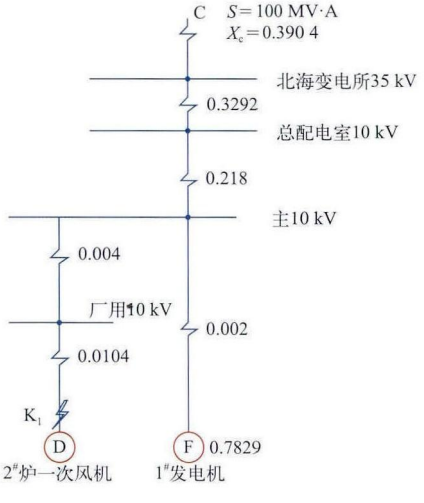
2）2#炉一次风机电源开关2203保护拒动，致使35 kV线路侧继电保护越级跳闸是导致全厂停电的主要原因。

2.2 继电保护分析

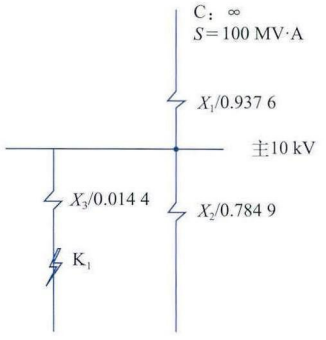
2.2.1 短路电流

根据图1的接线方式计算线路电抗标幺值，并绘制等效电路图[1]，如图2所示。

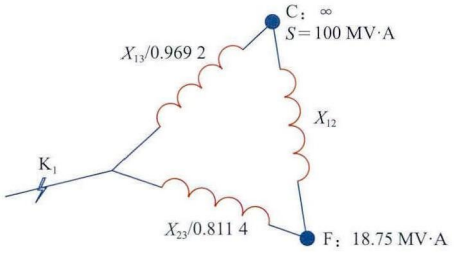
根据图2c转移电抗值计算短路电流。



(a) 等效电路图



(b) 简化电抗图



(c) 转移电抗图

图2 系统电抗标幺值等效电路图

(1) 系统C输入K_1点短路电流

1）短路电流标幺值

$$I_{C*}=\frac{1}{X_{13}}=\frac{1}{0.969\,2}=1.032 \quad (1)$$

2）短路电流有名值

$$I''_C=I_{C*}\times\frac{100}{\sqrt{3}\times10.5}=(1.032\times5.499)\text{kA}=5.675\text{ kA} \quad (2)$$

(2) 发电机F输入K_1点短路电流

1）求计算电抗

$$X_{js}=X_{23}\times\frac{S_N}{S_B}=0.811\,4\times\frac{18.75}{100}=0.152 \quad (3)$$

2）查汽轮发电机运行曲线，0 s时短路电流标幺值为$I''_{F1}=7.145$。

3）短路电流有名值为$I''_{F1}=(7.145\times18.75/\sqrt{3}\times10.5)$ kA$=7.366$ kA。

(3) 流入K_1点总短路电流

$$I''_{K1}=I''_C+I''_F=(5.675+7.366)\text{ kA}=13.04\text{ kA}$$

根据短路电流计算结果，列表进行综合比对。K_1点短路时，流过各支路开关的次暂态电流值、继电保护定值和继电保护动作情况进行比对，如表1所示。

表1　K_1点短路时流过各支路开关的次暂态电流值

设备名称	K_1点三相短路时，流过各线路开关次暂态电流值/kA	保护定值	保护动作情况
35 kV北海变电所进线开关3001	1.62	过电流Ⅰ段2.29 kA/0 s 过电流Ⅱ段848 A/0.9 s	保护装置过流Ⅱ段动作，跳开3001开关
总配电气Ⅰ段出线21109开关（向热电站Ⅰ段供电）	5.675	方向过电流（流向线路） 1.45 kA/0.6 s	保护装置起动，0.3 s后返回，开关未跳闸
自备电站10 kV主母线Ⅰ段电源进线411开关	5.675	方向过电流（流向线路） 1.3 kA/2.1 s	方向流向母线，保护未动作
厂用10 kVⅡ段电源进线2201开关	13.04	过电流Ⅰ段2 120 A/0.3 s 过电流Ⅱ段1 408 A/0.6 s	过电流Ⅰ段动作，跳开2201开关
2#炉一次风机2203开关	13.04	速断596 A/0.1 s 过电流280 A/0.3 s 零序0.3 A/9 s 低电压7 kV/9 s	保护拒动

2.2.2　K_1点短路时，继电保护装置动作情况分析

（1）2#炉一次风机2203开关保护拒动原因分析

事故后对此套继电保护装置进行了相关试验，用试验设备在二次回路加注保护定值电流后继电保护装置均正确动作，证明继电保护装置本身及其二次控制回路不存在故障或缺陷，分析认为保护拒动的原因是TA饱和造成，于是对TA进行了伏安特性试验，以了解TA的饱和特性，试验数据如表2所示，伏安特性曲线如图3和图4所示。

表2　2#炉一次风机保护用TA伏安特性试验数据表

电流/A	A相电压/V	C相电压/V
0.1	29.7	30.9
0.3	40	41.9
0.5	43	44.8
1	45.5	47.1
1.5	46.5	48.1
2	47.2	48.8
3	47.9	49.7
4	48.3	50.2
5	48.7	50.6
6	48.9	50.9
10	49.7	51.8
15	50.7	52.8

1)2#炉一次风机TA参数：电流比为200/5，保护TA的准确等级为10P10。从表2可以看出，TA的A相比C相的饱和特性稍微差一点，A相在3 A、电压47.9 V时开始出现饱和，饱和电流为额定电流的

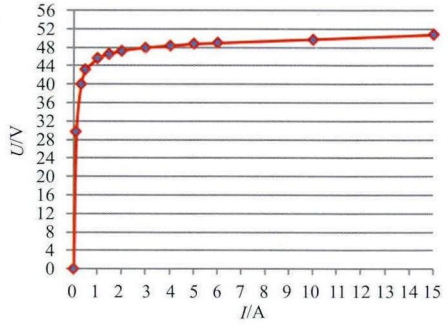


图3　A相伏安特性曲线

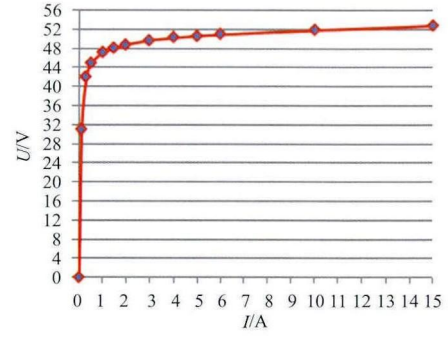


图4　C相伏安特性曲线

9.58倍，折算到一次电流为(9.58 × 5 × 200/5) A = 1 916 A，即当故障电流达到1 916 A时，该TA开始饱和。

2）如表1所示，“5.9”事故发生时，电动机短路电流达到了13.04 kA，为TA额定电流的65倍，由此可见该TA出现了严重饱和状态。

3）由于铁心具有磁饱和特性，是非线性组件，所以当一次电流很大时，将造成TA饱和，

特别是当一次电流中含有大量非周期分量时，使TA的铁心饱和更加严重[2]。业内做过很多电流互感器饱和试验，从这些试验情况来看，无论微机保护，还是常规保护，TA饱和均可引起保护拒动[3]。

综上分析，得出结论：2#炉一次风机2203开关保护拒动是短路事故发生时一次风机TA饱和造成的。

（2）35 kV北海变电所进线开关3001越级跳闸原因分析

1）如表1所示，事故发生时流过3001开关的电流达到了1.62 kA，而保护装置过电流Ⅱ段定值为848 A/0.9 s，保护装置将会起动。

2）事故发生时由于一次风机保护拒动，厂用10 kVⅡ段进线保护0.3 s越级跳闸，其保护过电流Ⅰ段动作切除故障，母线电压恢复，企业内部所有电动机全部再起动，电动机再起动的冲击电流可按2～4倍额定电流计算[4]。

3）企业正常运行时电动机总负荷为25 MW，10 kV侧电流达到了1 600 A以上，当电网电压恢复正常后电动机再起动，再起动电流按最低2倍计算，达到了3 200 A。折算到35 kV侧电流为914 A，而3001开关继电保护过电流Ⅱ段定值为848 A/0.9 s，可见短路电流尽管已切除，但负载电流仍然在过电流Ⅱ段定值范围内，保护装置不会返回，最终导致3001开关继电保护过电流Ⅱ段动作，开关跳闸。

3 整改措施

3.1 对2#炉一次风机存在的隐患进行整改

1）对2#炉一次风机TA二次回路进行检查，重点检查接线是否正确，彻底排除接触不良等问题。

2）测量2#炉一次风机TA保护回路负载阻抗，经测量基本满足10%误差曲线要求。

3）对2#炉一次风机TA做伏安特性试验，试验数据见表2。从试验数据来看，该TA的饱和特性不能满足电动机短路时继电保护动作的要求，必须要进行更换。更换的TA参数可根据文献[5]中公式$A \leqslant C \leqslant K$来确定：①减小$A$值（提高TA电流比）；②同时减小$A$值和提高$K$值；③提高$K$值（提高TA准确限值系数）。

提高电流比可以降低TA的饱和程度，但也会对TA二次回路和继电保护装置运行监视带来一些不利影响，所以采取了提高TA准确限值系数的方法，即将TA的准确限值系数由原来的10倍提高到20倍，更换后的TA参数为：200/5，0.5/10P20。

3.2 对10 kV配电系统继电保护进行全面检查

1）对企业10 kV系统继电保护定值重新进行核算。结合上级电网保护定值对企业供电系统的线路保护定值、动作时限进行核算，重点对保护动作时限梯级配合不合理部分进行核算调整。

2）定值核算完成后，对企业继电保护装置进行一次全面调试，确保继电保护装置及其二次回路完好。

3.3 对35 kV系统存在的隐患进行整改

1）根据“5.9”事故发生时的情况，0.9 s不能躲过电动机再起动，经过分析和相关试验，发现电动机再起动时间大约在0.6～0.9 s之间，为此将35 kV进线开关过电流Ⅱ段动作时限由0.9 s提高到1.8 s。

2）将35 kV进线开关后备保护Ⅲ段式电流保护更换为带方向过电流保护，将过电流Ⅱ段方向设置为流向线路，防止误动作发生。

3）将35 kV母线并列运行方式改为分列运行方式，以减少事故时35 kV线路侧承受的电动机再起动电流。

4 结束语

通过“5.9”10 kV高压电动机短路事故的分析，发现造成继电保护越级跳闸的原因主要是：①电动机TA容量小、饱和特性差且短路电流大造成TA饱和，保护拒动；②35 kV进线后备保护定值设置和保护选型没有考虑石化企业特点，造成了保护越级动作，扩大了停电范围。为此应从中吸取下列教训。

(下转第40页)

表1 重整6 kV分段合环前电流数据

（单位：A）

石化变电所				开关站		重整	
1#主变压器一次	201.58	1#主变压器二次	409	化新一线	319	1#主变压器二次	987
2#主变压器一次	204.87	2#主变压器二次	440	化新二线	275	2#主变压器二次	481
电流差	−3.29	电流差	−31	电流差	44	电流差	506
6 kV归算	−120.63	6 kV归算	−341	6 kV归算	484	6 kV归算	506

表2 系统阻抗数据

Z_{220}	Z_{66}	Z_L	Z_T	Z_Σ
0.082 2	−0.004 9	0.002 7	0.436	1.032

联后，依然约等于−0.004 9，所以估算中可以不考虑发电机的影响。

4 结束语

通过上文分析，合环暂态电流对速断和过电流保护的影响很小，合环时可不做考虑。但在石化变电所配出线路合环时，电业局要求必须停止线路速断保护，也要依照此要求执行。稳态电流的大小可通过推导出的式（11）估算，以此来判断是否需要停止相关保护或合上级分段，以达到减少倒闸操作风险的目的。

参考文献

[1] 葛少云，李晓明.基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算 [J]. 电力系统及其自动化学报，2007，19 (6)：124-127.

（收稿日期：2016−11−08）EA

(上接第36页)

1）TA的选型不应只考虑满足电流比精确度的要求，应考虑短路电流因素造成TA饱和的影响，安装调试时应对TA做伏安特性试验、保护回路负载阻抗试验和饱和试验，根据试验情况采取措施减小保护回路负载阻抗值、适当增大TA电流比或容量，防止TA饱和。

2）线路过电流保护应考虑电动机再起动电流因素的影响。应采取措施躲过因主保护切除短路电流后，电动机再起动造成线路过电流保护动作，致使停电范围扩大。

3）企业应了解地方电网继电保护定值情况，对直接给企业供电的外线路过电流保护定值应进行核算，不合理部分应向地方供电部门提出整改建议或要求，防止此类保护越级跳闸而造成大面积停电，给企业带来损失。

参考文献

[1] 刘卓敏，侯德明. 电力系统分析 [M]. 成都：西南交通大学出版社，2009.

[2] 覃燕凤. CT饱和特性对继电保护的影响分析 [J]. 电气开关，2013 (3)：96-99.

[3] 侯太明，黄文龙. 10 kV线路CT饱和状态分析 [C]. 长沙：第四届输配电技术国际会议，2003：766-770.

[4] 肖建. 电动机在电压波动状态下的运行分析及计算 [J]. 电气传动，2013 (增刊1)：154-157.

[5] 张吕根. CT饱和对继电保护动作的影响分析 [J]. 继电器，2003 (8)：21-25.

[6] 杨红，等. 电力系统继电保护 [M]. 成都：西南交通大学出版社，2009.

[7] 狄富清，狄晓渊. 10/0.4 kV配电设备继电保护实用技术 [M]. 北京：机械工业出版社，2014.

[8] 电力行业继电保护标准化委员会. DL/T 995—2006 继电保护和电网安全自动装置检验规程 [S]. 北京：中国电力出版社出版，2006.

（收稿日期：2016−09−12）EA