

「开关设备」

大容量高速开关在钢铁企业热电站中的应用

文/中冶华天南京工程技术有限公司 卢晓鹏

针对部分钢铁企业自备电厂的发电机组容量、台数及供电网络容量不断增大情形下，在发电机出口或并网母线等处发生三相短路故障时其短路电流水平往往超过相关断路器的额定开断能力，造成故障情形下相关断路器开断困难甚至发生爆炸等严重后果。而在发电机出口或高压厂用电母线进线回路中串联高速开关同时并联限流电抗器的方法，则既可保证电力系统在上述各种故障情形下选用较低开断水平的断路器，节省电气设备投资、减少现有相关电网改造的停电时间，又可保证自备电站正常时的经济运行。

某企业建造自备煤气发电机组的背景

某钢铁企业高炉煤气原用户主要为城市居民用户，现该类用户已改采用天然气燃料，因而该企业高炉煤气有较大富余，在无新用户的情形下，将高炉煤气直接燃烧、排放，不但浪费了大量的能源，也给大气环境造成了破坏，违反了国家节能环保产业政策要求。而利用该部分高炉煤气做为燃料建造一座企业自备热电站为最合理的解决方案，经煤气平衡计算，企业拟建一座20 MW高炉煤气发电机组（以下简称3[#]热发电机组）。

3[#]热发电机组并网后限制其提供的短路电流方案

1. 3[#]热发电机组并网企业现有电网后对系统短路电流的影响

按企业现有电力负荷分配及平衡状况，3[#]热发电机组拟并网于高速线材厂现有6 kV高配室，该高配室现经一台35/6.3 kV 31.5 MV·A主变压器与企业3[#]110 kV总降变电所50 MV·A主变压器35 kV侧联

络，该50 MV·A主变压器6 kV侧已有一台15 MW煤气发电机组（2[#]机组）并网。高速线材6 kV高配室现有各开关柜真空断路器额定开断电流为31.5 kA。一旦3[#]20 MW热发电机组并网投入后，将会使得高速线材6 kV高配室主母线及其馈出线在发生三相短路时，短路次暂态电流将达到36.29 kA，如下表所示，超过6 kV各断路器额定开断电流值，故障条件下强行开断，会发生断路器爆炸的严重后果。

3[#]热发电机组拟并网的电气主接线如图1所示。

并网3[#]热发电机组后电网相关短路点等值正序阻抗图（3[#]热发电机组出口电抗器被FSR短接）如图2所示。

由表中可看出，系统在3[#]热发电机组并网后，除d1点（高速线材6 kV高配室母线）短路电流增加较大外，其他各点（d2~d4）由于经高线35 kV主变压器及相关电力线路阻抗限流后，短路时短路电流不会有大的增加，仍在现有相应断路器的开断范围内（未再计算验证）。

表 短路电流计算表

短路点	平均电压/kV	短路电流提供点	短路电抗标么值	次暂态电流/kA	短路容量/MV·A
d1	6.3	系统	0.554 2	16.53	364
		2 [#] 发电机（2G）	2.695 3	3.4	
		3 [#] 发电机（3G）	0.56	16.36（电抗器被FSR短接）	
		合计		36.29（电抗器被FSR短接）	
		系统	0.798	6.89	
d2	10.5	2 [#] 发电机（2G）	3.881 2	1.24	193
		3 [#] 发电机（3G）	2.394	1.94	



(1) 3[#]热电机组出口串联限流电抗器的优点

(2) 3[#]热电机组出口串联限流电抗器的缺点

1) 造成较大的运行电能损耗,以6 kV 3 000 A电抗率为12%的电抗器为例,其单相有功损耗为 $P_k = 10.26 \text{ kW}$,一组电抗器(三相)一年造成的电能损耗为 $3P_k T = 3 \times 10.26 \times 7\,800 = 240\,084 \text{ kW}\cdot\text{h}$,按工业用电平均电价0.68元/kW·h 计算,电抗器年消耗电能折合人民币16.32万元,给企业造成了浪费。

4. 高速开关FSR的基本原理

如果在3rd发电机出口串联限流电抗器后在正常运行时将电抗器短接,在系统发生短路故障时又迅速将电抗器投入,以降低短路点的预期短路电流,再由故障回路断路器切断故障线路或元件后,保证系统中其他非故障线路及元件的连续运行,此举还可使得电力系统中配电装置均可选用较低等级或轻型的一次元件,节省电气设备投

资。大容量高速开关FSR就是这样一种电气设备，在部分热电站已有实际工程应用，业主反映其运行及开断均可靠。

高速开关FSR一次路由桥体FS、高压熔断器FU及过电压保护器FR组成，并配置有测控单元、专用电流互感器、脉冲变压器等监控元件。FSR并联限流电抗器XL后串接于发电机出口或发电厂高压厂用电进线或中压配电网母联等回路，正常时高速开关FSR闭合，限流电抗器XL被短接，发电机发出的电流由高速开关桥体FS承载流入电力系统。当电力系统某处发生短路时，在短路初始阶段，FSR的测控单元对流过其的短路电流瞬时值（ i_d ）及短路电流上升速率（ i_d/i_i ）进行判断，当两者均超过设定值时迅速动作，使得高速开关桥体FS经1 ms左右快速开断并同时短路电流转移至高压熔断器FU回路，在短路电流作用下经2 ms左右高压熔断器FU熔断，短路电流被转入与FSR并联的限流电抗器XL回路，使后者在极短的时间内串入一次电路中（此时流过电抗器的短路电流尚处于上升而远未达到预期短路电流的峰值，两者之比约为1/10~1/5），使得电路短路阻抗增大，短路电流随之变小限制在各相关断路器开断范围内，并由故障线路继电保护动作，由其断路器切除故障线路，电力系统恢复正常运行。高速开关开断短路电流的电气特性曲线如图3所示。

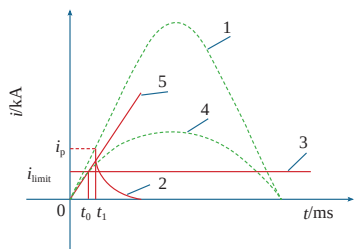


图3 高速开关开断短路电流的电气特性曲线

1) 系统最大运行方式下预期三相短路电流曲线。

2) 短路电流在FSR中衰减曲线。

3) FSR启动电流值 $i = i_{\text{limit}}$ 。

4) 峰值为 $\sqrt{2} \times I_{dz}$ 电流曲线。

5) 系统实际动作电流曲线的电流增长率切线。

t_0 ：短路电流达到动作值所需时间。

t_1 ：电流截止时间。

t_2 ：电流衰减到零的时间。

i_p ：截止电流。

电力系统的主要元件基本由感性、容性及阻

性设备组成，绝大多数为感性元件，一旦出现开断感性负载的线路或元件时，其内储存的电磁能将通过断路器或熔断器的端口以电弧能的形式释放，若此能量太大，势必会造成断路器灭弧室或熔断器壳体的压力超过其可承受的极限而发生爆炸。采用金属氧化锌避雷器与熔断器并联，可由高压熔断器FU产生的弧压将避雷器非线性电阻FR导通，吸收剩余能量并保证FU可靠熄弧。

高速开关FSR及并联限流电抗器的参数设计

1. FSR的参数设计

(1) FSR的参数设计

额定电压 $U_e = 6 \text{ kV}$ 。额定电流 $I_e = 3000 \text{ A}$ 。启动电流 $i_{\text{limit}} = 6 \text{ kA}$ 。动作电流 $i_{dz} = 10 \text{ kA}$ 。电流增长率 $di/dt = 4 \text{ A}/\mu\text{s}$ 。

(2) FSR的动作条件

FSR动作取决于启动电流 i_{limit} 及电流增长率 di/dt ，当两者均超过设定值时，FSR才会动作。

(3) FSR的截流时间及截止电流

流过FSR的最大三相短路电流 $i = 36.29\sqrt{2} \sin 18t$ 。装置运算时间 $t_0 = 0.242 \text{ ms}$ 。截流时间 $t_1 = 0.842 \text{ ms}$ 。截止电流 $i_p = 15.39 \text{ kA}$ 。

(4) FSR的配置及结构

大容量高速开关装置FSR基本配置：FS载流桥体 3000 A 6 kV。FU限流熔断器 6 kV 环氧管。FR氧化锌组件 $U_1 = 14.07 \text{ kV}$ 。专用电流互感器 3000 : 2。专用脉冲变压器 MBJ2-20。柜内微机测控单元 FSR-ZK。

2. 并联限流电抗器XL参数

额定电压 $U_e = 6 \text{ kV}$ 。额定电流 $I_e = 3000 \text{ A}$ 。电抗率 $X_L = 12\%$ 。

高速开关动作与继电保护的配合

对于一次回路中串接高速开关的电力系统，高速开关的开断电流设定值应与相关线路的继电保护动作设定值进行有效配合，以满足继电保护的选择性及供电连续性的要求。在发电厂电气主系统中，当发电机出口、发电机电压母线或低压厂用变压器高压侧等处发生短路时，由于短路阻抗较小，流经高速开关FSR的短路电流（ i_d ）较大且短路电流上升速率（ i_d/i_i ）较高，一旦达到设定值，高速开关FSR迅速动作开断，投入电抗器，故此时高速开关FSR的电流动作值应按小于与之

串联的发电机出口断路器额定开断电流值,以保证发电机出口断路器不会开断超过其额定开断电流的故障电流;当在厂用变压器低压侧发生短路时,由于短路阻抗较大,流经高速开关的短路电流(i_d)较小且短路电流上升速率较低(i_d/i_t),高速开关不应动作,而应由相关厂用变压器高、低压侧断路器动作切除故障。

结束语

大容量高速开关FSR具有额定电流大,开断能

力强、切除速度快,对于维持电力系稳定、保证设备安全、减少电气设备投资及经济运行都有重要意义。

但该接线方案尚存在一些难以克服的缺点,如当高速开关动作后,其桥体、高压熔断器均需重新更换,需要增加投资,并且有一定的发电机停电修复时间。高速开关开断的稳定性及安全性也需经工程实践进一步验证。EA

(收稿日期:2014.05.07)

[栏目编辑 朱金凤]

(上接第76页)

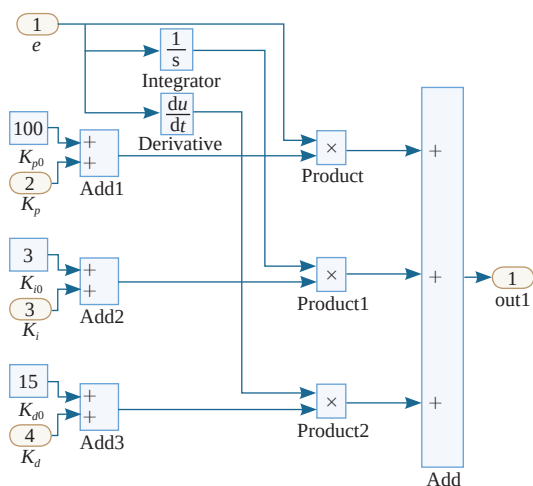


图9 封装PID的解封图

双控制器切换控制器是给开关一个控制信号,使开关在0到0.01 s采用传统PID控制,在0.01 s后采用模糊PID控制励磁系统。

2. 仿真结果

将仿真参数配置设置为仿真时长为5 s,仿真步长选为0de23tb。单击仿真按钮,出现如图10所示的仿真曲线。

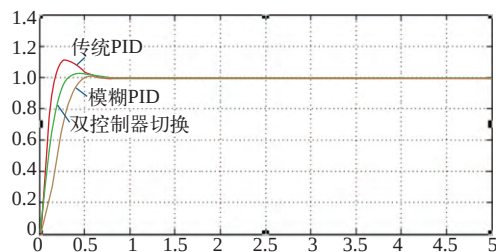


图10 双控制器切换控制、传统PID和模糊PID仿真结果比较

由仿真结果图可以看出,采用传统PID控制的励磁系统仿真曲线具有较大的超调量:11.1%,而采用模糊PID控制的励磁系统的仿真曲线能较平滑地进入控制目标值,其超调量:0.8%。传统PID具有较好的动态特性,它的响应速度比模糊PID更快。传统PID控制的上升时间是0.17 s,而模糊PID的上升时间是0.52 s。

双控制器切换控制励磁系统的控制效果介于传统PID和模糊PID的控制效果之间。双控制器切换控制励磁系统相比较于模糊PID增加了动态响应速度,具有0.31 s的上升时间。但是双控制器切换控制励磁系统比模糊PID控制的超调量大一些,具有2.8%的超调量。三者都具有较好的稳态精度。

跟踪在0.01 s处,控制器切换时的曲线情况,如图11所示。

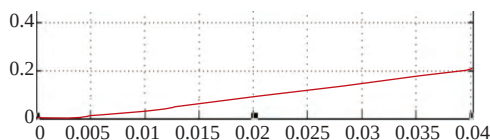


图11 0.01 s处控制器切换的仿真图

由图可以看出,两个控制器切换是平滑切换,在0.01 s处的左右导数的极限是相等的,因此认为是平滑切换。

结束语

本文将传统PID与模糊PID的优势相结合构成的双控制器切换控制的思路,具有更好的控制性能。EA

(收稿日期:2014.07.15)