[换流站]

特高压换流站交流滤波器配置及典型鸟害故障分析

文/国网湖南省电力有限公司检修公司　张杰峰　刘晓波　刘　源　熊富强

换流站多选在山区，鸟类频繁的活动已经成为导致交流滤波器跳闸的首要因素。对某特高压换流站的交流滤波器配置、控制和保护功能进行了详细阐述与说明，并结合换流站典型鸟害事件，总结出交流滤波器的运维经验和故障处理方法，提出合理化建议，对直流输电稳定运行具有重要意义。

在直流输电系统中，换流器在运行中要产生大量的谐波，同时还需要消耗无功功率。在额定运行方式下工作时，逆变器消耗的无功功率约为滞留功率的40%～60%，因此为了保证交流系统和直流系统的安全平稳运行，换流站都配置了大量的无功装置。根据相关规程规范，某换流站共配置4大组19小组交流滤波器，可最大提供约4 940 Mvar的无功功率，该站滤波器可分为三类：HP12/24型滤波器，用于滤除12和24次谐波；HP3型滤波器，用于滤除3次谐波；SC型电容器，主要用于无功功率补偿。此外，在站用变低压侧还配置了低压电抗器，共同参与站内无功调节。站内交流滤波器具体类型、组数及容量如表1所述。

表1　某换流站交流滤波器及电抗器配置

设备类型	配置组数	单组容量/Mvar
HP12/24	8	260
HP3	2	260
SC	9	260
低抗	2	60

换流站的无功控制主要是根据当前直流系统的运行工况和方式，经过控制系统计算出所需的无功功率，然后通过投切站内的交流滤波器和低压电抗器等设备，来确保交直流系统的无功功率交换在正常范围和交流母线电压在规定运行区间。然而近年来，多个特高压换流站因飞鸟活动导致交流滤波器频繁跳闸，这已经成为交流滤波器跳闸的首要因素。当飞鸟进入交流滤波器电容器塔内活动时，极易引起电容器接头间、电容器塔层间等部位短路，导致电容器塔不平衡电流保护动作，造成滤波器跳闸，若此时滤波器组无法满足绝对最小滤波器要求，会造成直流系统功率回降，甚至导致直流闭锁。据统计仅2016年由于鸟害引起的换流站滤波器跳闸事件就高达50余次，该站2018年两个月内也已连续发生三起由于鸟害造成的交流滤波器跳闸事故，表2统计了部分换流站的鸟害情况，可以看出当前鸟害事件已经十分频繁。

根据表2的数据可知，故障位置多在电容器塔层间，占比为80%，其原因是鸟类嬉戏时造成在电容器接头及连接线处与本体之间的短路或展翅时

表2　换流站交流滤波器鸟害跳闸统计

换流站	时间	滤波器类型	故障位置
锦屏站	2015年9月4日	SC	电容器接头
锦屏站	2016年6月6日	SC	电容器接头
锦屏站	2016年7月29日	SC	电容器层间
中州站	2016年6月24日	HP1224	电容器层间
中州站	2016年7月4日	HP1224	电容器层间
宜宾站	2016年3月5日	BP1113	电容器层间
宜宾站	2016年10月25日	SC	电容器层间
灵州站	2017年5月18日	BP1113	电容器层间
韶山站	2018年6月12日	HP1224	电容器层间
韶山站	2018年7月7日	HP3	电容器层间

造成的电容器塔层间短路。本文系统介绍了换流站的无功配置策略，针对换流站鸟害实例，详细地说明了防鸟害的建议和措施。

无功控制策略

1．无功功率控制功能

直流极控制主机（PCP）中的无功控制功能采集了换流站每极的运行参数，根据当前直流系统的功率输送水平和无功功率交换进行交流滤波器的投退，其控制功能的优先级如表3所示。

表3　无功控制功能及优先级

功能名称	功能描述	优先级
绝对最小滤波器	为了防止滤波设备过负荷所需投入的滤波器组	1
最大交流电压	当交流电压达到参考值时，快速切除交流滤波器	2
最大无功功率	根据工况限制投入滤波器组的数量，防止稳态过电压	3
最小滤波器	为了满足滤除谐波的要求需投入的最少滤波器组	4
无功交换和电压控制	控制无功交换量为设定值	5

无功控制各功能的优先级主要用于协调发出的投切滤波器组指令。以上各项无功控制子功能优先级由5至1，优先级级别依次提高。

2．滤波器组投切策略

在直流功率上升和下降的过程中，投入和切除交流滤波器组必须遵循一定的顺序和原则。 通常，首先要确保交流滤波设备的安全运行，即防止交流滤波器谐波过负荷出现，一般由绝对最小滤波器控制实现；其次，要考虑站内谐波对交流系统的影响，即将站内谐波抑制在一定水平范围内，一般由最小滤波器容量要求控制实现；此外，还要确保换流站与交流系统的无功功率交换在允许范围之内1或者交流母线电压在规定运行区间之内，一般由最大交流电压控制、最大无功交换限制和无功交换控制/电压控制等实现。绝对最小滤波器和最小滤波器的各投切点通常依据交流滤波器研究报告确定；无功控制则通过实时计算交直流两侧的无功交换量ΔQ确定

$$\Delta Q = Q_{\mathrm{d}} - \Sigma Q_f \tag{1}$$

式中，Q_{d}是站内换流器消耗的总无功功率；ΣQ_{f}是滤波器组提供的无功功率。

$$\Sigma Q_f = \Sigma_{n=1}^{\mathrm{N}} \left(\frac{U_{\mathrm{ac}}}{U_{\mathrm{acN}}} \right)^2 \times \frac{f_{\mathrm{ac}}}{f_{\mathrm{acN}}} \times Q_{fn} \tag{2}$$

式中，U_{ac}是交流系统实际电压；U_{acN}是交流系统额定电压；f_{ac}是交流系统实际频率；f_{acN}是交流系统额定频率；Q_{fN}是滤波器组额定工况；n是实际投入的滤波器组数。

当交直流两侧的无功交换量超过限值时，则发出指令以控制滤波器组的投切，即当满足式（3）时，发出切除交流滤波器/并联电容器组的命令；当满足式（4）时，发出投入交流滤波器组的命令。

$$\Delta Q > Q_{\mathrm{ref}} + Q_{\mathrm{bd}} \tag{3}$$

$$\Delta Q < Q_{\mathrm{ref}} - Q_{\mathrm{bd}} \tag{4}$$

式中，Q_{ref}是设定的参考值；Q_{bd}是设定的死区值。

此外考虑到直流运行在最小功率时，在保证绝对最小滤波器的前提下，换流站会出现无功补偿过剩，此时通过投入低压电抗器来吸收多余无功功率。

由表4可知，绝对最小滤波器要求的功率点通常高于最小滤波器的功率点。因此，正常情况下最小滤波器通常先于绝对最小滤波器要求发出投入滤波器指令。

表4　某换流站绝对最小滤波器及最小滤波器配置

投入滤波器组数	HP12/24	HP3	绝对最小滤波器对应功率点	最小滤波器对应功率点
1	1	0	0	0
2	2	0	1 382	1 184
3	3	0	2 928	2 337
4	3	1	4 065	3 129
5	4	1	5 815	4 265
6	5	1	6 897	5 081
7	6	1	–	6 178
8	6	2	–	7 600

交流滤波器不平衡电流保护原理

该换流站交流滤波器$C1$电容器不平衡保护使用的是南瑞PCS－976控制系统，其配置图如图1所示。

稳态不平衡保护包括Ⅰ段报警和Ⅲ段保护跳闸，暂态不平衡保护包括Ⅱ段保护跳闸。当满足式（5）、式（6）时，经过设定的延时后装置动作于报警或跳闸。

当电容器损坏元件个数一定时，不平衡电流随穿越电流的变化而变化，两者的关系恒定，因此采取比值不平衡保护与不平衡计数保护相结合进行判断出口。

稳态不平衡保护动作方程为

$$I_{\mathrm{ub}} \geqslant I_{\mathrm{ubqd}} \tag{5}$$

$$I_{\mathrm{ub}} \geqslant I_{\mathrm{tro}} K_{\mathrm{ubzd}} \tag{6}$$

式中，I_{ub}是交流滤波器的不平衡电流；I_{tro}是交流滤波器的穿越电流；I_{ubqd}是不平衡启动整定值，已

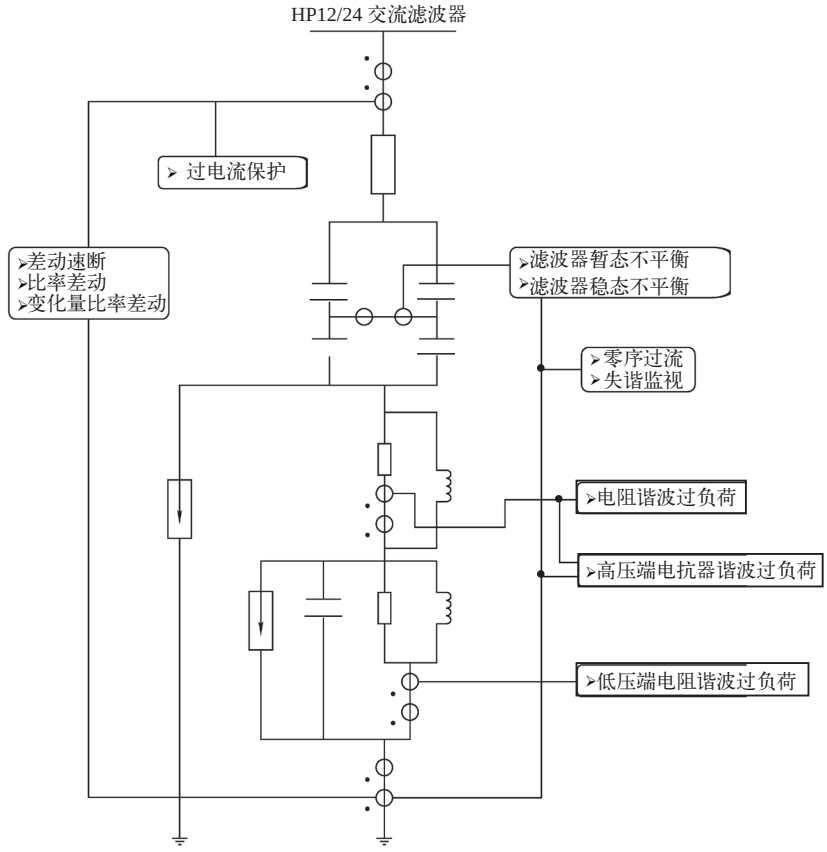

图1　保护配置图

固化在装置中，不需用户整定；K_{ubzd}是不平衡系数保护定值。

当任一相满足以上条件时，稳态不平衡元件动作，暂态不平衡保护动作方程为

$$\Delta I_{ub} \geqslant I_{ubqd} \tag{7}$$

$$\Delta I_{ub} \geqslant I_{tro} \Delta K_{ubzd} \tag{8}$$

式中，ΔI_{ub}是交流滤波器的暂态不平衡电流，是突变量不平衡电流；ΔI_{ubqd}是暂态不平衡起动值，它由装置内部设定，无需用户整定；ΔK_{ubzd}是暂态不平衡保护定值。

当任一相满足以上条件时，暂态不平衡元件动作。 暂态不平衡保护包括段保护，其报警的定值和保护动作的定值相同，而报警的延时却和稳态不平衡报警的延时定值相同。

交流滤波器电容器发生鸟害时，极易引起电容器接头间、电容器塔层间等部位短路，会引起不平衡电流发生变化，不平衡Ⅱ段和Ⅲ段保护动作时，会导致滤波器跳闸，影响其正常运行。当滤波器跳闸后，需对该电容器逐一进行电容值测量，对电容器进行桥臂电容测量等工作，检修任务较重。而交流滤波器故障跳闸导致的更严重的后果是引起直流系统的功率回降，甚至造成直流闭锁。

案例分析

换流站由于直流输送功率实时变化，滤波器也因此投切频繁，每天基本都有动作，致使电容器在遭受合闸涌流、分闸重燃和长期运行中出现异常。同时换流站多处于山区，植被多且风大，鸟类繁多，并时常有漂浮物随风吹入站内，这些都将导致电容器电阻箱等设备相间短路，造成滤波器故障。下面针对某换流站发生的两起交流滤波器故障进行对比分析，一起为鸟害导致一组交流滤波器不平衡电流保护动作跳闸，另一起为滤波器投入过程中不平衡Ⅱ段计时报警事件。两次事件的故障录波波形如图2所示，根据故障时该站运行工况可以计算出滤波器三段不平衡保护电流定值如表5所示。

表5　5611滤波器不平衡保护动作策略表

故障级别	动作后果	延时定值	不平衡系数	穿越电流/A	保护定值/mA
Ⅰ段	报警	10 s	0.000 384	294	112.896
Ⅱ段	延时跳闸	120 min	0.000 54	294	158.76
Ⅲ段	立即跳闸	0.02 s	0.000 739	294	217.266

故由图2，可知故障发生时，对应相间的不平衡电流都有突增，最大分别达到了25.127 A和3.55 A，都超过了Ⅲ段保护定值217.266 mA，但是前者导致了故障滤波器跳闸，而后者报警复归，设备恢复运行。由故障波形可以看出，由于事件2为冲击性过电流，与选相合闸有一定关系，部分相的零点合闸冲击小，为暂态不平衡，因此没有达到Ⅲ段保护跳闸条件，而事件1不平衡电流持续时间超过了保护动作值20 ms，从而导致了相应保护动作出口，滤波器跳闸。

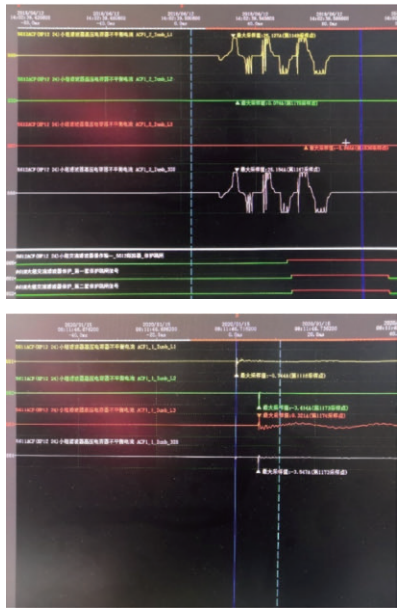

图2　故障录波图

建议

根据表2的数据可知，故障位置多在电容器塔层间，占比为80%，其原因是鸟类嬉戏时造成在电容器接头及连接线处与本体之间的短路或展翅时造成的电容器塔层间短路。目前换流站对于鸟害的防治措施有驱鸟和防鸟两大类。

（1）加装驱鸟装置

常用驱鸟措施有激光、超声波、人工驱鸟、仿生驱鸟和爆裂声驱鸟等。

（2）喷涂绝缘材料

常用防鸟措施有在滤波器引线及接头处加装绝缘护套和在滤波塔及滤波器外壳喷涂绝缘材料等，滤波器引线及接头加装绝缘护套能解决电容器接头及连线处的鸟害问题，但无法解决电容器塔层间的鸟害。滤波器塔及外壳喷涂绝缘材料，能有效地解决电容器塔层间及电容器构架和本体间的鸟害问题。

根据多个换流站的事故总结和运行经验，建议使用氟硅阻燃导热高压绝缘涂料等新型材料喷涂交流滤波器电容塔及外壳，采取多种类型驱鸟器配合使用的方式，并加强设备的日常巡视，从根本上治理交流滤波器鸟害事件。

结束语

交流滤波器作为换流站内的重要设备，其日常运维和故障处理尤为重要。本文对某特高压换流站无功设备的配置情况、控制策略和保护类型进行了详细介绍，并结合两次事件的故障录波、保护逻辑等对比分析，总结出了故障原因，对直流输电系统的维护管理，设备缺陷的排查提供了一定的参考价值，对换流站的安全运行具有重要的意义。EA

（收稿日期：2020.04.15）

（编辑：朱金凤）

声　明

《电气时代》杂志唯一投稿渠道

登录电气时代官网www.eage.com.cn，点击“我要投稿”

咨询电话：010－68993981