交流侧故障引发高压直流换相失败的关联分析及应用技术研究

换相失败是高压直流输电系统中常见的故障，在现在实际运行的电网监控系统中，主站只能接收到来自WAMS的高压直流线路功率信号、交流侧母线电压信号和来自变电站直传告警的故障信号，因而无法利用关于换相失败故障分析的相关研究成果进行详尽的故障分析，这对于高压直流输电系统的故障监控工作是不利的。因此，参考GIGRE高压直流系统的模型，使用DIgSILENT/Powerfactory电力仿真软件对高压直流系统进行建模，在交流侧进行不同类型和电气距离的故障模拟，通过相关电气量采集分析，验证了不同故障条件下，交流侧故障对于换相失败的不同影响。结合华中电网实际，利用智能电网调度技术支持平台D5000的数据采集优势，将孤立的换相失败故障和已知的交流侧故障进行准确关联和统计分析，从而为换相失败的监控、分析和预防工作提出了一些有借鉴意义的方法和思路。

于文娟　王　健　汤卫东　陶　玮／国家电网公司华中分部

于文娟／工程师

关键词／Keywords
高压直流输电·
换相失败·
智能电网·

0　引言

目前，省级及以上调度中心中，智能电网调度技术支持系统D5000已经基本完成部署，该系统主要支持电网日常的监控和调度支持工作，基本实现了简单故障的分析处理及推送告警功能。高压直流输电运行监控作为电网监控的一个重要组成部分，其运行状态和故障信息等成为电网监控工作中的一个重点监控部分。不少学者通过分析站端的各种信号，对高压直流输电系统的各种故障特别是最常见的换相失败故障进行了不少的研究工作，也取得了较大的进展[1-5]，但是大部分研究都基于换流站端，在调度站层面，主站接入信号有限，过去研究所需的一些关键信号和数据在实际监控工作中会有所缺失，而本文结合实际生产状况，最大化利用智能电网调度技术支持系统数据的全面性优势，将高压直流输电中的换相失败的相关信息完整地展现在调控人员面前，这对于从调度层面来维护高压直流输电系统的稳定性具有重大意义。

1　高压直流输电技术优势及故障诊断

1.1　高压直流输电技术优势

高压直流输电系统（HVDC）相比较于传统的高压交流输电系统具有以下优势：相对传统的高压交流输电系统更加稳定；没有无功损耗因而损耗更低；允许两端网络在非同步条件下的并网；能够通过无功功率改进系统的稳定性。目前，高压直流输电技术已经在远距离大容量输电和大区联网两个方面得到了广泛的应用[1]。

我国已经兴建了数条高压直流输电系统。随着高压直流输电在电网中的比重越来越大，其对电网的影响也越来越大，然而，运行时难以避免地出现各种故障。因此，及时地找出故障原因并排除故障，保证高压直流输电系统的稳定运行成为了电网运行工作中十分重要的任务。

1.2　换相失败故障

在高压直流输电系统中，换相失败是最常见的一种故障。换流器中的阀是一种可控的电力电子开关，仅在加有正向电压及触发信号的情况下才会导通。

中国知网　https://www.cnki.net

关断时，则需要晶闸管两端加载一段时间的反向电压，完成载流子复合，恢复正向阻断能力。由于整流器在换相之后晶闸管两端会加上负电压，不会再导通，所以换相失败一般发生在逆变器端。而一般认为，阀运行中，关断角γ小于固有极限关断角γ_{min}时，逆变器将发生换相失败。关断角可以用如下公式计算[2]，即

$$\gamma=\cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{2X_rI_d}}{U}+\cos\beta\right)-\varphi \qquad (1)$$

式中，γ为熄弧角；X_r为换相阻抗；I_d为直流电流；β为超前触发角。

从式（1）可知，超前触发角β减小、直流电流I_d增大以及换相电压过零点前移都会使熄弧角减小，可能导致换相失败，从以下几个方面来分析引发换相失败的因素[3]。

1）换流站的内部故障。换流器通过触发脉冲来控制阀的开合，触发电路因谐波、故障等原因，造成触发脉冲的丢失等故障时，会导致阀未按照正确的顺序导通和闭合，从而引发换相失败，这种情况在换相失败故障中出现的比较少。

2）交流系统故障。交流系统故障分为对称和不对称故障，会造成换流站母线电压下降（两者）以及换相电压过零点漂移（不对称故障）等问题，从而导致换相失败，在现在的高压直流系统中大多配备了电压限流控制VDCL和电流偏差控制DGEI等，因此故障是否会真正引发换相失败和多个具体因素相关，包括：①电压下降速度，VDCL能够很好地抑制换相失败的发生，电压的下降速度和控制系统的响应速度将决定换相失败是否发生；②交流故障的电气距离及交流系统的强弱，具有高短路比SCR的强交流系统在故障下电压相对变化较小，因此不容易引发换流器母线的电压大幅下降，同时电气距离也会影响到母线电压的大小；③故障合闸角，故障合闸角距离换相点的相位也是影响换相失败的重要因素之一。

3）直流侧故障。直流侧故障主要是当直流侧接地短路时导致的直流电流上升引发的换相失败。与短路时间、过渡电阻等有着密切的关系。

换相失败是高压直流输电系统中的常见故障，同时还可能伴随多次连续、不连续的换相失败，这会导致系统出现直流电流剧增，缩短换流阀寿命，减少直流输电功率，以及导致逆变侧交流系统电压不稳定等严重后果。文献[3-4]研究了换相失败的发生，分析了故障相别、过渡电阻和重合时间等各个因素对换相失败的影响。

1.3 换相失败故障诊断

目前，对阀外故障引发的换相失败故障，主要有最小电压判据法、熄弧角判别法和小波分析法等[5]。但以上这些诊断方法都是基于换流站端的详细运行参数诊断，而在监控主站端，目前可以采集到的主要的是换流站的功率信号和母线电压以及“换相失败故障”变电站直传告警信息，而不能得到关于换相失败所需的最小关断角、直流电压和直流电流等其他关键参数。针对这种不利条件，应另辟角度，发挥主站端优势，来最小化微观信息匮乏的影响。考虑到D5000系统是从更高的层面对整个电网全面运行信息的总成，因此如何利用D5000系统信息集成的宏观优势，从电网运行的海量数据中挖掘所需的信息，成为了一项具有现实意义的工作。

2 基于Powerfactory的高压直流系统建模及仿真分析

DIgSILENT/Powerfactory相对其他仿真软件最重要的特点是：把机电暂态分析模型与电磁暂态分析模型结合到一起，使其既能对电网的暂态故障进行分析，又能研究长期的电能质量问题及控制方法。DIgSILENT/Powerfactory提供了全面的电力系统元件的模型库，甚至可以很方便地建立自定义模型，且能直观地监测运行过程中整个系统中的任何变量[6]。还提供了SCADA和GIS的接口，这对今后的进一步研究是十分有帮助的。本文通过DIgSILENT/Powerfactory进行机电/电磁暂态的综合建模。

2.1 电网模型

参考CIGRE的HVDC标准模型，对高压直流输电系统进行仿真建模，如图1所示。

中国知网 https://www.cnki.net

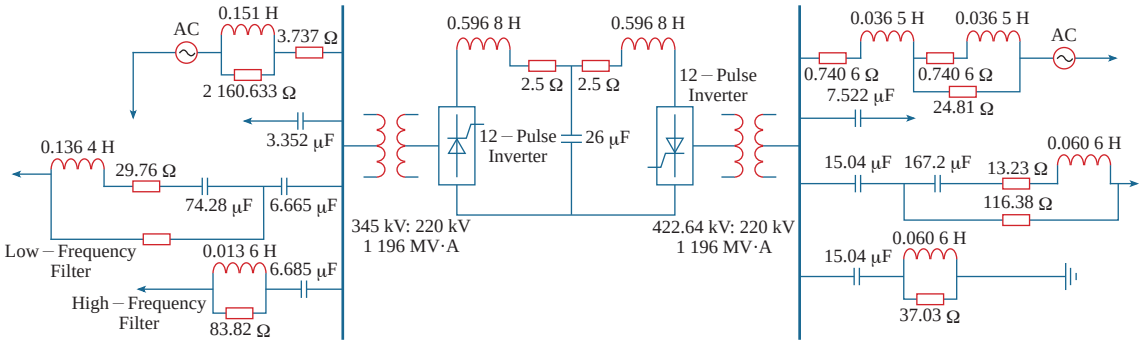


图1 仿真模型

系统采用500 kV、1 000 MW单极直流输电，整流侧和逆变侧采用12脉波换流器，电网采用等效模型，属于弱交流系统，短路比SCR＝2.5。交流侧安装了一组双调谐滤波器和一组高通滤波器。电容器和滤波器都可以为系统提供无功功率。控制系统参考了标准模型，采用电流裕度控制，文献[7-9]对该标准系统极其控制系统作了详细的介绍。

2.2 交流侧故障引发换相失败的仿真结果

（1）不同故障类型引发的换相失败

图2记录了不同故障类型下，逆变器关断角γ的值。从图2中可以看出，当$\gamma=0$时，认为发生了换相失败，红、蓝和绿分别代表了三相短路故障、单相接地故障以及两相接地故障的关断角γ，可以看出换相失败收到故障类型的影响。文献[10]的研究指出，对称故障中，电压是影响换相过程的主要因素；非对称故障中，还需要考虑换相点漂移的作用。

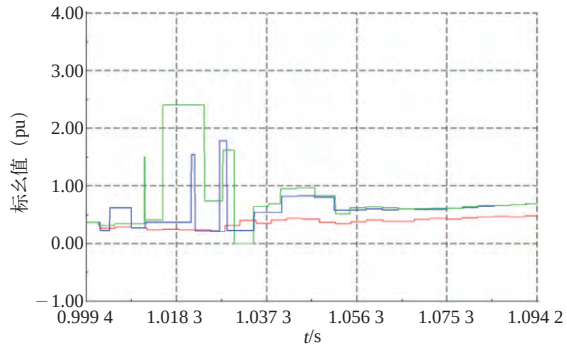
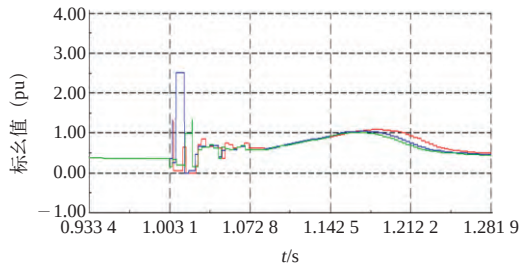


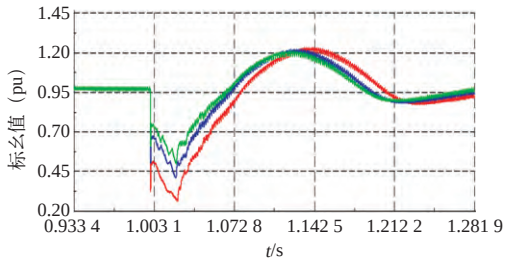
图2 不同故障的关断角γ值曲线

（2）不同电气距离的功率波动及电压仿真

图3a为熄弧角和电气距离的关系，红、蓝和绿代表了电气距离由近到远的差别。图3b为换相失败与母线电压的关系，一般来说故障点距离交流侧母线电压越远，对交流侧母线电压的影响越小。因此可以认为，电气距离对于换相失败的发生和数值特征等有着显著的影响。图3b中，红、蓝、绿分别代表了从近到远的故障点电气距离，可以看出，离交流侧母线越近的故障点，越容易引发换相失败。



（a）熄弧角和电气距离的关系



（b）换相失败与母线电压的关系

图3 不同电气距离故障下的关断角和母线电压

当然，上述结论是一个简化的结论，母线电压的大小，还受到电网强度、故障点过渡电阻等诸多因素的影响，其影响因素是极其复杂并且难

中国知网 https://www.cnki.net

以通过建模来分析所有可能性的[10-13]。因此，可以尝试以理论为基础，通过对于实际电网的运行参数进行统计分析采集的方式，来找出运行在统计学上的规律。

3 结束语

针对目前应用中高压直流换相失败诊断的难点，通过在DIgSILENT/Powerfactory中建立高压直流模型，对不同种类、不同电气距离的故障进行仿真、分析，得出了换相失败后功率波动的基本特征和时序特征，证明了交流侧故障引发的换相失败，与故障点的电气距离以及故障类型是有关联的。以华中电网为例，利用智能电网调度技术支持系统平台的全网数据采集优势，提出了一些实际应用的关联告警和统计展示方法，从电网运行的大数据中挖掘有用信息，为实际电网监控工作中换相失败的告警监控提供了一种有效的思路和方法。

参考文献

[1] 赵婉君．高压直流输电工程技术 [M]．北京：中国电力出版社，2004.

[2] 黄东玉．高压直流输电的换相失败研究 [D]．北京：华北电力大学，2006.

[3] 陈桥平．云广直流介入后交流电网故障对直流输电系统换相失败的影响研究 [D]．广州：华南理工大学，2010.

[4] 邰能灵，杨光亮，涂崎．特高压直流输电系统的建模与仿真 [J]．电力自动化设备，2012，32 (7)：10-16.

[5] 袁阳，卫志农，雷宵，等．直流输电系统换相失败综述 [J]．电力自动化设备，2013，33 (11)：140-147.

[6] 梁克靖，郭家虎，李鹏鹏．基于DIgSILENT/Powerfactory的轻型直流输电系统建模和仿真 [J]．工矿自动化，2013，39 (6)：85-89.

[7] 邓广静，周威．CIGRE直流输电标准模型的建模及控制策略仿真研究 [J]．江苏电机工程，2009，28 (1)：31-34.

[8] 伍家驹，孙红艳，刘斌，等．基于CIGRE HVDC控制器的PI参数可视化整定方法 [J]．电力自动化设备，2012，32 (10)：115-120，126.

[9] 尉龙，宋吉江，孙磊．基于PSCAD的CIGRE HVDC模型控制系统研究 [J]．山东理工大学学报：自然科学版，2014，28 (5)：69-75.

[10] 邵瑶，汤涌．多馈入交直流混合电力系统研究综述 [J]．电网技术，2009，33 (17)：24-30.

[11] 李新年，易俊，李柏青，等．直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计 [J]．电网技术，2012，36 (6)：266-271.

[12] 张强，欧阳瑞，冯中．宝鸡－德阳HVDC换相失败仿真分析 [J]．四川电力技术，2010，33 (2)：10-13，59.

[13] 吴萍，林伟芳，孙华东，等．多馈入直流输电换相失败机制及特性 [J]．电网技术，2012，36 (5)：269-274.

（收稿日期：2015－12－10）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

中国知网 https://www.cnki.net