

HVDC 引起次同步振荡暂态扰动风险的机理分析

张鹏, 毕天姝

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Mechanism Analysis of Large Disturbance Risk of Subsynchronous Oscillation Caused by HVDC

ZHANG Peng, BI Tianshu

(State Key Lab. of Alternate Electrical Power System With Renewable Power Source (North China Electric Power University),
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The mechanism of large disturbance risk of subsynchronous oscillation caused by HVDC was investigated. Firstly, the valve current commutation law of inverter side under AC system disturbance was studied. Then, the equivalent circuits of both the AC and the DC systems of HVDC under the condition of commutation failure caused by AC system faults were achieved. On this basis, it was revealed that the DC short circuit current was supplied totally by AC system of rectifier side, which may induce the large disturbance risk of subsynchronous oscillation of generators nearby the rectifier side. The conclusion is verified by digital simulation and the large disturbance risk of subsynchronous oscillation caused by HVDC in an actual system is duplicated.

KEY WORDS: high voltage DC; subsynchronous oscillation; large disturbance risk; commutation failure; equivalent circuit

摘要: 该文揭示一种由高压直流输电系统(high voltage DC, HVDC)引起的次同步振荡暂态扰动风险的产生机理。首先分析逆变侧交流系统扰动时, HVDC 逆变站换流阀组的电流更替规律, 从而得到交流系统故障造成逆变侧换相失败时, HVDC 交、直流系统的等值回路。等值回路分析表明, 换相失败发生时, 直流线路等效短路, 同时逆变侧交流系统部分或全部等效开路, 并且直流短路电流全部由整流侧交流系统经三相整流桥提供。因此, 流入整流桥的交流电流远大于正常值, 会造成整流站附近发电机功率和转矩的暂态冲击, 激发初值较高的轴系扭振, 形成次同步振荡暂态扰动风险。采用时域仿真方法验证了 HVDC 电流更替规律和等值

回路的分析结论, 并仿真再现了实际系统中发生的由 HVDC 引起的次同步振荡暂态扰动现象。文中的研究成果为交直流互联系统次同步振荡风险预测和分析提供了新的理论依据。

关键词: 高压直流输电; 次同步振荡; 暂态扰动风险; 换相失败; 等值回路

0 引言

由于高压直流输电(high voltage DC, HVDC)在远距离大容量输电、区域电网互联等方面的优势, 在我国电网得到广泛应用^[1-5]。然而, HVDC 有可能引起汽轮发电机组的次同步振荡风险。次同步振荡对电力系统的危害主要体现在轴系扭振应力造成的疲劳损伤。这种轴系损伤既可能是由于小扰动弱阻尼条件下持续振荡造成的疲劳累积效应, 也可能是暂态扰动作用下的短时高扭振幅值造成的。

现有研究成果认为, HVDC 引起汽轮发电机组次同步振荡的机理是由于整流侧控制器对发电机转速偏差的快速响应造成的, 体现为 HVDC 引起整流站附近发电机组次同步振荡电气负阻尼特性^[6-9], 因而造成的轴系损伤也是缓慢积累过程。因此, 对于 HVDC 引起的次同步振荡的机理分析, 通常只针对小扰动下的阻尼水平展开^[10-14], 并且研究范围仅包括 HVDC 整流站及其附近发电机组^[15-16]。然而, 在实际交直流系统中, 发生了由 HVDC 逆变侧交流系统故障引起的整流侧发电机组次同步振荡暂态扰动现象, 并造成了轴系疲劳损伤。因此, 现有理论无法对其机理给出合理解释。

本文研究由 HVDC 引起的次同步振荡暂态扰动风险这一新现象的产生机理。首先分析逆变侧交流系统故障下, 逆变站阀组电流更替规律, 从而得

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划) (2012AA050208); 高等学校学科创新引智计划项目(“111”项目)(B08013); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2015MS09)。

The National High Technology Research and Development of China (863 Program)(2012AA050208); “111” Project(B08013); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015MS09).

到换相失败发生时 HVDC 交、直流系统的等值回路。等值回路分析表明, 逆变侧交流系统故障造成换相失败发生时, 直流线路短路, 逆变侧交流系统全部或部分等效开路。并且由于直流短路电流全部由整流侧交流系统经整流桥提供, 从而造成整流站附近发电机组功率和转矩的暂态冲击, 激发较高幅值的轴系扭振, 形成次同步振荡暂态扰动风险。采用时域仿真方法验证了 HVDC 电流更替规律和等值回路的分析结论, 并仿真再现了实际系统中发生的由 HVDC 引起的次同步振荡暂态扰动现象。

1 实际系统及其次同步振荡暂态扰动现象介绍

1.1 交流系统简介

辽宁绥中电厂安装有一期两台(1、2 号机组) 800 MW 汽轮发电机组和二期两台(3、4 号机组) 1000MW 汽轮发电机组。二期机组轴系扭振频率为 13.4、23.3 和 26.7Hz。绥中电厂高压母线经由双回 16km 绥高线(绥中—高岭)连接到高岭。高岭变电站经过 104km 双回高沙线(高岭—沙河营)连接到东北电网。东北电网侧距离沙河营较近的节点包括董家、北宁、元宝山、辽阳、王石等变电站。其中, 双回董沙线(董家—沙河营)长 79 km; 单回沙北线(沙河营—北宁)长 130km; 单回董北线(董家—北宁)长 53km。

2010 年, 连接东北电网和华北电网的高岭背靠背 HVDC 系统投入运行, 实现了东北电网侧高岭变电站与华北电网侧天马变电站的异步连接。华北电网侧距离天马变电站较近的节点包括姜家营、太平、安各庄、承德和上都变电站。其中, 双回上承线(上都—承德)长 243 km; 三回承姜线(承德—姜家营)长 130km。图 1 所示为 2010 年度高岭背靠背 HVDC 系统的整流侧、逆变侧交流系统电气接线图。



图 1 绥中—高岭交直流系统电气接线图

Fig. 1 Electrical network diagram of Suizhong plant and Gaoling Back-to-Back HVDC AC/DC power system

1.2 高岭背靠背 HVDC 简介

2010 年, 高岭背靠背 HVDC 共 2 个换流单元投入运行, 总额定功率 1500MW。其中, 每个单元采用双极、每极 6 脉动方式, 额定电压±125kV, 额定电流 3 kA, 额定功率 750 MW, 由东北侧(高岭)向华北侧(姜家营)输送功率。如图 2 所示为单个换流单元结构示意图。

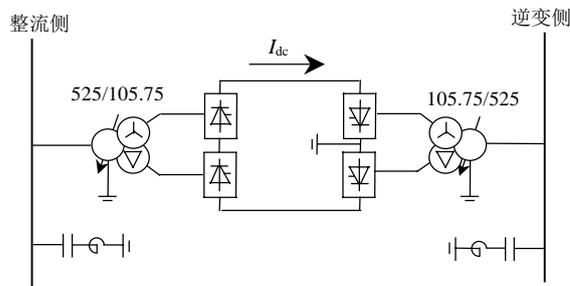


图 2 高岭 HVDC 换流单元结构

Fig. 2 System diagram of Gaoling converter units

1.3 绥中电厂次同步振荡现象

通常的观点认为, 背靠背 HVDC 能够隔离所连接的不同交流系统的故障^[17]。然而, 2010 年高岭背靠背 HVDC 投入运行后, 处于整流侧的绥中电厂发电机组多次发生由逆变侧交流系统扰动导致的次同步振荡。被激发的轴系扭振幅值均能达到或超过根据扭转疲劳曲线(S-N 曲线)计算得到的疲劳累积阈值(二期机组疲劳累积阈值(高压缸转速偏差)为: 模态一: 0.48 rad/s; 模态二: 0.77 rad/s; 模态三: 1.08rad/s), 造成轴系寿命损伤。

较为典型的一次为 2010 年 10 月, 在距离高岭换流站逆变侧 400 km 以外的上承线上都侧发生单相瞬时故障, 导致了绥中电厂发电机组严重的次同步振荡现象。图 3 所示为绥中二期 3 号机组高压缸模态 1~3 的转速偏差曲线。

由图 3 可以看出, 被激发的次同步振荡具有初值高、衰减快的特点。因此, 绥中电厂的次同步振荡现象并非由小扰动电气负阻尼造成的, 而是由

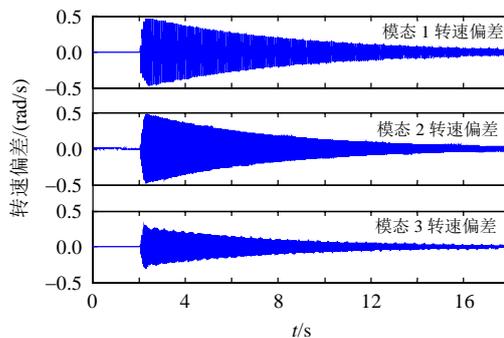


图 3 3 号机组高压缸转速偏差曲线

Fig. 3 High pressure turbine speed deviation of unit 3

HVDC 造成的大扰动暂态现象。

2 HVDC 引起次同步振荡暂态扰动现象的机理分析

2.1 逆变侧交流系统扰动下换流阀电流更替规律

下面分析逆变侧交流系统扰动下, 换流阀电流更替规律。分析中, 换流站交、直流系统参数采用高岭换流站实际系统参数。为便于研究和表述, 逆变桥换流阀编号如图 4 所示。其中, 直流电压、电流仍旧采用整流站参考方向, 即以阀 1、3、5 阳极公共端为直流电压正极, 其电流流出方向为直流电流参考方向。

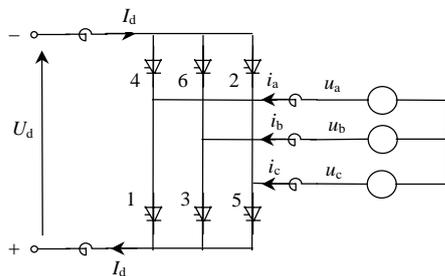


图 4 三相逆变桥原理图

Fig. 4 Schematic diagram of three-phase inverter circuit

在逆变侧交流系统设置 a 相经电抗接地故障, 使 a 相交流电压降低 10%, 故障从第 0.02 s 开始, 持续 0.05 s, 从而模拟远端瞬时故障。图 5 为故障期间主要电气量波形。其中, $u_{a,b,c}$ 为逆变侧换流变

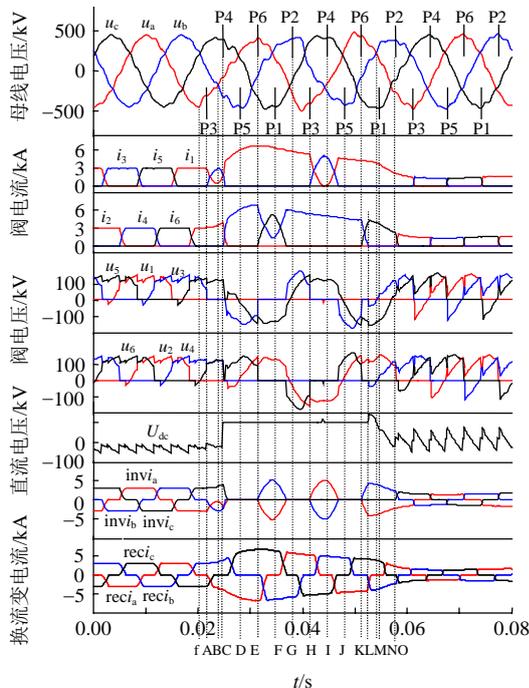


图 5 逆变侧母线电压、阀组电流、电压波形以及换流变电流波形

Fig. 5 Bus voltage, valve current & voltage, and converter transformer current curves

高压侧交流母线电压, $i_{1,2,3,4,5,6}$ 为换流阀电流, $u_{1,2,3,4,5,6}$ 为换流阀电压, U_{dc} 为逆变桥直流电压, $invi_{a,b,c}$ 为逆变侧换流变低压侧三相电流, $reci_{a,b,c}$ 为整流侧换流变低压侧三相电流。P_{1,2,3,4,5,6} 分别为阀 1~6 被触发的时刻。

如图 5 所示, 逆变侧交流系统故障时, 阀组电流更替主要包括以下几个阶段:

1) 在 0.02 秒(f 点)发生 a 相接地故障, 造成母线电压 u_a 降低并产生波形畸变。此时正处于阀 1 和阀 2 导通的状态。由于交流电压的降低, 直流电流 (i_1 和 i_2) 有所上升。

2) 在 A 时刻, 阀 3 被触发, 开始从阀 1 到阀 3 的换相过程。由于 u_a 的幅值降低和波形畸变, 加之电流幅值增加, 使得当换相电压翻转时刻 B 到来时, 没有完成从阀 1 到阀 3 的换相过程。B 时刻之后, 由于 u_a 大于 u_b , 发生从阀 3 到阀 1 的倒换相, 阀 3 电流 i_3 逐渐降低为 0。

3) 在 C 时刻, 阀 4 被触发, 开始从阀 2 到阀 4 的换相过程。换相完成后, 阀 1 和阀 4 同时导通, 直流线路经过阀 1 和阀 4 形成短路, 直流电流 (i_1 和 i_4) 迅速上升。同时逆变侧交流系统等效开路。此时的等值回路如图 6(a) 所示。

4) 在 D 时刻, 阀 5 被触发。由于此时 u_a 大于 u_c , 阀 5 承受反向电压不能导通。此时的等值回路与步骤 3) 相同, 如图 6(a) 所示。

5) 在 E 时刻, 阀 6 被触发, 开始从阀 4 到阀 6 的换相过程。由于此时距离故障发生时刻(f 点)已经半个周波时间, 直流电流增大到两倍以上。因此, 当换相电压极性翻转时(当 u_a 变化为小于 u_b 时), 未能完成换相。则发生从阀 4 到阀 6 的换相失败。因此, 从阀 6 被触发, 到阀 6 重新关闭这个阶段, 直流线路仍然通过阀 1 和阀 4 短路。同时, 换流变的 a、b 两相通过阀 4 和阀 6 形成相间短路。由于 E 时刻阀 6 被触发时 u_a 大于 u_b , 因此相间电流(即 i_{ac} , 且有 $i_{ac}=i_6$)从 a 相流向 b 相, 幅值为先增加而后逐渐减小 0。另外, 在此期间的 F 时刻, 阀 1 被触发, 而此时阀 1 本已导通, 对回路没有影响。这个阶段的等值回路如图 6(b) 所示。

6) 在 G 时刻, 阀 2 被触发。由于此时 u_c 大于 u_a , 阀 2 承受反向电压不能被导通。这个阶段的等值回路同步步骤 3) 和步骤 4), 如图 6(a) 所示。

7) 在 H 时刻, 阀 3 被触发。此时距离故障发生的 f 时刻一个周波的时间, 而控制保护系统还没有完全降低直流电流。因此, 阀 1 到阀 3 的换相过

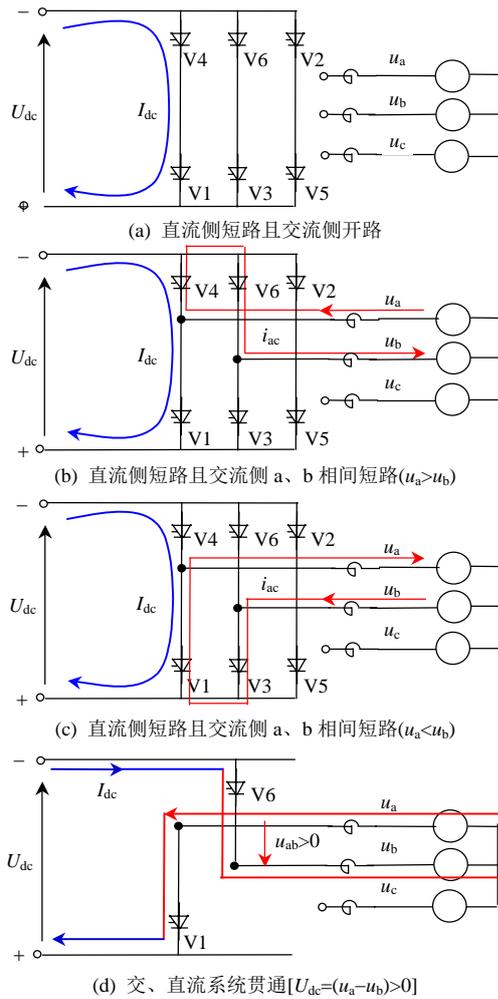


图6 换相失败时逆变桥交/直流系统等值回路
Fig. 6 AC/DC equivalent circuits of inverter bridge during commutation failure

程仍旧失败。从阀3被触发，到阀3重新关闭这个阶段，直流线路仍然通过阀1和阀4短路。同时，换流变的a、b两相通过阀1和阀3形成相间短路。由于阀3被触发时 u_a 小于 u_b ，因此相间电流(即 i_{ac} ，且有 $i_{ac}=i_3$)从b相流向a相，幅值则为先增加而后降低为0。在此期间的I时刻，阀4被触发，而此刻阀4本已导通，对回路无影响。这个阶段的等值回路如图6(c)所示。

8) 在J时刻，阀5被触发。由于此时 u_a 大于 u_c ，阀5承受反向电压不能导通。此时的等值回路如图6(a)所示。

9) 在K时刻，阀6被触发。此时距离故障时刻f有1.5个周波。控制保护功能已经将直流电流进一步降低，阀4到阀6换相成功。换相期间，直流线路仍旧通过阀1和阀4形成短路，而换流变的a相和b相通过阀4和阀6形成相间短路。这个阶段等值回路如图6(b)所示。

10) 在L时刻，即阀4到阀6换相完成的时刻。

此时，换流变b相通过阀6与直流线路负极导通，同时换流变a相通过阀1与直流线路正极导通。则此时换流变线电压(u_a-u_b)进入直流线路。并且，由于 u_a 大于 u_b ，则接入直流系统的电压是反极性的。即，正常状况下 $U_{dc}<0$ ，而此时 $U_{dc}=(u_a-u_b)>0$ 。这一过程持续到M时刻(u_a 小于 u_b 后)结束。由L到M的时间非常短暂，加之控制保护系统降低直流电流的作用，因此这个阶段直流电流不会增加，但会引起直流电压出现较大幅值的瞬间翻转。这个阶段的等值回路如图6(d)所示。由于在这个阶段交直流系统是贯通的，图中以换流阀1和6作为交直流系统的分界点。

11) 在N时刻，阀1被触发。而此时阀1已经处于导通状态。在此之后的O时刻，由于直流电流得到有效控制，从阀6到阀2的换相能够成功完成。

从上述回路电流更替规律分析可知，交流系统扰动导致的换相失败一旦发生，直流线路短路就始终存在，并且直流短路电流全部由整流侧交流系统提供。换相失败期间，逆变侧换流变大多数时间处于开路状态，如图6(a)；阶段性的存在经换流桥的两相相间短路，如图6(b)和6(c)。交流相间短路电流(i_{ac})叠加到阀电流(i_1 或 i_4)上对其幅值产生影响，但对直流线路电流 I_{dc} 没有影响。

在换相失败恢复正常的时刻，逆变侧交流线电压会短暂的进入直流系统，并且是反极性的，造成直流电压出现瞬时反极性，如图6(d)。但对直流电流基本没有影响。

2.2 HVDC 引起次同步振荡暂态扰动风险的机理分析

通过上面的电流更替规律及等值回路分析可知，在直流线路短路期间，直流短路电流全部由整流侧交流系统经过整流桥提供。交流系统通过换流阀组形成交替发生的两相短路和三相短路(换相期间为三相短路，换相结束后为两相短路)。阀组电流和换流变电流幅值接近正常值的2倍，引起整流站附近发电机组电磁转矩暂态力矩，从而瞬间激发幅值较高的次同步振荡轴系扭振。直流线路及整流侧交流系统的等值回路如图(7)所示。

3 绥中电厂次同步振荡暂态扰动现象仿真分析

3.1 交/直流系统及HVDC控制保护系统建模

3.1.1 交直流一次系统建模

交/直流系统模型包括图1所示的全部母线、线

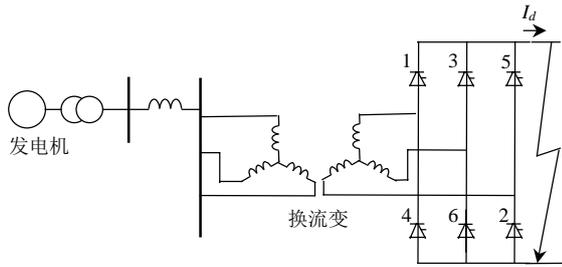


图 7 换相失败时直流线路及整流站等值回路
Fig. 7 Equivalent circuits of DC line and rectifier station during commutation failure

路、等值电源以及换流单元。绥中电厂发电机组模型包括发电机和励磁控制器等。汽轮发电机组轴系采用体现扭振特性的弹性多质量块模型。

3.1.2 HVDC 控制保护系统建模

实际 HVDC 系统的控制保护功能非常复杂,无法在仿真计算中完全再现。但其基本原理、结构和功能与现有的直流控制经典理论相一致,可以采用数字模型实现。另一方面,扰动发生时实际控制保护系统的功能触发记录表明,低压限流控制(VDCOL)和换相失败预防控制(CFPRE)功能模块被触发。因此,本文将实际系统中起作用的控制保护功能模块纳入仿真建模。

仿真模型中,整流侧采用定直流电流控制方式,逆变侧采用定熄弧角加定电流控制方式^[18-20]。在 VDCOL 控制环节参数参照文献[18-19]选取。其中,直流电压动作值的典型值为 0.3~0.45pu,本文取值 0.3;直流电流定值的典型值为 0.3~0.4pu,本文取值 0.3;启动值上限为 0.9,指令电流上限为 1。时间响应特性:直流电压下降方向(VDCOL 投入)时间常数,整流侧和逆变侧均取值 10 ms;直流电

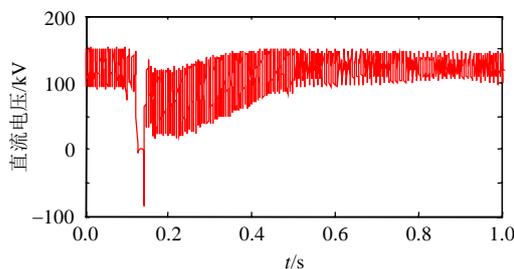
压上升方向(VDCOL 退出)时间常数取值,整流侧取值 40ms,逆变侧取值 60ms。CFPRE 环节控制参数按照文献[18-20]选取。此外,高岭换流站安装了 SSDC(supplementary subsynchronous damping control)用以提高次同步振荡发生后的阻尼水平。因此 SSDC 功能模块也纳入仿真建模。但 SSDC 不能预防由 HVDC 引起的次同步振荡暂态扰动风险的发生。

3.2 仿真分析

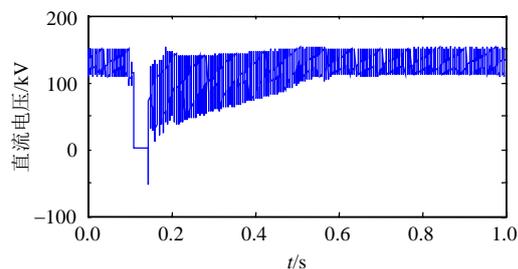
仿真模型初始状态设定为:绥中电厂发电机组满载(2×800MW+2×1000MW),高岭背靠背 HVDC 满载(2×750MW),由东北侧向华北侧输送功率,绥中电厂剩余电量(2100MW)经由高沙线输送到东北电网。

采用电磁暂态仿真工具 PSCAD/EMTDC 进行仿真。在上承线首端上都侧设置单相瞬时故障,检验仿真模型中直流系统的响应特性。在高岭换流站华北侧的网络结构和交流系统强度条件下,即使在距离逆变侧 400 km 以外的交流线路发生单相瞬时故障,造成的换流站母线电压下降(不到 10%),也已经引起了高岭背靠背 HVDC 换相失败现象,形成了严重的暂态过程。图 8 中的(a1)、(b1)、(c1)、(d1)分别为直流电压、直流电流、整流侧触发角、以及整流侧换流变 a 相电流的实际录波波形;图 8 中的(a2)、(b2)、(c2)、(d2)分别为上述四个量的仿真波形。

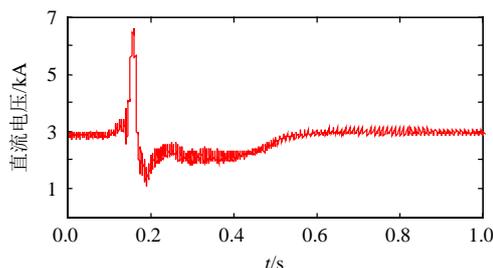
换相失败是否发生取决于交流电压降低的幅值,而降低的幅值由交流系统网络结构、系统强度和扰动类型等决定,是有前提条件的。而换相失败



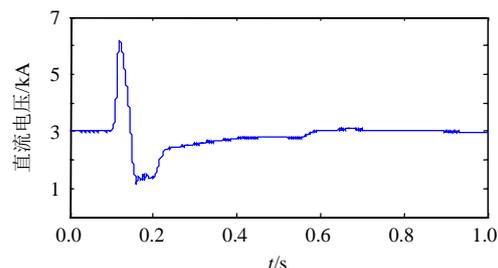
(a1) 直流电压录波波形



(a2) 直流电压仿真波形



(b1) 直流电流录波波形



(b2) 直流电流仿真波形

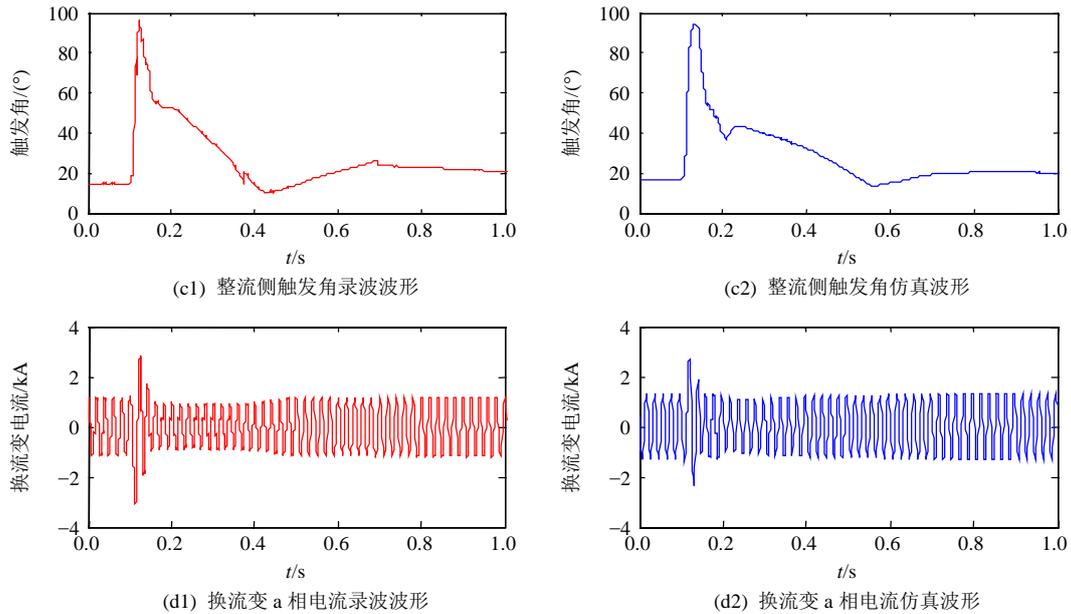


图8 录波曲线与仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of field recorded curves and simulation results

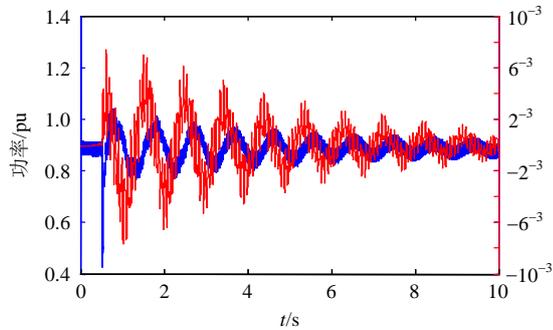
一旦发生,则必然引起整流侧机组的次同步振荡暂态扰动,是无条件的。

3.3 次同步振荡风险分析

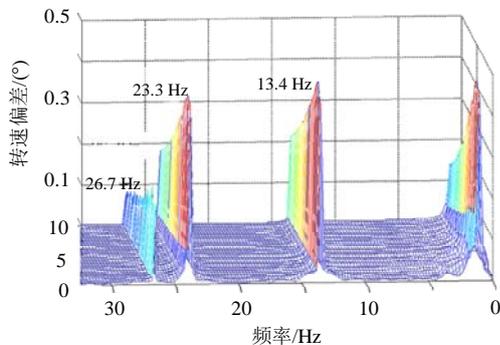
图9(a)为3号机组有功功率和发电机转子转速偏差动态响应仿真结果曲线。可以看出, HVDC故障暂态过程造成发电机功率的瞬间冲击,功率水平下降超过50%。但由于直流系统的快速恢复,故障

对发电机的功角稳定影响很小,发电机转子转速偏差不超过8% pu,并逐渐振荡衰减。

然而,发电机转子转速偏差信号包含大量次同步频率分量。图9(b)为发电机转子转速偏差频谱分析图。可以看出,轴系扭振的模式一、二、三均被激发,被激发的初值和衰减率与绥中电厂实际发生的次同步振荡轴系扭振录波基本一致。



(a) 功率和转速偏差



(b) 转速偏差频谱

图9 发电机有功功率和转速偏差曲线及转速偏差频谱
Fig. 9 Generator active power and speed deviation curves and as well as its frequency spectrum

4 结论

本文研究了由HVDC引起的次同步振荡暂态扰动风险的产生机理。首先分析了交流系统故障时逆变站换流阀电流更替规律,得到了HVDC交/直流系统等值回路。换相失败造成直流线路短路,并且短路电流全部由整流侧交流系统提供,从而造成整流站附近发电机组功率和电磁转矩的冲击,激发较大初值的轴系扭振,形成次同步振荡暂态扰动现象。采用仿真方法验证了分析结论的正确性,并仿真再现了实际系统发生的次同步振荡暂态扰动现象。

参考文献

[1] 刘振亚,张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
Liu Zhenya, Zhang Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10(in Chinese).

[2] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
Tang Guangfu, Luo Xiang, Wei Xiaoguang. Multi-

- terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17(in Chinese).
- [3] 姚忠良, 吴倩, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020. Yao Zhongliang, Wu Qian, Wang Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020(in Chinese).
- [4] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7. Liu Zhenya, Qin Xiaohui, Zhao Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7(in Chinese).
- [5] 毛涛, 乐健, 黄银龙, 等. 一种新型的高压直流输电系统交流侧谐波电压测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 796-803. Mao Tao, Le Jian, Huang Yinlong, et al. A novel AC side harmonic voltage measurement scheme of high-voltage DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 796-803(in Chinese).
- [6] 穆子龙, 李洪兵, 李志勇. 基于 PID 控制和改进粒子群优化算法的特高压直流附加次同步振荡阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(Supplement): 93-99. Mu Zilong, Li Hongbing, Li Zhiyong. Design of UHVDC supplementary subsynchronous damping controller based on PID control and improved particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(Supplement): 93-99(in Chinese).
- [7] 董飞飞, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于阻尼正弦原子分解的次同步振荡模态辨识[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 119-125. Dong Feifei, Liu Dichen, Liao Qingfen, et al. Subsynchronous oscillation modal identification based on damping sine atomic decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 119-25(in Chinese).
- [8] 李娟, 杨远红, 焦邵华. 利用环境激励下的发电机组转子动态响应识别次同步振荡模态的方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5408-5415. Li Juan, Yang Yuanhong, Jiao Shaohua. Real-time identification of subsynchronous oscillation modal parameters based on dynamic characteristics of generator rotors under ambient excitation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5408-5415(in Chinese).
- [9] 穆子龙, 王渝红, 彭灿, 等. 四川电网由高压直流输电引起的次同步振荡特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 21-25. Mu Zilong, Wang Yuhong, Peng Can, et al. Study on SSO characteristic of Sichuan power grid caused by HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 21-25(in Chinese).
- [10] 赵睿, 李兴源, 刘天琪, 等. 抑制次同步和低频振荡的多通道直流附加阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 89-93. Zhao Rui, Li Xingyuan, Liu Tianqi, et al. Design of multi-channel DC supplementary damping controller for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 89-93(in Chinese).
- [11] 李宽, 李兴源, 赵睿. 基于改进矩阵束的高压直流次同步振荡检测[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 128-132. Li Kuan, Li Xingyuan, Zhao Rui. Detection of subsynchronous oscillation in HVDC transmission system based on improved matrix pencil method[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 128-132(in Chinese).
- [12] 张鹏, 毕天姝, 杨奇逊, 等. 相近扭振频率并联发电机组次同步振荡研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5181-5187. Zhang Peng, Bi Tianshu, Yang Qixun, et al. Research on subsynchronous oscillation of parallel connected generators with close torsional frequencies[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5181-5187(in Chinese).
- [13] 吴熙, 蒋平. 基于实用稳定域的次同步振荡阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 123-129. Wu Xi, Jiang Ping. Subsynchronous damping controller design based on practical stability region[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 123-129(in Chinese).
- [14] 赵欣, 高山, 张宁宇. SVC 接入位置对次同步振荡的影响机理与 SVC 控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 107-115. Zhao Xin, Gao Shan, Zhang Ningyu. Influence of SVC location on subsynchronous oscillation and SVC control strategy research[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 107-115(in Chinese).
- [15] 徐衍会. 基于可观测与可控度的直流输电次同步振荡阻尼控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9):

- 21-26.
- Xu Yanhui. Research on HVDC subsynchronous damping control based on observability and controllability degree[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 21-26(in Chinese).
- [16] 唐酿, 肖湘宁, 李伟, 等. HVDC 附加次同步阻尼控制器设计及其相位补偿分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 1015-1021.
- Tang Niang, Xiao Xiangning, Li We, et al. Phase correction method of HVDC supplementary subsynchronous multiple models damping controller [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 1015-1021(in Chinese).
- [17] Arrillaga J. High voltage direct current transmission [M]. London: The institution of Electrical Engineers, 1998: 100-128.
- [18] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 96-102.
- Zhao Wanjun . HVDC transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electronic Power Press, 2004: 96-102(in Chinese).
- [19] Szechtman M, Wess T, Thio C V. First benchmark model for HVDC control studies[J]. Electra, 1991, 135(4): 54-57.
- [20] Zhang L D, Dofnas L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C]//Proceedings of the International Conference on Power System Technology. Kunming, China: IEEE, 2002: 51-56.



张鹏

收稿日期: 2015-10-09。

作者简介:

张鹏(1976), 男, 工学博士, 工程师, 从事电力系统分析与控制方面的研究;

毕天姝(1973), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制、广域同步相量测量技术及其应用等。

(编辑 乔宝榆)