

大规模交直流混联电网暂态特性仿真分析

为了详细研究大规模交直流混联电网中交流线路故障后对继电保护的影响,需要首先对其电气暂态特性进行深入研究。基于实测参数,在ADPSS上建立了HD地区交直流混联电网机电-电磁暂态混合仿真模型,在故障仿真的基础上研究了交流故障引起的多条直流系统换相失败期间交流系统的暂态电气特性。仿真研究结果表明,对于交直流集中落点的负荷中心,交流系统故障期间会引起局部电网电压跌落,造成相关的多条直流线路换相失败,进而引起换相失败期间交流暂态特征以及系统等效序阻抗变化,为下一步研究换相失败对交流保护的影响奠定了基础。

刘智慧 马 实/国网北京经济技术研究院
孙 瑜 王 信/国网冀北电力公司

0 引言

随着电力需求的不断增长,电网建设的不断加快,建设了大量特高压输电走廊和直流输电线路以满足大容量远距离输电的需求,在负荷中心形成了多直流落点的特征,由于各直流逆变站之间的电气距离很近,相互间作用较强,这种复杂情况从理论上很难分析交直流故障时的相互影响^[1]。为了揭示大规模交直流混联电网中交流线路故障后对电网继电保护行为的影响,建立区域电网精准的特高压交直流混合仿真模型至关重要。

在常用电力系统分析软件中,PSASP、BPA只能进行机电暂态仿真,不能进行电磁仿真,针对多条直流接入区域电网的仿真,只能对直流元件模型进行简化,无法详细分析直流系统详细动态过程^[2]。RTDS、PSCAD等软件虽可以进行电磁仿真,详细分析直流线路的动态过程,但由于该软件只能进行电磁

仿真,需要搭建区域电网所有元件电磁模型,从规模上考虑难以实现。

电力系统全数字仿真装置(Advanced Digital Power System Simulator, ADPSS)能够进行大规模机电-电磁混合仿真工程分析和应用,不仅避免了由于电磁暂态仿真规模的限制而需要的对系统进行等效的工作量,还能大大提高系统分析研究的准确度^[3]。对于研究大规模交直流混联电网将切实起到作用。因此,基于ADPSS仿真平台,构建了区域电网特高压交直流机电-电磁混合两种运行方式下4种仿真方案的仿真模型。利用搭建的机电-电磁混合模型进行了交流故障仿真模拟,并对直流换相失败期间的交流暂态特性进行了研究,为下一步研究换相失败对交流保护的影响奠定基础。

1 仿真系统的建立

1.1 区域电网的结构

区域电网主网架结构和地理结构如图1所示。整个网络在地理上覆盖JS、AH、FJ、ZJ和SH5个省网,包含5469条物理母线,663台发电机组,655台双绕组变压器,935台三绕组变压器,4845回交流输电线路(其中,6回1000kV交流特高压线路),负荷为2154,并联电容电抗为959,7条高压直流输电线路:FF、GN、LF、YH、LZ、JS和XZ,其中FF、GN、LF和YH落点在SH地区,LZ、JS落点在JS地区,XZ落点在ZJ地区。HN、WH、ZB和LT为1000kV特高



刘智慧/高级工程师

关键词/Keywords

交直流混合·
机电-电磁混合仿真·
换相失败·
暂态特性·

压站,电网A、电网B、电网C、电网D和电网E分别对应SH、JS、ZJ、AH和FJ省际电网,考虑到电网规模太大,图1中只标示了区域电网包含的特高压线路,直流落点以及省际联络线。该结构是典型的交直流混联电网结构。

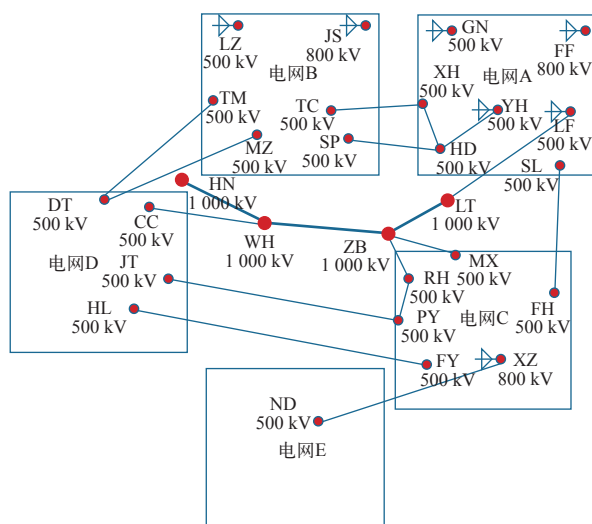


图1 区域电网结构示意图

1.2 仿真工作平台

ADPSS是由中国电力科学研究院研发的基于高性能PC机群的全数字仿真系统。对于大规模交直流输电系统的机电暂态-电磁暂态混合仿真工程,将需要详细研究的系统采用电磁暂态建模,其余相关联的系统部分使用机电暂态仿真,利用数据交互接口开展混合仿真。此种计算优势在于:不仅可模拟出电力电子设备内部的快速暂态过程,且能够兼顾仿真系统规模,使得交流电网的动态特性在机电侧实时体现,保障了计算结果的准确性^[4]。

电磁暂态仿真通常描述过程持续时间在纳秒、微秒和毫秒级的系统快速暂态特性,典型计算步长为 $50\ \mu\text{s}$;而机电暂态仿真通常描述过程持续时间在几秒到几十秒的系统暂态稳定特性,典型计算步长为 $10\ \text{ms}$ 。电磁暂态与机电暂态仿真的典型计算步长相差200倍。机电暂态网络仿真和电磁暂态网络仿真之间的数据交互必定以一定的时间间隔进行,而最短的时间间隔便是机电暂态仿真步长^[5-8]。为了减少接口带来的误差,数据交互

应以机电暂态计算步长为单位进行。例如:假设机电暂态计算步长为 $0.01\ \text{s}$,电磁暂态计算步长为 $50\ \mu\text{s}$,那么两个网络之间计算的交互每隔 $0.01\ \text{s}$ 就进行一次,即每隔 $0.01\ \text{s}$ 两个网络之间进行交互时,机电暂态网络计算了1步,而电磁暂态网络则已计算了200步。稳态情况下,进行电磁暂态网络仿真时,将系统的机电暂态网络表示成戴维南等效电路;而进行机电暂态网络计算时,与其相连的电磁暂态网络则用诺顿等效电路表示。两种仿真网络的接口模型实际上是外接等效电路参变量的计算模型,接口数据的交换方式则通过每次对上述参变量修正的时序确定^[9-12]。

1.3 区域电网机电暂态模型的建立

采用的计算数据由HD区域电网提供的BPA数据文件得出,将BPA数据转化为ADPSS需要的综合程序数据,以建立整个电网的机电暂态模型。为保证数据的可靠性,进行了潮流和稳定性校核,以保证与原始数据一致^[13]。

区域电网机电暂态仿真模型中,发电机组、 $220\ \text{kV}$ 及以上电压等级变压器和输电线路参数均与实际参数保持一致, $110\ \text{kV}$ 及以下电压等级电网系统等效为负荷(PQ节点)^[14-15]。

1.4 区域电网电磁暂态模型的建立

主要方案:电磁暂态部分主要包括 $1\ 000\ \text{kV}$ 特高压输电线路,包含其周边一级、二级站,SH地区交流电磁环网,SH地区包含的4条直流输电。具体方案:以WN、MX、RH、PY、WN、XH、HD和FH为边界的HH特高输电线路以及SH地区电磁环网和FF、GN、YH和LF直流输电网络组成电磁仿真网络,区域电网其他部分为机电暂态仿真网络进行机电电磁混合仿真;将系统分成一个机电子网,一个电磁子网。如图2所示,虚线部分为电磁暂态子网,其他部分为机电暂态子网。

电磁暂态模型是故障仿真的重点研究部分,基于网络实际参数,先建立电磁子网内的发电机以及对应的发电机控制AVR、PSS模型、升压变压器、线路和负荷等电磁暂态模型,考虑到本方案中电磁暂态仿真主要针对 $500\ \text{kV}$,对于 $220\ \text{kV}$ 的电

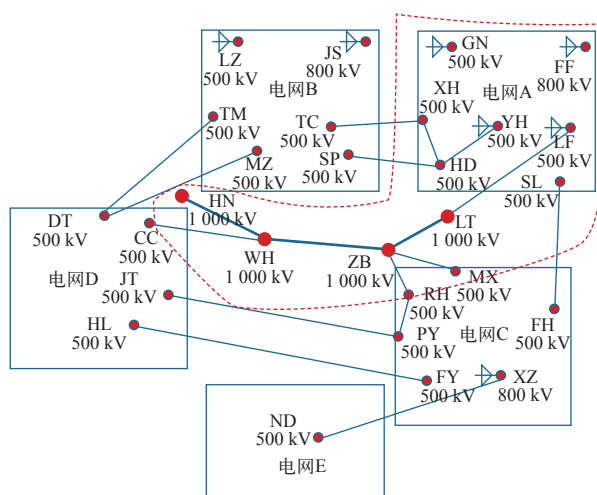


图2 机电-电磁暂态分网示意图

磁部分进行了恒阻抗负荷模型等效,即读取各个500 kV站变压器潮流,作为220 kV等效负荷的有功、无功功率值。

对于直流模型的建立,依据GN、LF、YH和FF直流输电工程的详细结构和运行参数,建立包含各换流站换流器、交直流滤波装置、直流线路以及直流控制器的详细电磁暂态模型。电磁子网示意图如图3所示,图3中包含了7个发电厂,4条直流输电和30多条交流线路。

在进行机电电磁网络划分以及电磁子网模型建立后可进行混合仿真。图4为机电-电磁接口功率变化图。在5 s前,由恒压源带仿真系统进入稳

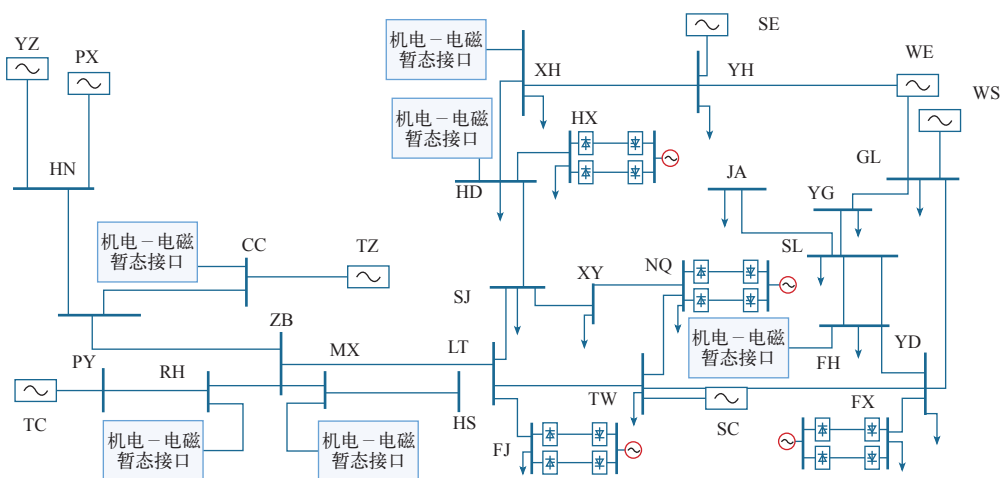


图3 电磁子网示意图

态, 5 s后切断机电—电磁接口的恒压源, 系统进入一个新的稳定状态^[16]。增加恒压源的原因是由于电磁暂态程序计算起动没有稳态, 机电—电磁暂态接口加上恒压源可以让机电—电磁都处于起

动稳态, 这样整个仿真系统更容易达到新的稳定状态^[17]。

8 s时刻施加故障, 8.1 s故障切除掉, 系统又重新恢复到稳态。

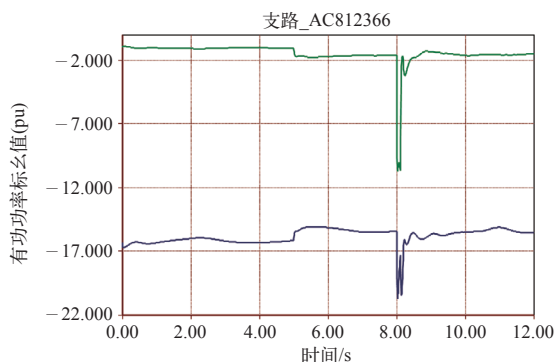


图4 机电-电磁混合仿真机电电磁接口联络线的功率

2 故障仿真及结果

交直流混合仿真模型建立后, 可以进行交流故障及直流故障的仿真。

2.1 区域电网多馈入直流输电系统交流故障仿真分析

选取电磁子网内所有的500 kV交流线路故障进行研究,故障时序遵循:8 s时故障发生,故障持续0.15 s,0.1 s时跳开故障开关,1 s后开关重合。

仿真结果表明,在特高压线路上及SH地区线路(HW线在单永故障、单瞬故障以及跨线故障除外)发生的短路故障会导致区域内的直流都发生换相失败。原因:SH地区各个直流逆变站换流母线间电气联系较强,交流线路故障时,故障点附近交流母线电压下降,由于电网结构是典型电磁

环网,整个区域的交流母线电压下降,进而导致多个直流同时或相继发生换相失败。而HW线由于与YZ、PX发电厂相邻,故障发生后在局部电源支撑下,单永故障和单瞬故障情况下未出现4条直流均换相失败的情况。具体结果如表1所示,表1中计算时间均从故障时刻计算。

表1 特高压线路故障引起的直流换相失败仿真结果

故障点	故障类型	系统稳定性	直流是否换相失败/开始时间/恢复时间/s			
			FJ	NQ	FY	HX
HW线HN侧	三永故障	稳定	是/0.005/0.19	是/0.005/0.18	是/0.005/0.06	是/0.005/0.05
	单永故障	稳定	是/0.003/0.06	是/0.003/0.06	否	否
	单瞬故障	稳定	是/0.003/0.15	是/0.003/0.17	否	否
	两相相间故障	稳定	是/0.008/0.05	是/0.008/0.16	是/0.008/0.05	是/0.008/0.05
	两相接地故障	稳定	是/0.007/0.15	是/0.007/0.05	是/0.007/0.06	是/0.007/0.06
	跨线故障	稳定	是/0.004/0.06	是/0.004/0.06	是/0.004/0.04	否

2.2 直流换相失败时交流系统暂态特性

从以上的仿真分析得到,一旦交流线路故障将引发SH区域电网内的直流均发生换相失败,以下将从交流电气暂态特性上来分析直流系统换相失败对交流系统的影响。

2.2.1 谐波分量和非周期分量特征

仿真中设置500 kV南亭的南桥逆变站出口发生三相故障,故障持续时间为0.1 s。如图5所示,此次故障初始枫泾逆变站即发生换相失败,关断角 γ 跌落为0,直至100 ms后故障清除时,才恢复正常。

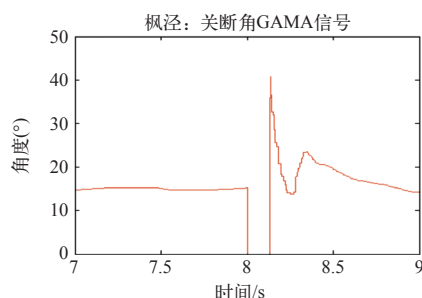


图5 南亭线三相故障期间直流逆变站关断角变化

图6为换相失败期间枫泾逆变站交流侧电压电流波形。由图6可见,电压幅值下降波形仍近似对成正弦分量,而电流波形则呈现为不规则毛刺形,且幅值很低并偏于零轴一侧,与纯交流系统

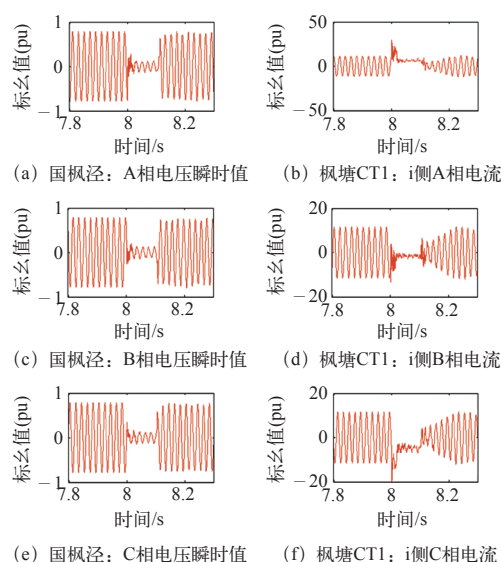


图6 南亭线三相故障期间枫泾逆变站交流量

故障特征差异很大,可以推断该差异主要由换相失败导致。

为进一步明确此期间的电气量波形特征,采集FJ逆变站交流侧出口0~60 ms内的电压电流进行频谱分析。频谱分析结果如图7所示。远端交流故障导致的直流逆变站换相失败发生期间,电压分量中基波分量最大,同时存在一定的整次谐波与分数次谐波,且0~7次各谐波幅值相近,约占基波分量的10%~20%,谐波特征相对不明显。而电流分量中谐波分量则较为严重,除非周期分量外,

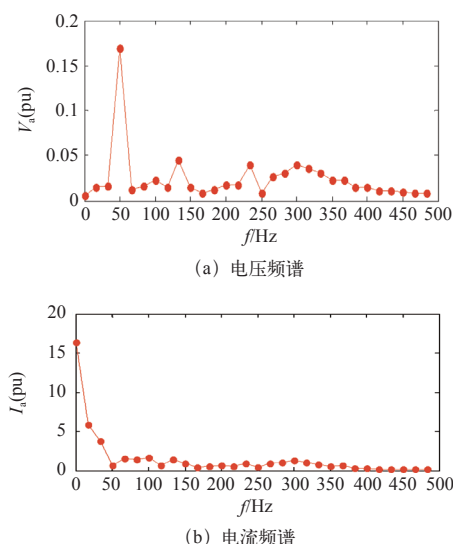


图7 南亭线三相故障期间枫泾逆变站交流侧电气量频谱

幅值最大的是低于50 Hz的低频分数次谐波，约为基波电流的7~10倍，此外1~7次之间的各频率谐波幅值也均大于基波。

除不同次谐波外，交流系统故障导致的直流逆变站换相失败还激生出非周期分量。其中，电压量的变化规律如图8a所示。故障发生后电压基波分量下降为0.18，而电压非周期分量出现两次波动，该波动与换流器具体控制措施有关，非周期分量整体相对较小。电流量变化规律如图8b所示。由图8b可见，换相失败期间，电流非周期分量数值很大（是基波分量的数倍），且不能完全衰减，可能对保护造成一定影响。

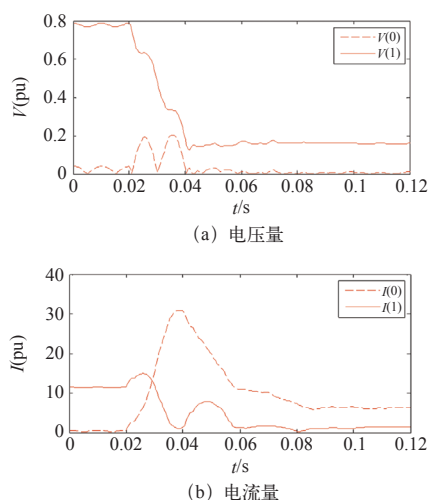


图8 南亭线三相故障期间枫泾逆变站交流侧基波分量与非周期分量变化情况

综上所述，与换相失败有关的谐波特征可总结如下。外部交流系统故障导致的换相失败产生的谐波分量和非周期分量较大，尤其在电流量中的要远大于基波分量，这一特征与传统纯交流系统故障有较大差异，并且随故障点位置不同具有很强的变动性。

2.2.2 阻抗特征

目前的继电保护理论均假定正序、负序阻抗是相等的。然而对于交直流混合输电系统，构成换流器和控制系统的电力电子器件具有非线性特性，且电力电子器件的动作速度很快，其激发的动态特征有可能会影响继电保护装置在故障暂态过程中感受到的各序阻抗，并进一步对保护动作产生影响。此处即着重分析换相失败过程中交流侧感受到的阻抗特征，以明确其对继电保护的影响。

图9为简化的局部电磁子网图。在华渡线的练塘端出口设置A相接地故障，故障持续时间为100 ms，期间枫泾逆变站发生换相失败。在此情况下，分析练塘端和枫泾端的各序阻抗特征。

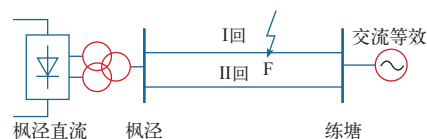


图9 简化的局部电磁子网图

(1) 练塘端

练塘端背侧为大系统，对其各序阻抗进行仿真计算。三序故障分量电流幅值如图10所示。由图10可见，在单相故障期间正序故障分量与负序故障分量基本相等，零序分量略小于前二者。

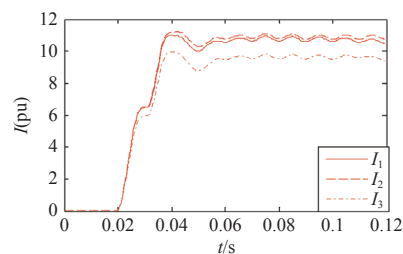


图10 练塘端出口A相故障期间练塘端各序故障电流幅值

背侧系统三序阻抗仿真结果如图11所示。由图11可见，练塘背侧系统正负序阻抗幅值基本相

等,而相角正序阻抗接近 90° ,负序和零序阻抗接近 80° ,虽然在角度上正序阻抗和负序阻抗稍有差异,但均在理想值附近,考虑到练塘背侧大系统运行方式及特征的复杂性,该差异属于正常范围。

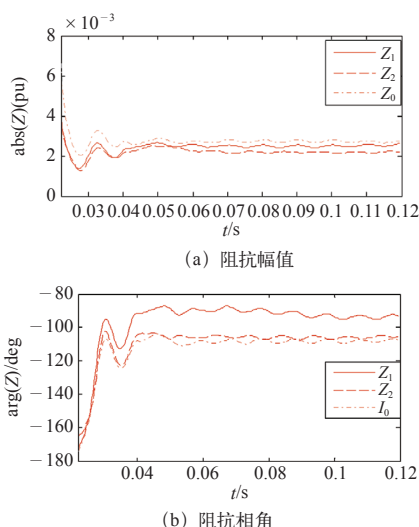


图11 练塘端出口A相故障期间练塘端各序阻抗

(2) 枫泾端

枫泾端背侧为宜华直流的枫泾逆变站,此次交流单相故障期间枫泾逆变站发生换相失败。在此情况下测量枫泾端三相故障电流,如图12所示。由图12可见,在单相故障期间,逆变站出口交流线路的三序故障电流特征迥异,其中正序故障分量和零序故障分量相差不大,而负序分量不仅幅值远小于前者,且其波形在故障后40 ms内出现了一次大幅抖动,可以判断该特征是由受逆变站换相失败的动态过程所导致。

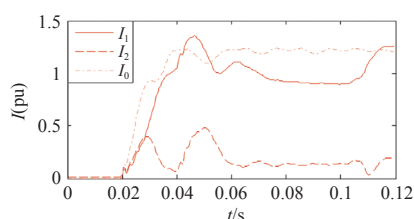


图12 练塘端出口A相故障期间枫泾端各序故障电流幅值

背侧逆变系统三序阻抗仿真结果如图13所示。由图13可见,枫泾背侧系统正负序阻抗幅值差异很大,其中负序阻抗表现出显著的波动特征,且幅值远大于正常范围。相角方面,正序阻抗近似呈现为纯电阻特征,负序阻抗呈现为容性

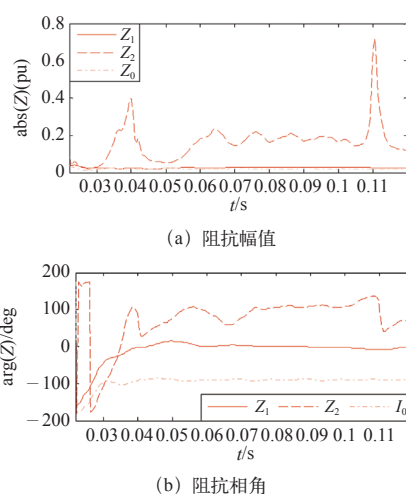


图13 华渡线练塘端出口A相故障期间枫泾端各序阻抗

特征,此二者与通常交流系统表现的特征截然不同。仅零序阻抗在幅值和相角两方面均为正常范围,这主要是由于换相变压器对零序分量具有阻隔作用,使逆变侧换相失败未对零序造成影响。

通过以上分析可以得到如下结论。交流系统发生故障时,靠近大系统侧的各序阻抗特征均与纯交流系统相近;交流系统发生故障时,会导致临近的直流逆变侧发生换相失败,由于换相失败过程具有强非线性特征及快速的动态控制措施,使逆变站侧的等效正负序阻抗表现出与交流系统迥异的特征,且经大量仿真发现,这一特征受故障点位置及故障类型影响较大,并表现出较强的随机性。而零序阻抗由于有换相变压器的存在,其等效网络不受直流系统的影响,因此其幅值及相角均符合典型特征。

3 结束语

基于ADPSS仿真平台,利用搭建的HD区域电网机电-电磁混合模型进行了交流故障仿真模拟,交流故障会引发区域内直流系统的换相失败,会在交流系统中产生显著影响,在换相失败故障发生期间,交流系统的电流中会产生较为严重的谐波分量及非周期分量;从交流侧看向直流系统的等效阻抗与传统纯交流系统阻抗特征存在很大差异,正负序阻抗不再保持相等,其相角会发生畸变,呈现出电阻性甚至纯电容性特征,而

零序阻抗则基本不受影响。这些仿真特征为下一步研究换相失败对交流保护的影响奠定了基础。

参考文献

- [1] 陈磊, 张侃君, 夏勇军, 等. 基于ADPSS的高压直流输电系统机电暂态-电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 136-142.
- [2] 于占勋, 朱倩茹, 赵成勇, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(一)含直流馈入的山东电网EMTDC建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 58-64.
- [3] 唐宝锋, 孙运利, 范辉, 等. 基于ADPSS的线路保护数字建模方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 66-71.
- [4] 朱旭凯, 周孝信, 田芳, 等. 基于电力系统全数字实时仿真装置的大电网机电暂态-电磁暂态混合仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 26-31.
- [5] 郭小江, 邵瑶, 周勤勇, 等. 多馈入直流地区电网安全稳定研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [6] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [7] 徐政, 蔡晔, 刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 4-8.
- [8] 邵震. 高压直流系统换相失败对交流侧继电保护的影响[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1): 77-80.
- [9] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [11] 岳程燕, 田芳, 周孝信, 等. 电力系统电磁暂态机电暂态混合仿真接口实现[J]. 电网技术, 2006, 33(4): 6-10.
- [12] 张晋华, 蒋卫平, 印永华. 特高压规划电网安全稳定研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 64-68.
- [13] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [14] 卢睿. 多馈入直流对华东电网稳定性影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [15] 卫鹏, 汪成根, 周前, 等. 基于ADPSS的锦苏特高压直流接入的江苏电网机电-电磁混合建模与仿真[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 20-25.
- [16] 柳勇军. 电力系统机电暂态和电磁暂态混合仿真技术的研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [17] 高翔, 高伏英, 杨增辉. 华东电网因直流故障的频率事故分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 39(12): 102-107.
- (收稿日期: 2015-06-05) EA
- (上接第21页)
- [10] 徐琼璟, 徐政. 基于PSS/E的动态无功补偿装置机电暂态仿真模型[J]. 南方电网技术, 2008, 2(5): 39-42.
- [11] 马幼捷, 张继东, 周雪松, 等. 特征结构分析法对风电系统静态电压稳定的研究[J]. 中国电力, 2008, 41(3): 87-92.
- [12] 韩光, 丁晓群, 侯学勇. 考虑负荷类型和发电机节点的模态分析[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 1-4.
- [13] 姜一涛, 毛王清, 杨明玉. PV曲线与模态法联合应用分析电网静态电压稳定性[J]. 电网技术, 2014, 42(12): 1-4.
- [14] 牛朋超. 基于模态分析理论的电力系统电压稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [15] 肖盛, 张建华, 郭世繁. 基于模态法的静态电压稳定性分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 26(6): 1-4.
- [16] 侯晨伟, 陈丽. 确定电网电压薄弱区域分析方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2012, 38(3): 1-6.
- [17] 刘冀生, 严凤, 韩金铜, 等. 一种利用静态稳定分析确定电压薄弱区域的方法[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(9): 1-5.
- (收稿日期: 2015-07-10) EA