

交直流电网故障暂态功率倒向解析

李晓华¹, 蔡泽祥¹, 黄明辉², 刘之尧², 李一泉²

(1. 广东省绿色能源技术重点实验室, 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510641;

2. 广东省电力调度中心, 广东省广州市 510600)

摘要: 针对交直流电网出现的暂态功率倒向现象而导致继电保护误动的问题,从继电保护的视角出发,在电磁暂态时间框架下研究交直流系统相互影响机理和交流故障特征的变异机理,提出在换相失败电磁暂态过程的解析分析、特征变异对保护性能的影响评估方法和评价指标,进而给出了交直流混合电网界定暂态功率倒向的计算模型和方法。交直流系统相互作用而引发的暂态功率倒向是由交流故障和直流系统快速变化引起的2个不同扰动源同时作用于电网元件,且满足一定电气和时序条件下“竞争”的必然结果。仿真结果验证了所述模型和方法的正确性。

关键词: 交直流混合系统; 继电保护; 电磁暂态; 暂态功率倒向; 故障特征变异; 电气竞争; 时序竞争

0 引言

随着国内“西电东送,南北互供,全国联网”电网发展战略的全面实施,交直流混合电力系统的格局已在华东、华中、华南电网中形成。这种交直流并重的输电模式,其工作机理、运行方式、故障电气特征与传统交流电力系统有很大差异。理论分析和实践经验表明:直流输电系统中的逆变器对受端交流系统的故障相当敏感,与逆变站在物理距离很远的交流故障都有可能引起直流系统的换相失败。直流控制系统非线性的快速响应,特别是换相失败及其恢复过程中直流输电系统电气量的快速变化给交流系统带来巨大冲击,对纯交流系统中继电保护设计时所考虑的工况和时序配合关系提出了挑战。迄今为止,国内电网中已出现多次由于直流换相失败引起的交流保护误动事故^[1-4],充分暴露出:传统基于局部开环控制的继电保护在当前交直流互联系统运行条件下存在安全隐患。

现有研究多限于对某次特定故障的定性分析,并且将直流换相失败引起的保护误动问题解释为谐波问题。实际上,这仅仅是对故障波形畸变现象一种形式上的理解。交直流电网故障响应的复杂非线性特征,超越了现有常规的基于工频特征量的保护分析方法的适用范围。因此,迫切需要引入新的研

究思想和分析方法,从理论上揭示复杂交直流混合大系统中引发保护误动特征变异发生的机理和条件。

本文从继电保护的视角出发,在扰动后的电磁暂态时间框架内深入分析交、直流系统的相互作用机理,提出在换相失败电磁暂态过程的解析分析、特征变异对保护性能的影响评估方法和评价指标,进而给出了交直流混合电网界定暂态功率倒向的计算模型和方法。

1 暂态快速功率倒向问题的提出

1.1 纯交流系统功率倒向的内涵

目前,高压及超高压线路普遍配置了纵联方向元件。其中变化量方向元件由于不受负荷和振荡的影响且灵敏度高,应用较广泛^[5-7]。

对于变化量网络而言,仅在扰动点处存在变化量电源。当系统中只存在一个故障点时,遵循反方向元件灵敏度优于正方向元件灵敏度的原则的突变量方向保护能准确、可靠地判别故障点位置。事实上,对于纯交流输电系统也可能出现多个故障电源叠加的情况,如被保护线路的正反方向均发生雷击事故。此时由于正反方向故障电源的叠加作用,变化量方向元件的正确判别会受到影响。但从简化逻辑、提高可靠性的角度出发,传统继电保护设计一般不考虑2个电气无关联关系的故障源同时发生的情况,即忽略2个小概率事件叠加的这种复故障。

考虑到保护判别的连续性,当出现存在时序关联的电气变化时,必须重点解决数据窗跨扰动前后

时保护判别的可靠性。例如:必须保证方向元件在区外故障线路两侧开关不同时跳开时不会误动作。这也就是传统意义上的功率倒向。考虑到开关动作时间不会太快,因此,一般方向纵联保护采用启动元件动作经过一段时间(如 40 ms)后尚未跳闸,就认为是外部故障,延迟方向纵联保护的動作时间以躲过功率倒向过程。

1.2 暂态快速功率倒向的概念与特点

若受端交流电网故障引起直流换相失败,从整个电网的角度来看,则相当于出现了复故障^[4]。为了与传统功率倒向区分开,本文将这种由直流系统对交流系统故障的暂态响应引起的输电线路电流方向快速改变,定义为暂态功率倒向。

常规直流输电系统中,逆变器必须在受端交流系统提供的换相电压支持下才能正常工作,因此对受端交流系统的故障相当敏感。在电气联系较紧密的电网中,距离直流逆变站很远的交流线路故障都有可能引起直流换相失败故障。目前,国内电网 500 kV 主网架的环网,特别是双环网结构使得电网各点间的电气距离大为缩小,因此,在更大的地理范围中的交流故障均有可能导致直流换相失败的发生,甚至会出现多个直流同时或相继换相失败。

与纯交流电网故障不同,直流换相失败有如下特点:①直流工作特性决定了其工频周期内对交流系统表征为两相短路与三相开路快速交替变化的一种特殊复故障;②在逆变侧交流故障则可能引起直流系统发生 1 次换相失败或连续 2 次换相失败,这 2 种换相失败类型在交流侧表征出故障类型的时间特性也具有差异性;③直流控制作用下暂态过程中电量变化具有复杂性;④直流恢复具有快速性,与交流故障切除不具有同时性。

从大量的电网运行统计数据和研究来看,这种特殊形式的复故障已成为当前受端交流电网故障后的一种常态模式。但出现引发保护不正确动作的暂态功率倒向仅在某种特定条件下才会被激发。本文把这种特殊情况对继电保护的不利影响,理解为故障特征出现了变异性。值得注意的是,这些事故无论是电网结构、故障类型、故障位置及电网潮流分布等因素均不同。充分暴露出这一问题不仅表征在某个特定换流站、变电站或某次事故中,更是在新的电网运行环境下出现的新问题。

2 暂态功率倒向的时空特性分析

直流系统对交流系统故障的响应特性完全突破了纯交流系统故障的模式,使得具有特殊电气关联关系的复故障成为可能。这种复故障不但突破了原

有纯交流系统复故障的电气关联模式,而且突破了传统故障分析区域的限制。

在深入分析和理解继电保护工作机理的基础上,本文将“竞争”的概念引入保护分析中,认为继电保护区外故障误动、区内拒动是满足一定电气和时序条件下存在竞争关系的 2 个不同扰动源(如本文所分析的直流控制响应与交流故障)同时作用于电网元件的必然结果。这种全新的分析视野将有助于从电网全局角度分析交直流系统故障特征变异的机理和产生条件。

2.1 扰动下直流系统动态特性分析

从本质来看,直流输电系统只是相比与交流输电系统不同的输电形式,其传输的仍然是功率。从这个角度,直流输电并没有特别增加不同的电气特征量。交直流互联引发的电气特征变异是由直流系统的特殊性所决定的。

正常情况下,整流侧通过触发角调节维持直流功率或电流恒定,逆变侧则通过维持直流电压或关断角恒定来控制直流电压。当发生扰动或故障时,直流控制系统应尽量使直流功率或直流电流稳定在设定值。根据调节方式,对于逆变侧交流系统而言,如图 1 所示,直流系统可以等效为一个由换流变压器交流侧母线电压控制的可控电流源。

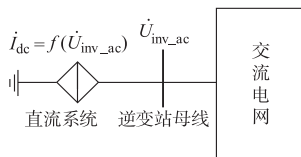


图 1 直流系统的等值交流外特性分析模型
Fig. 1 AC external characteristic equivalent analysis model of HVDC system

当直流系统发生扰动时,直流系统在控制作用下产生“持续的快速动态变化”,使得等值电源表现出快速性和复杂性。但控制的影响总可以看做是直流系统等效电源的变强或变弱,甚至投入或退出。另外,从时间尺度上又可以分为快速变化和慢速变化 2 种。对直流系统的慢速变化,如直流的启动、停止或在正常运行中,直流系统调节功率的幅度和速度都较慢,对交流系统的影响主要表现为功率的逐渐变化,相对保护来讲是比较缓慢的,对保护的影响比较小。对直流系统的快速变化,如换相失败、单极闭锁、双极闭锁、直流故障及其重启、丢触发脉冲等。其中,电量变化最快速和最剧烈的是换相失败及恢复这一暂态过程。

直流发生换相失败时,由于同一桥臂的 2 个阀同时导通,从而形成直流侧短路,此时逆变器输出到

交流侧的电流为 0,即相当于交流侧三相断路,因此,在该时间段内相当于等效电流源由正常时的值突变为 0。从分解与叠加的角度来看,直流系统换相失败相当于交流系统瞬时损失了一个电流源;直流系统换相失败后的恢复过程相当于交流系统瞬时投入了一个电流源。

由于在交直流输电系统的相互作用下,控制系统调节作用很难用数学或理论公式精确计算其电气量的变化规律。但从保护的角度,更关心电气量变化的最极端情况。换相失败后造成直流短路,直流电流迅速增大,但因直流控制系统的迅速响应,即使在直流控制系统响应之前的极短时间内,由于线路平波电抗器的抑制作用,直流电流的增长也是有限的。从这个意义来说,直流系统换相失败时注入交流系统的附加电气量的扰动强度是有限的。从大量实际故障录波、实时数字仿真器(RTDS)仿真结果和 EMTDC 仿真结果中可看出,额定功率情况下换相失败逆变器的阀侧三相电流的最大幅值均在直流额定电流的 2 倍以下。

2.2 交直流混合电网故障分析方法

由叠加原理可知,故障后扰动量大小可将交流系统网络结构保留,所有电源置零,由故障点加入等值电源作用。根据上述分析,直流系统的影响可在逆变站母线增加直流等值注入电流源。因此,考虑交流系统单重故障下直流控制保护动作对交流电网中任意节点电压和回路电流的影响,可用图 2 所示的故障网络进行分析。

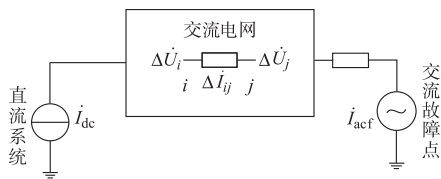


图 2 交流故障计及直流控制响应的故障分析网络
Fig. 2 Fault analysis network including both AC fault and HVDC control response

无论故障具体位置在何处,由故障叠加原理可知:故障后节点 i 电压突变量是由交流故障点电流 i_{acf} 和直流系统等值电流源 i_{dc} 共同作用的结果;非故障线路上电流取决于两侧母线电压变化及线路阻抗的大小。即网络节点的电压和电流变化量为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_i = Z_{i,dc} \dot{i}_{dc} + Z_{i,acf} \dot{i}_{acf} \\ \Delta \dot{U}_j = Z_{j,dc} \dot{i}_{dc} + Z_{j,acf} \dot{i}_{acf} \\ \Delta \dot{I}_{ij} = \frac{\Delta \dot{U}_i - \Delta \dot{U}_j}{z_{ij}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Z_{i,dc}$, $Z_{i,acf}$, $Z_{j,dc}$, $Z_{j,acf}$ 分别为直流逆变站和故

障点对交流网络中母线节点 i 和 j 的互阻抗; $\Delta \dot{U}_i$ 和 $\Delta \dot{U}_j$ 分别为母线节点 i 和 j 的电压突变量; $\Delta \dot{I}_{ij}$ 为线路 (i,j) 的电流突变量。

2.3 故障变异的电气条件

对式(1)进行适当变形,有

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{ij} &= \frac{1}{z_{ij}} [(\Delta Z_{i,dc} \dot{i}_{dc} + Z_{i,acf} \dot{i}_{acf}) - (Z_{j,dc} \dot{i}_{dc} + \\ &Z_{j,acf} \dot{i}_{acf})] = \frac{1}{z_{ij}} [(Z_{i,dc} - Z_{j,dc}) \dot{i}_{dc} + \\ &(Z_{i,acf} - Z_{j,acf}) \dot{i}_{acf}] = \frac{1}{z_{ij}} (\Delta \dot{U}_{ij,dc} + \\ &\Delta \dot{U}_{ij,acf}) = \Delta \dot{I}_{ij,dc} + \Delta \dot{I}_{ij,acf} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\Delta \dot{U}_{ij,dc} = (Z_{i,dc} - Z_{j,dc}) \dot{i}_{dc}$, $\Delta \dot{U}_{ij,acf} = (Z_{i,acf} - Z_{j,acf}) \dot{i}_{acf}$, $\Delta \dot{I}_{ij,dc} = \Delta \dot{U}_{ij,dc} / z_{ij}$, $\Delta \dot{I}_{ij,acf} = \Delta \dot{U}_{ij,acf} / z_{ij}$ 分别为直流逆变站和故障点对交流网络中线路 (i,j) 的电压和电流变化量。

因此,故障后交直流故障分量电流对交流电网中母线电压影响要能使交流系统故障性质产生变异,必须两者在幅值上相当、相位相反。不妨定义故障交直流扰动比 $k_{dc/ac}$ 为:

$$k_{dc/ac} = \left| \frac{\Delta \dot{I}_{ij,dc}}{\Delta \dot{I}_{ij,acf}} \right| = \left| \frac{(Z_{i,dc} - Z_{j,dc}) \dot{i}_{dc}}{(Z_{i,acf} - Z_{j,acf}) \dot{i}_{acf}} \right| \quad (3)$$

考虑到直流在整个暂态过程中电气量的波动,能发生故障变异必须 $k_{dc/ac} \geq 1$ 。这样利用式(3),可以对大电网进行短路计算,满足此电气条件的区域可能会出现暂态功率倒向,即可对可能出现暂态功率倒向的区域进行评估分析。

根据线路所连接母线与交流故障点、直流逆变站之间电气距离的远近,可以将系统中所有母线分为 4 种情况,如表 1 所示。

表 1 线路两侧母线与交流故障点、直流逆变站的电气关系
Table 1 Two terminal electric distance of the line from the AC fault point and HVDC inverter station

情况	母线 i	母线 j
1	靠近直流逆变站 靠近交流故障点	背离直流逆变站 背离交流故障点
2	靠近直流逆变站 背离交流故障点	背离直流逆变站 靠近交流故障点
3	背离直流逆变站 靠近交流故障点	靠近直流逆变站 背离交流故障点
4	背离直流逆变站 背离交流故障点	靠近直流逆变站 靠近交流故障点

根据故障网络可知,距离交流故障点电气距离越近的节点,故障对其母线电压影响越大;而距离直流换流母线电气距离越近的节点,直流换相失败及其恢复对其母线电压影响越大。若直流和交流故障

点对线路两侧母线的电气距离远近性质相同(情况 1 和 4),则故障暂态过程中两者的竞争一般不会引发暂态功率倒向。反之,若故障后直流和交流故障点对线路两侧母线的电气距离远近性质相异,则故障暂态过程中两者的竞争可能引发暂态功率倒向,即当一条线路所连接两端母线出现一个距离故障较近而另一个距离直流逆变站较近时(情况 2 与 3),在交流系统故障引发直流系统换相失败时,交流故障点和直流电流属于竞争关系,在此过程中可能引起区外故障误动、区内拒动。

2.4 故障变异的时序条件

由 2.3 节故障变异的电气条件,在当前交流受端电网的支撑强度下,要发生故障变异只能是直流站近端的非严重故障或远离直流站故障。此时交流故障发生引发直流换相失败,交流故障切除前直流换相就已恢复。此情况下交直流行为可分为以下 4 个不同阶段。

阶段 1:交流系统发生故障尚未引起直流换相失败。此阶段中故障性质完全由交流系统故障决定,保护能正确判别。

阶段 2:交流系统故障引发直流换相失败。此阶段中直流换相失败与交流故障点属于故障性质相互竞争的关系,可能引起保护区外故障误动、区内故障拒动。

阶段 3:直流换相失败后恢复过程。此阶段中直流换相恢复与交流故障点属于故障性质相互加强的关系。在此过程中保护能正确判别。

阶段 4:交流故障点切除。此阶段中故障性质完全由交流系统故障决定,保护能正确判别。

此时系统扰动与保护判别情况的时序逻辑如图 3 所示。

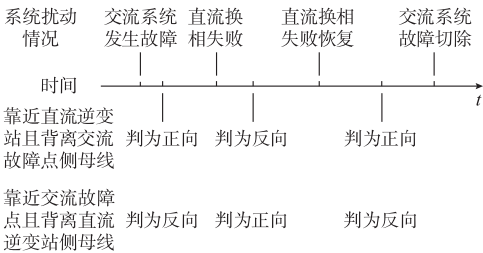


图 3 交直流相互作用故障保护误动时序分析图
Fig. 3 Time sequence of protective relaying maloperation with AC/DC interaction

从继电保护的角度看,分析交流系统故障时刻到直流系统换相失败发生对交流系统产生作用的时间间隔是必要的。

1)情况 1:如果时间间隔较长,大于保护的判别时间,则在故障初始阶段保护判别故障所获取的电

气量完全由交流故障产生。此时,方向元件判别的灵敏度取决于交流故障的严重程度以及保护安装点距离故障点的远近。

2)情况 2:如果时间间隔很短,小于保护的启动时间,则保护判别故障所获取的电气量完全由交流故障和换相失败共同作用产生。

3)情况 3:如果时间间隔介于两者之间,则保护判别故障所获取的数据窗数据将有一部分是换相失败前的,而有一部分是换相失败后的,即数据窗由突变前后的数据组成。

其中第 3 种情况对保护影响最大。此时两侧保护数据窗包含了短路故障电流倒向前后的双重叠加数据。计及现场两侧电流互感器变比不同造成两侧启动灵敏度不同,以及通道命令有延时展宽等因素,可能造成两侧突变量反方向判别失效或启动滞后,进而引发在交流故障量不大时的非故障线路保护误动。

从以上对故障变异时序的分析可知:如果方向元件的延时能躲开暂态功率倒向,保护也不会误动。这实际上从延时配合的角度,给出了突变量方向元件正反方向元件防止暂态功率倒向的基本策略。

3 2 次典型故障的实例分析

3.1 2003 年北涌乙线误动事件分析

广州西北片网中 220 kV 北涌甲、乙线是同杆并架双回线,全长约 34 km。2003 年 6 月 27 日,北涌甲线 B 相线路距北郊变电站约 14 km,遭雷击发生单相接地故障。直流逆变站换流失败引起非故障的北涌乙线两侧高频突变量方向保护动作。

表 2 给出了直流和交流故障点对北郊站 220 kV 母线、罗涌站 220 kV 母线的互阻抗的标幺值(取 $S_B = 100 \text{ MW}$, $V_B = V_{avr}$, 下同)。可以看出:从电气距离的角度,北郊站靠近直流逆变站背离交流故障点,而罗涌站背离直流逆变站靠近交流故障点。

表 2 线路两侧母线与交流故障点、直流逆变站的电气关系 (北涌乙线误动)

节点	节点互阻抗	
	北郊站 220 kV 母线	罗涌站 220 kV 母线
交流故障点: 北涌甲线(距北郊站端 14 km)	0.004 3	0.004 6
直流逆变站: 北郊站 220 kV 母线	0.005 0	0.003 0

由表 2 可知,此次故障位置十分特殊:故障点在平行双回线靠近功率分点处,使得故障点距离非故障线路物理距离很近,但感受到的交流故障电量不大^[2]。这是电网中非故障线路上故障分流最小的一种极端情况。

考虑到 2003 年天广直流短路比约为 5,故障点靠近直流逆变站,因此,近似认为交流故障电流为直流额定电流的 5 倍。此时交直流扰动之比为:

$$k_{dc/ac} > \left| \frac{(0.005\ 0 - 0.003\ 0) \times 2}{(0.004\ 3 - 0.004\ 6) \times 5} \right| > 1 \quad (4)$$

因此由 2.3 节可知,北涌乙线满足了故障暂态过程中交直流电气竞争引起区外故障误动的条件。故障引发直流系统换相失败,使得非故障线路误动。

3.2 2005 年横东甲乙线误动事件分析

2005 年 12 月 15 日惠州下级 220 kV 出线惠三甲线在距惠州 4 km 处发生 AB 相间短路故障,三广直流系统换相失败,500 kV 线路横(沥)一东(莞)甲乙线东莞侧保护动作。

表 3 给出了直流和交流故障点对博罗站、横沥站、东莞站、惠州站、花都站的互阻抗情况。从电气距离的角度可以看出:横沥站靠近直流逆变站背离交流故障点;而东莞站背离直流逆变站靠近交流故障点。

表 3 线路两侧母线与交流故障点、直流逆变站的电气关系 (横东四甲乙线误动)

节点	互阻抗			
	博罗站	横沥站	东莞站	惠州站
交流故障点:惠三甲线 距惠州站端 4 km	0.001 3	0.001 2	0.001 3	0.002 1
直流逆变站: 鹅城站 500 kV 母线	0.003 0	0.001 9	0.001 5	0.001 3

根据短路电流计算程序,可得故障点短路电流折算到 500 kV 后,与三广直流额定电流之比为 1.7,因此交直流扰动之比为:

$$k_{dc/ac} > \left| \frac{(0.001\ 9 - 0.001\ 5) \times 2}{(0.001\ 2 - 0.001\ 3) \times 1.7} \right| > 1 \quad (5)$$

因此,由 2.3 节可知,横东甲乙线满足了故障暂态过程中交直流相互竞争引起区外故障误动的条件。

4 仿真验证测试

为检验交直流系统中暂态功率判别的有效性和普适性,利用直流控制保护设备与 RTDS 连接构成实时闭环交直流互联电网仿真系统进行测试。其中:RTDS 负责完成仿真一次系统,而直流控制保护

系统采用与现场的三广直流完全一致的控制保护功能与逻辑。本测试系统以 2007 年广东电网参数为基础,模拟三广交直流输电等值系统,网络拓扑结构如图 4 所示。各交流等值系统采用利用内阻抗模拟其等值系统强度的电压源模拟。

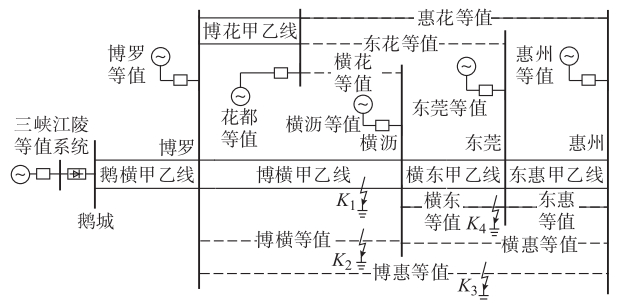


图 4 交直流混联系统模型拓扑结构
Fig. 4 Framework of San-Guang AC/DC integrated power system simulation model

2005 年 12 月,博横至花都甲乙线尚未投产,三广直流短路比为 7.5;而到 2007 年 500 kV 花博甲乙线投产后,短路比上升为 10.1,逆变站的电源支撑能力加强。为在实时闭环仿真系统上再现 2005 年横东甲乙线故障时的电网结构特点,在搭建模型中断开博花甲乙线,并将故障前仿真工况调整为 2005 年横东线误动事件前实际潮流。在博-惠等值支路离博罗侧 80%处设置 AB 两相短路(0.600~0.680 s),且在故障期间(0.660 s)跳开横东甲乙线的两侧开关,可在一定程度上仿真再现横东甲乙线保护误动事件。仿真结果表明:横沥站横东甲线电气特征与实际故障录波相类似,在故障后的 10 ms 左右横东甲线出现暂态功率倒向。

为进一步验证暂态功率倒向现象并不局限于某一固定电网运行环境,在图 4 所示的 2007 年交流网络中设置不同故障点进行测试。为不失一般性,取故障点 K₁ 为博横乙线距离博罗站 90%处、K₂ 为博横等值线距离博罗站 90%处、K₃ 为博惠等值线距离博罗站 90%处、K₄ 为横东等值线距离横沥站 90%处。

图 5 分别给出了上述一组故障位置下 AB 两相故障时,横东甲线 B 相有功和无功功率的变化情况。由图 5(a)可知,在 0.615~0.632 s 有功功率的正方向变为横沥→博罗,在 0.627~0.635 s 无功功率的正方向变为横沥→博罗。由图 5(b)可知,在 0.625~0.634 s 有功功率的正方向变为横沥→博罗,在 0.627~0.639 s 无功功率的正方向变为横沥→博罗。由图 5(c)可知,在 0.625~0.635 s 有功功率的正方向变为横沥→博罗,在 0.627~0.639 s 无功功率的正方向变为横沥→博罗。由图 5(d)可知,在 0.626~0.633 s 有功功率的正方向变为横

沥→博罗,在0.629~0.637 s无功功率的正方向变为横沥→博罗。即在4个不同位置故障均出现暂态功率倒向现象。图6给出了图5(a)横沥站横东甲线电气特征,保护判别可能在功率倒换过程中误动。

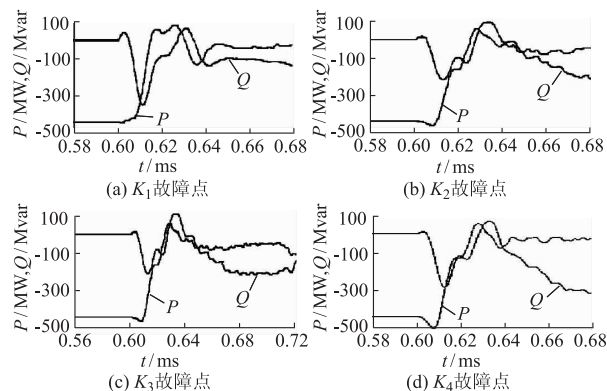


图5 横沥侧博横甲线B相的有功和无功功率
Fig. 5 Active and reactive powers of phase B on Boheng line-I at Hengli station

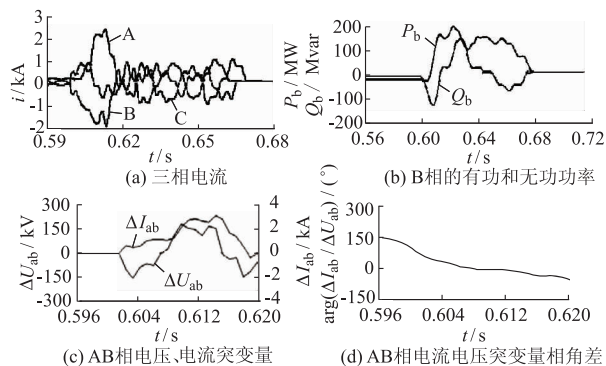


图6 横沥站横东甲线电气特征
Fig. 6 Electrical features on Hengdong line-I at Hengli station

2005年和2007年广东电网结构下暂态功率倒向问题在RTDS试验中的再现,充分说明了暂态功率倒向是交直流系统互联后满足一定条件下必然会引发的一个基本问题,而且不拘于一种电网结构和一种运行方式。

5 结语

本文从继电保护的视角出发,深入分析了交直流系统相互作用而引发的暂态功率倒向机理,明确了该问题是交流故障和直流系统快速变化引起的2个不同扰动源同时作用于电网元件,且满足一定条件下“电气竞争”的必然结果。

从电网安全性的角度出发,将“竞争”的思想引入故障和保护特性分析中。作为继电保护动作评估的一种新思路,突破了传统保护一时一地分析的局限性,不仅能促进从整个电网层面对继电保护动作

性能在新运行环境下的影响进行分析,而且通过破坏特征变异的影响条件,也可以为继电保护对策研究提供一种新的研究思路和改进策略的指导性参考。

参考文献

- [1] 刘之尧,唐卓尧,张文峰,等.直流换相失败引起继电保护误动作分析[J].电力系统自动化,2006,30(19):104-107.
LIU Zhiyao, TANG Zhuoyao, ZHANG Wenfeng, et al. Analysis of protective relaying mal-operation caused by commutation failure in HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 104-107.
- [2] 鲁德锋,毛为民,洗伟雄.直流换流站换流失败引起继电保护不正确动作的分析及防范措施探讨[J].电力设备,2006,7(1):54-56.
LU Defeng, MAO Weimin, XIAN Weixiong. Discussion on incorrect action of protection caused by commutation failure in DC converter station and its countermeasures [J]. Electrical Equipment, 2006, 7(1): 54-56.
- [3] 邵震,王炳炎.直流输电换相失败对交流侧继电保护的影响[J].高电压技术,2006,32(9):42-45.
SHAO Zhen, WANG Bingyan. Analysis on influence of HVDC commutation failure on AC relay protection [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 42-45.
- [4] 刘强,蔡泽祥,刘为雄,等.交直流互联电网暂态功率倒向及对继电保护的影响[J].电力系统自动化,2007,31(7):34-38.
LIU Qiang, CAI Zexiang, LIU Weixiong, et al. Transient power converse in AC/DC interconnected power grid and its influence on protective relaying [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 34-38.
- [5] 陈久林,陈建民,张量,等.功率倒向对平行双回线纵联保护的影响分析及对策[J].电力系统自动化,2006,30(2):105-107.
CHEN Jiulin, CHEN Jianmin, ZHANG Liang, et al. Analysis on the influence of the power converse to the double-circuit transmission lines pilot protective relaying and its corresponding measures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 105-107.
- [6] 欧开健,任震,荆勇.直流输电系统换相失败的研究:(一)换相失败的影响因素分析[J].电力自动化设备,2003,23(5):5-8.
OU Kaijian, REN Zhen, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system: Part 1 commutation failure factors analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-8.
- [7] 沈国荣.工频变化量方向继电器原理的研究[J].电力系统自动化,1983,7(1):1-10.
SHEN Guorong. A new directional relay based on the variation of power frequency components [J]. Automation of Electric Power Systems, 1983, 7(1): 1-10.

李晓华(1975—),女,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: eplxh@scut.edu.cn

蔡泽祥(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护、电力系统稳定分析与控制。E-mail: epzxcai@scut.edu.cn

黄明辉(1965—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:继电保护运行管理。

(下转第85页 continued on page 85)

Transient Power Converse in an AC/DC Interconnected Power Grid

LI Xiaohua¹, CAI Zexiang¹, HUANG Minghui², LIU Zhiyao², LI Yiquan²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 540641, China;

2. Guangdong Electric Power Dispatching Center, Guangzhou 510600, China)

Abstract: In view of the transient power converse leading to the malfunction of the protective relay in the AC/DC power grid, the mechanism of interaction of AC/DC systems and the change of AC fault features are studied in the electromagnetic transient time framework from the viewpoint of protective relaying. The HVDC commutation failure is analyzed. The evaluation method for and indices on the influence of the resolving analysis and fault feature variation on the protection performance are proposed in the electromagnetic transient process of commutation failure. Then the method of calculating the boundary of the transient power converse is presented. The transient power converse occurring in the AC/DC power grid is an inevitable result of electric competition and time sequence competition between the disturbance due to AC fault and that due to the rapid response of HVDC. Simulation results show the validity of the model and method proposed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50807017) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

Key words: AC/DC interconnected power grid; protective relaying; electromagnetic transient; transient power converse; fault feature variation; electric competition; time sequence competition