

大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题

徐 政, 蔡 晔, 刘国平

(浙江大学电机系, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 针对大规模交直流电力系统仿真计算中涉及到的几个相关问题进行了讨论。指出用于大规模交直流电力系统仿真计算的最有效的工具是带有用户自定义功能的交直流电力系统数字仿真程序, 传统的动模试验和最新出现的实时数字仿真器并不适合于对大规模交直流电力系统进行系统研究。通过考察直流输电换流器准稳态模型导出的条件, 阐明了直流输电换流器的准稳态模型在交流系统不对称故障期间是不适用的。论证了影响逆变器换相失败的因素有多个, 重点研究了触发超前角、换流站交流母线电压跌落, 直流电流增大以及换流变压器短路阻抗等因素对换相失败的影响。通过实例论证了交流系统故障时直流输电系统的动态响应特性, 必须在仿真过程中通过对直流输电系统及其控制器的行为进行精确的仿真计算才能得出, 凭经验事先估计直流输电系统在交流系统故障时的响应特性是不科学和不可靠的。

关键词: 交直流系统; 仿真工具; 准稳态模型; 换相失败; 直流系统响应

中图分类号: TM721; TM743

0 引言

“西电东送”和全国联网将是我国今后几十年内电网发展的两个主要趋势。“十五”期间, 华中和华东电网将由 3 条直流输电线路联接起来, 南方电网将形成 2 个交直流并列送电通道, 同时通过一回直流输电线路与华中电网相联接; 到 2020 年前后, 随着金沙江水电的开发, 可能还有 6 条直流输电线路从溪洛渡和向家坝水电站向华东和华中送电。我国将成为世界上直流输电线路最多、直流输送容量最大的国家。由此形成的大规模交直流电力系统, 其运行的复杂性和难度在国际上是少见的。因此, 研究大规模交直流电力系统的仿真技术具有特别重要的现实意义。

本文将对大规模交直流电力系统仿真计算中涉及到的几个问题进行一些初步的探讨。

1 大规模交直流电力系统仿真计算的工具

对于大规模交直流电力系统, 研究交直流系统之间的相互作用特性是非常重要的。例如, 确定交流系统中哪些故障可以引起多个逆变站同时发生换相失败、换相失败后能否恢复、需要多长时间才能恢复、直流系统和交流系统应采取什么样的控制措施才能最大限度地使系统保持稳定, 就是一个常见的问题。发生换相失败本身并不可怕, 因为这对直流输

电系统来说是不可避免的, 通常后果也不严重。问题的关键是当多个逆变站发生换相失败后, 其恢复过程是否顺利。如果恢复过程不顺利而发生连续换相失败, 有可能导致整个交直流系统失去稳定。上述问题与交直流系统的结构和具体运行工况有关, 通常必须采用大规模交直流电力系统分析计算程序进行仿真计算才能确定, 凭经验的估计是不可行的, 试图采用动模试验的方法来确定也是不现实的, 因为能够合理模拟近 10 条直流输电线路加上多个大区电网的动模实验室, 目前世界上恐怕没有。

关于电力系统机电暂态仿真程序, 目前国际上比较著名的有美国 PTI 公司的 PSS/E、西门子公司 NETOMAC、ABB 公司的 SIMPOW 和加拿大 Powertech 公司的 DSA POWERTOOLS 等, 国内应用比较普遍的程序有中国电力科学研究院的 BPA 和 PSASP 程序。上述程序能否用于大规模交直流电力系统的机电暂态仿真计算, 笔者认为主要是看该程序有无用户自定义功能。若程序缺乏用户自定义功能, 即使程序本身带有缺省的直流输电系统功能模块, 也往往难以满足大规模交直流电力系统机电暂态仿真的要求。因为从总体上说, 直流输电的控制系统还没有标准化, 不同的直流输电设备供应商所采用的直流输电控制系统是不同的, 不同直流输电工程中的直流系统控制器也不同, 采用程序缺省的直流输电系统功能模块, 通常不能合理地描述实际直流输电系统的特性。

目前国内有一种观点认为购买足够多的实时数字仿真器, 就能够模拟大规模交直流电力系统, 比如

收稿日期: 2002-04-15。

国家重点基础研究专项经费资助项目(G1998020311); 国家自然科学基金资助项目(59707005)。

南方电网。笔者认为,采用众多实时数字仿真器来进行大规模交直流电力系统的系统研究,一是没有必要、二是代价太大。实时数字仿真器是基于数学模型来模拟的,在这一点上,与数字仿真程序没有任何区别,所不同的是实时数字仿真器通常采用多处理器并行计算,计算速度可以达到实时的要求,而数字仿真程序则采用串行计算,计算速度较慢。但对于系统研究,计算速度并不很重要,实时与否无关紧要。因此,在这一点上,实时数字仿真器与数字仿真程序相比并不占优势。但在模拟系统的规模上,目前的数字仿真程序已没有任何限制,大多数商业化的电力系统分析软件模拟的系统规模在数万节点以上,而实时数字仿真器所能模拟的系统规模有限,特别对节点个数有严格的限制,因为增加节点最消耗仿真资源。因此,要合理模拟一个大规模交直流电力系统,可能需要几十甚至上百个实时数字仿真器,其耗费的代价与数字仿真程序根本不可比。

2 直流输电系统准稳态模型的适用性分析

目前国内普遍使用的交直流电力系统机电暂态仿真程序,如 PSS/E, NETOMAC, SIMPOW, BPA, PSASP 等,所采用的直流输电系统模型都是平均值模型^[1],即所谓的准稳态模型。直流输电系统的平均值模型在以下基本假设条件下导出:①换流器母线的三相交流电压是对称、平衡的正弦波;②换流器本身的运行是完全对称平衡的;③直流电流和直流电压是平直的;④换流变压器是无损的且激磁电流可以忽略。

因此在实际计算时,必须注意模型的适用性。通常在机电暂态仿真时,都假定上述后 3 个基本假设条件成立,但第 1 个基本假设条件不能假定它永远成立,因为交流系统不对称故障期间,通常换流站交流母线的电压不再对称。因此,准稳态模型在交流系统不对称故障期间不适用。所以,目前电力系统中普遍使用的机电暂态仿真程序,对交直流系统不对称故障期间的仿真计算是不严格和不精确的。

3 导致逆变器换相失败的因素分析

在交直流系统仿真计算中,准确模拟直流输电系统的响应特性是一个关键问题。如果仿真程序对直流输电系统的模拟比较粗略,例如,不能准确模拟直流输电系统在交流系统故障时的响应特性,而采用比较粗略的办法,如换流站交流母线电压跌落到某值时就认为发生换相失败,有可能导致错误的结果。因为导致换相失败的因素较多,换相失败之后的恢复过程就更为复杂,单靠某几个指标来判断换流器的响应特性是不可能的。

当两个桥臂之间换相结束后,刚退出导通的阀

在反向电压作用的一段时间内,如果未能恢复阻断能力,或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完毕,这两种情况在阀电压转变为正向时被换相的阀都将向原来预定退出导通的阀倒换相,这称之为换相失败^[1]。它使得逆变器在一段时间内发生直流反电压降低,直流电流增大。造成换相失败的原因有:交流电压下降,直流电流增大,交流系统不对称故障引起的线电压过零点相对移动,触发越前角 β 过小或整定的关断越前角 γ 过小等。

导致换相失败的各个因素之间的相互关系可以用下式表示:

$$\gamma = \beta - \mu \quad (1)$$

式中: γ 为关断越前角,简称为关断角; β 为触发越前角; μ 为换相角。

可见, γ 直接决定于 β 和 μ 。

实际运行时,通常 γ 角的整定值总是要比晶闸管实际需要的关断角 $\gamma_{\min}$ 大一些,因为需要考虑串联联接的晶闸管之间的电压分布不平衡、器件特性的变化以及安全裕度等。通常 γ 角的整定值为 18° 左右,如果逆变器按定电压运行, γ 角的整定值可以更大一些,例如 22° 。正常运行时 γ 角整定值取大一些对避免故障时的换相失败是绝对有利的,不利的方面是增加了正常运行时的无功消耗以及对换流设备的额定值提出了更高的要求。晶闸管实际需要的关断角 $\gamma_{\min}$ 通常在 $6^\circ \sim 9^\circ$ 之间。

实际运行时触发越前角 β 由直流输电的控制器决定,它与触发滞后角 α 的关系为: $\beta = 180^\circ - \alpha$,事实上,直流输电换流器的所有控制最终都要落实到对 α 或 β 的控制。

换相角 μ 决定于多个因素,其计算式为:

$$\mu = \beta - \arccos \left(\frac{\sqrt{2} I_d X_c}{U_v} + \cos \beta \right) \quad (2)$$

式中: β 为触发越前角; I_d 为直流电流; X_c 为换相电抗,当假设换流器交流母线装有完善的滤波装置而使交流电压不畸变时, X_c 即为折算到阀侧的换流变压器短路阻抗; U_v 为换流变压器交流系统侧电压直接折算到阀侧的电压,不包括换流变压器中的压降。

根据式(2), μ 决定于 4 个变量,其中: β , I_d , U_v 是系统运行时的状态量,在运行时是可变的; X_c 是装置的特征参数,在系统运行时可以认为是固定的,但在系统规划阶段, X_c 是可以选择的,因此在系统规划阶段,可以认为 X_c 也是可变的。

下面分别考察上述 4 个变量对换相角 μ 和关断越前角 γ 的影响。为了使计算更有实际意义,计算条件与规划中的溪洛渡右厂送金华直流输电线路基本一致。亦即:直流系统额定电压为 ± 600 kV,输送额定功率 3 500 MW。对应于一个 6 脉动换流桥,计算的原始条件为:逆变站换流变压器额定容量 S 为

1 009 MVA; 逆变站换流变压器的额定变比为 525 kV/245 kV; 逆变站换流变压器短路阻抗 u_k 为 15%; 初始运行点逆变侧的直流电压为 ± 550 kV; 初始运行点逆变侧的直流电流为 2.917 kA; 初始运行点逆变站交流母线电压为 505 kV, 该电压折算到换流变压器阀侧电压 U_V 相当于 0.96(标么值)。

由上述原始条件可以计算出: 运行点的触发超前角 β_0 为 38.2° ; 运行点的换相角 μ_0 为 18.7° ; 运行点的关断超前角 γ_0 为 19.5° 。

3.1 I_d 保持恒定时 γ 和 μ 随 U_V 和 β 变化的关系

图 1 为保持 I_d 为初始值时, γ 和 μ 随 U_V 和 β 变化的关系曲线。

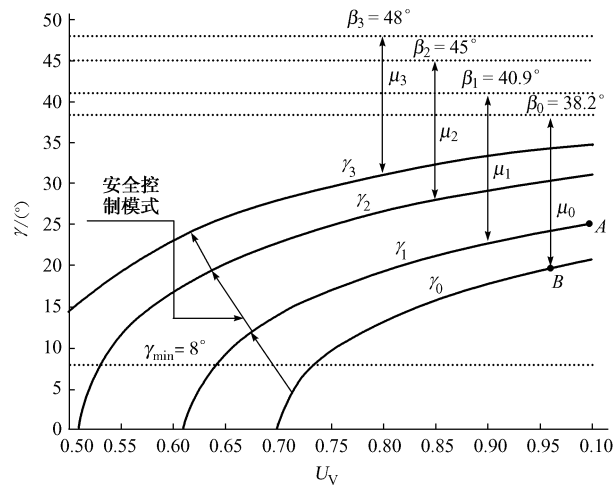


图 1 I_d 恒定时 γ 和 μ 随 U_V 和 β 变化的关系曲线
Fig. 1 γ and μ versus U_V and β when I_d keeps constant

换流器运行时, 一旦阀侧电压 U_V 和直流电流 I_d 给定, 换流器的直流侧电压 U_d 、换相角 μ 和关断角 γ 就完全由触发超前角 β 控制。图 1 中初始运行点 B 给定 U_V 为 0.96(标么值)、 I_d 为 2.917 kA。当 $U_d = 550$ kV/2 kV, 相应的 β 为 38.2° 时, μ 为 18.7° , γ 为 19.5° 。在保持 U_V 给定的条件下, 如果 β 拉大, 则 U_d 将下降, μ 将减小, γ 将增大。

图 1 也可理解为逆变器在交流系统发生故障时的响应特性曲线。当交流系统发生故障时, 逆变站交流母线电压下降, 下降的幅度决定于故障发生地点与逆变站交流母线之间的电气距离及当时的运行方式。逆变站交流母线电压下降必然导致 U_V 也下降, 但残留值的标么值不一定等于换流站交流母线电压残留值的标么值, 因为换流变压器 U_V 不一定运行在额定变比下。

正常运行时, 直流电压通常由逆变站控制, 而直流电流由整流站控制。当逆变站控制直流电压时, 其基本的控制方式是: 调节换流变压器变比来调整慢速的电压变化, 从而使 U_V 保持在额定值附近; 而通过调节 β 来控制较小的快速电压变化。因此, 正常运行时, 直流电压运行在额定值附近, U_V 也运行在

额定值附近, 使得 β 和 γ 也只在很小的范围内变化, 例如 γ 在 20° 左右的小范围内变化, 如图 1 中的初始运行点 B。

当交流系统发生故障时, 换流站交流母线电压瞬时跌落, 而换流变压器变比调整的时间常数较大, 通常在 10 s 左右。因此, 换流变压器变比根本来不及变化, 从而导致 U_V 等比例跌落。 U_V 瞬时跌落意味着 μ 瞬时增大。例如在图 1 中, 当 U_V 从初始运行值 0.96 瞬时跌落到 0.74 时, μ 从初始运行点的 18.7° 瞬时增加到 30.2° 。由于电压跌落是瞬时性的, 直流输电系统控制器还来不及将 β 拉大, 即 β 还运行在原来的初始值 38.2° , 从而导致 γ 从原来的初始值 19.5° 瞬时跌落到 8° , 即达到换相失败的临界值。因此, 对于本例所讨论的系统, 如果交流系统故障 U_V 从 0.96 瞬时跌落到 0.74 以下, 逆变器就发生换相失败, 即电压跌幅超过 0.22 时, 就导致逆变器发生换相失败。

逆变器在交流系统故障时是否发生换相失败与交流系统发生故障前逆变器的初始运行点有很大关系。当直流侧电压给定时, 对于同样的换流站交流母线电压跌落, 故障前逆变器运行的 U_V 越高, 抵御换相失败的能力越强。因为: ① U_V 越高, 对于同样的直流侧电压, 初始运行点的 β 就越大; ② U_V 越高, 对于同样的交流母线电压跌落, 阀侧的残留电压就越高, 因而故障瞬间逆变器的 μ 就越小。而对于逆变器, $\gamma = \beta - \mu$, 因此故障瞬间逆变器的 γ 就越大, 所以发生换相失败的可能性就小。例如, 对于上述算例, 若假定初始运行点的 U_V 不是 0.96 而是 1.0(如图 1 中的 A 点), 则在直流侧电压不变的条件下, 初始运行点的 β 为 40.9° , γ 为 25° 。如图 1 所示, 当交流系统故障使得 U_V 从 1.00 瞬时跌落到 0.64 以下时, 逆变器才发生换相失败, 即电压跌落幅度超过 0.36 时逆变器发生换相失败。

在交流系统故障期间, 不管电压跌落是否已引起逆变站换相失败, 只要 γ 小于一般的整定值 18° , 逆变站就不再承担控制直流电压的任务, 而转入安全控制模式。安全控制模式实际上是一种定关断角控制模式, 只不过比正常运行时的定关断角控制增益大。安全控制模式的作用是迅速拉大 β , 从而提升 γ , 使 γ 迅速脱离导致换相失败或容易导致换相失败的区域。例如在图 1 中, 在安全控制的作用下, β 从初始运行点的 38.2° 拉大到 40.9° , 再拉大到 45° 直至 48° , 对应不同的 U_V 下降总可以把 γ 提升到脱离换相失败的区域。

3.2 β 保持恒定时 μ 和 γ 随 I_d 和 U_V 变化的关系

当 β 保持初始值 38.2° 不变, 在不同的 U_V 下改变 I_d 的大小, μ 和 γ 随 I_d 变化的曲线如图 2 所示。图 2 中, I_d 为 1 时对应 I_d 取初始电流 2.917 kA。

从图 2 可以看出, 当 β 保持初始值 38.2° 不变时, 如果 U_V 保持初始值 0.96, 则当 I_d 增加到 1.3 时

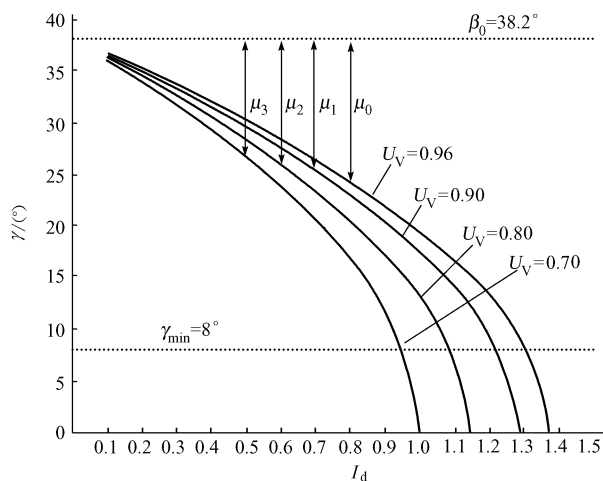


图2 β 恒定时 γ 和 μ 随 I_d 和 U_v 变化的关系曲线
Fig. 2 μ and γ versus I_d and U_v when β keeps constant

发生换相失败;如果 U_v 降低到 0.90,则当 I_d 增加到 1.22 时发生换相失败;如果 U_v 降低到 0.80,则当直流电流增加到 1.08 时发生换相失败;如果 U_v 降低到 0.70,则当 I_d 维持初始值时就已发生换相失败。总体上看, μ 随直流电流的增大而增加很快,例如,当保持 U_v 为初始值 0.96, I_d 从 1.0 上升到 1.3 时, μ 增加了 12° ,从而 γ 也减小了 12° ,并导致换相失败。

3.3 I_d, U_v 不变时 μ 和 γ 随 X_c 和 β 变化的关系

当 I_d, U_v 取初始值,在不同的 β 下让换流变压器漏抗 X_c 变化, μ 和 γ 随 X_c 的变化曲线如图 3 所示。

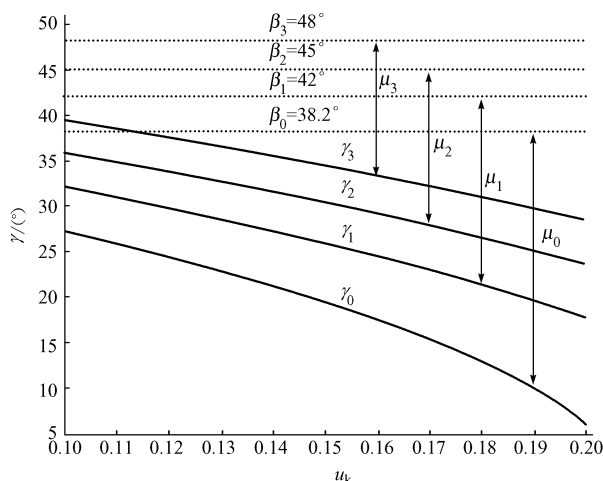


图3 初始运行状态下 μ 和 γ 随 X_c 变化的曲线
Fig. 3 μ and γ versus X_c under the original operation condition

从图 3 可以看出,总体上 X_c 越大, μ 就越大,对应确定的 β, γ 就越小。例如,若保持 β 为初始值 38.2° ,则当 u_k 从 15% 增大到 19% 时, γ 从 19.5° 下降到 10° 。如果假定 u_k 不是 15% 而是 19%,那么在 I_d 和 U_v 取初始值的条件下,要使 γ 保持为初始值

19.5° ,相应的 β 必须增大到 42° ,但此时输出的直流电压 U_d 比初始值有微小的下降。

4 直流输电系统动态响应特性的模拟问题

目前国内有些单位在进行大规模交直流电力系统的仿真计算时,对直流输电系统的模拟可能过于粗略。例如,在模拟交流系统故障后直流输电系统的响应特性时,往往采用了如下假定:当换流站交流母线电压跌落到某值时,如 75% 额定电压时,认为换流站发生换相失败;交流系统故障切除后直流系统的恢复过程则采用了定时间的假定,例如假定故障切除后直流系统恢复输送功率的时间为 100 ms 等。第 3 节已经论证了导致换相失败的因素有多个,并不是只有换流站交流母线电压一个变量,对应不同的设备参数和运行工况,导致换相失败的换流站交流母线电压是不同的,不可能事先假定一个电压,当换流站交流母线电压达到该值时就发生换相失败。另外,换相失败以后的恢复过程非常复杂,取决于直流输电系统的控制器和交流系统的结构及运行方式,事先根本无法假定故障后的恢复过程,例如,对于较弱的交流系统,如果故障后恢复速度太快,有可能在恢复过程中再次导致换相失败而造成连续换相失败。因此,交流系统故障时直流输电系统的动态响应特性必须在仿真过程中通过对直流输电系统及其控制器的行为进行精确的仿真计算才能得出,凭经验事先估计直流输电系统在交流系统故障时的响应特性往往带有很大的主观随意性,是不科学和不可靠的。

作为示例,下面给出规划中的溪洛渡右厂送金华直流输电线路在交流系统故障时的响应特性仿真结果。图 4 是溪洛渡右厂至金华直流输电线路在瓶窑—武南一回线瓶窑侧三相短路 0.1 s 后切除该线路时的响应特性。

图 4 的仿真结果中详细给出了发生换相失败时换流站交流母线的电压值,交流系统故障期间直流输电控制器的模式切换,直流输电恢复过程中控制器的响应特性,以及各个物理量的变化特性,从中也可以看出直流输电系统的恢复时间。下面仅对以下几点做进一步的说明:

a. 当瓶窑发生三相短路时,金华逆变站的换流变压器阀侧电压 U_v 从正常时的 0.96 瞬时跌落到 0.68,故障期间,由于逆变站消耗的无功增加,导致 U_v 进一步跌落到 0.61。故障发生时电压瞬时跌落的幅度较大,引起逆变站换相失败。

b. 故障期间,除了换相失败的 20 ms 之外,直流系统输送有功从 3.2 GW 下降到 2.1 GW,对交流系统有 1.1 GW 的有功冲击;直流系统从交流系统吸收的无功从 0.2 Gvar 上升到 0.8 Gvar,对交流

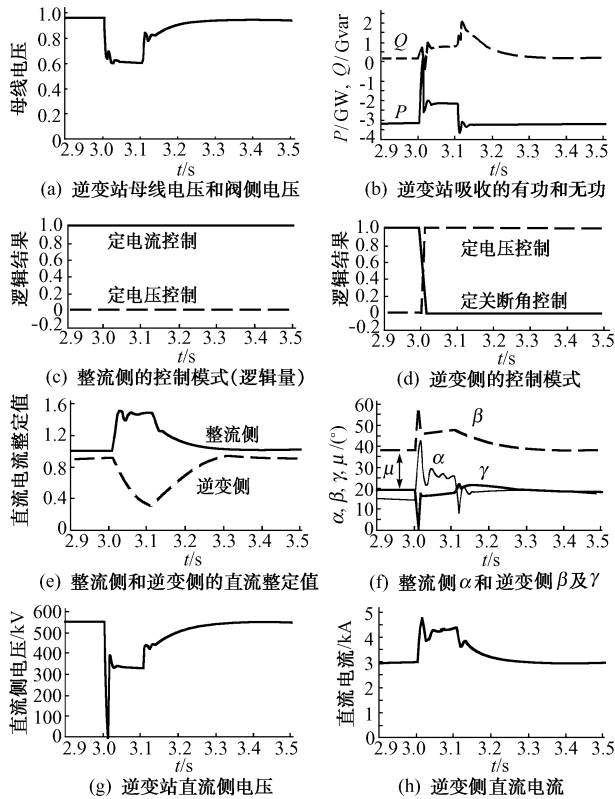


图4 溪洛渡右厂-金华直流线路
响应特性仿真结果

Fig. 4 Xiluodu to Jinhua HVDC responses
to AC fault at Pinyao

系统有 0.6 Gvar 的无功冲击。故障切除后,直流功率迅速上升到峰值后恢复到故障前的初始值,恢复过程约 0.2 s,恢复时的有功峰值达到 3.7 GW,恢复时的无功峰值达到 2 Gvar。应该指出,由于直流输电系统的快速响应特性,即使在交流系统故障期间,直流输电系统也经历了 2 个运行状态的转换,即故障瞬间 20 ms 内的暂态过程和之后到故障切除之间的相对稳态过程。实际换相失败只是在故障瞬间发生。因此事先假定换流站交流母线电压跌落到某

个值时逆变站就发生换相失败,根本无法反映直流输电系统的真实响应特性。如果按照事先假定的逻辑,当瓶窑侧发生三相短路期间,金华逆变站的交流母线电压较低,应认为发生换相失败,这样,故障期间直流输电系统的输送功率应为 0。而事实上,即使在故障期间,直流输电系统仍然输送了相当大的功率。

c. 故障期间,整流站一直按定电流方式运行,逆变站在故障发生后立刻转入定关断角控制方式运行。故障期间整流侧直流电流整定值从额定值 1.0 上升到 1.5,而逆变侧直流电流整定值因 VDCOL 的限制作用而从 0.9 限制到了 0.3。换相失败期间,由于整流侧定电流控制器的作用,使得 α 从 14° 瞬间拉大到 42° ,抑制了直流电流的峰值;由于逆变侧定关断角控制器的作用, β 从 38° 瞬间拉大到 59° ,使逆变器立刻脱离换相失败的工况。

5 结论

通过上述的仿真结果说明,用事先假定换流站交流母线电压跌落到一定值时发生换相失败,以及经过若干时间直流输电系统恢复输送功率,来模拟直流输电系统在交流系统故障期间的动态响应特性,是不科学和不客观的,有可能导致错误的结果。

参考文献

- 1 浙江大学直流输电科研组 (Zhejiang University HVDC Group). 直流输电 (Direct Current Power Transmission). 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1982

徐政 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、电力市场及其技术支持系统。E-mail: xufeng@hzcnc.com

蔡晖 (1978—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为直流输电与柔性交流输电。

刘国平 (1978—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为直流输电与柔性交流输电。

SOME PROBLEMS IN THE SIMULATION OF LARGE-SCALE AC/DC POWER SYSTEMS

Xu Zheng, Cai Ye, Liu Guoping (Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Some problems in the simulation of large-scale AC/DC power systems are discussed. It can be justified that the most effective tool for large-scale AC/DC systems analysis is the digital simulation software with the functions of users' definition. Both the conventional dynamic modeling device and the newly real-time digital simulator are not suitable for the analysis of large-scale AC/DC systems. By studying the presupposition of the quasi-steady state model of the HVDC converter, the quasi-steady state model of the HVDC converter is proven to be invalid when asymmetrical faults occur in the AC system. It is also demonstrated that there are several factors causing HVDC converter commutation failure, the most important factors include the advance firing angle, the voltage drop of the converter AC bus, the direct current increment and the short circuit impedance of the converter transformer. An example further proves that the dynamic response of the HVDC system under AC system faults can only be calculated in the process of the simulation and can not be determined in advance.

This project is supported by National Key Basic Research Special Fund of China (No. G1998020311) and National Natural Science Foundation of China (No. 59707005).

Key words: AC/DC power systems; simulation tools; quasi-steady state model; commutation failure; DC response