

同步调相机对 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的影响研究

王 庆¹, 沙江波², 杨鹏程¹, 赵成勇², 徐东海³, 黄金军⁴, 杨治中², 郭春义²

(1. 国家电网有限公司, 北京 100031; 2. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206;
3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 4. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: LCC-HVDC 逆变侧交流母线电压波动容易引发换相失败, 同步调相机接入 LCC-HVDC 具有提高交流母线电压稳定性的作用, 因此在一定程度上也能提高 LCC-HVDC 的换相失败抵御能力。本文首先从理论上分析了 LCC-HVDC 换相失败的机理和同步调相机提高 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的机理, 然后对同步调相机提高 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的作用效果进行了仿真研究, 在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建了含有同步调相机的 LCC-HVDC 系统模型, 从换相失败免疫性指标、换相失败概率等角度研究了不同故障类型下同步调相机对 LCC-HVDC 抵御换相失败能力的影响, 结果表明, 同步调相机可以显著提高 LCC-HVDC 的换相失败抵御能力。

关键词: 高压直流输电; 同步调相机; 换相失败; 换相失败免疫性指标; 换相失败概率

DOI: 10.12067/ATEEE1801046 **文章编号:** 1003-3076(2018)05-0029-08 **中图分类号:** TM721

1 引言

基于电网换相换流器的高压直流输电 (Line Commutated Converter High Voltage Direct Current, LCC-HVDC) 具有传输功率大、传输功率快速可控和运行成本低的优点, 因此在“西电东送、全国联网”工程中得到了广泛应用^[1]。目前, 在我国华东等地区, 由于多回 LCC-HVDC 线路的集中馈入, 已经形成了多馈入直流输电系统 (Multi-Indeed Direct Current High Voltage Direct Current, MIDC-HVDC), 大量直流馈入同一区域会使该地区的交流电源发展放缓, 导致系统的动态无功储备不足^[2,3]。当交流系统发生故障时, 交流母线电压波动可能导致多条 LCC-HVDC 线路同时或级联换相失败, 损失大量有功功率, 将对送受端电网产生较大的冲击。因此, 为了改善交流母线电压波动引发的换相失败问题, 提高 LCC-HVDC 的功率输送能力, 客观上需要提高受端交流系统的无功储备。

同步调相机 (Synchronous Condenser, SC) 具有无功补偿能力受母线电压影响小和旋转惯性的特点, 是目前电力系统中应用比较广泛的动态无功补

偿装置之一。根据国家电网公司战略规划, 将在多回特高压 LCC-HVDC 工程的受端加装同步调相机来提高 LCC-HVDC 的换相失败抵御能力^[4], 因此有必要对同步调相机提高 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的作用效果进行研究, 为同步调相机的工程应用提供技术参考。但是, 已有研究成果主要围绕 LCC-HVDC 的换相失败问题以及同步调相机的动态无功补偿特性展开, 并未深入研究同步调相机对 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的影响。文献[5]对比了静止无功补偿器 (Static Var Compensator, SVC) 和同步调相机的动态特性, 结果表明同步调相机在严重的三相短路故障中具有更强的动态电压支撑能力。文献[6]提出了一种抑制 LCC-HVDC 连续换相失败的虚拟电阻电流限制控制方法, 并基于 CIGRE 标准测试模型进行仿真验证, 结果表明, 该控制方法可以在一定程度上抑制 LCC-HVDC 的连续换相失败。文献[7]比较了两种判别 LCC-HVDC 换相失败的方法: 最小关断角判别法和最小关断面积判别法, 并基于研究成果提出了最小关断面积控制策略。文献[8]在 PSCAD/EMTDC 软件中搭建了含 STATCOM 的双馈入直流系统模型, 仿真发现 STATCOM

收稿日期: 2018-01-17
基金项目: 国家电网公司科技项目 (SGTYHT/16-JS-198)
作者简介: 王 庆 (1980-), 男, 湖北籍, 高工, 硕士, 研究方向为特高压直流输电工程建设研究;
郭春义 (1984-), 男, 山西籍, 副教授, 博士, 研究方向为直流输电、FACTS 等 (通讯作者)。

能等效增大交流系统强度,在一定程度上提高 LCC-HVDC 的换相失败抵御能力。

本文对同步调相机提高 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的作用效果进行了研究,以期对同步调相机在 LCC-HVDC 系统应用提供一定的理论支持。文中首先分析了 LCC-HVDC 换相失败的发生机理和同步调相机提高 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的机理,然后在 PSCAD/EMTDC 中搭建了含有同步调相机的 LCC-HVDC 系统模型,分别针对不对称故障及对称故障下同步调相机的作用效果进行仿真研究,运用换相失败免疫性指标、换相失败概率等指标量化分析同步调相机的作用效果,结果表明同步调相机可以有效提高 LCC-HVDC 的换相失败抵御能力。

2 含同步调相机的 LCC-HVDC 模型

2.1 系统主电路

含有同步调相机的 LCC-HVDC 系统主电路结构如图 1 所示。其中 LCC-HVDC 采用两极两端中性点直接接地系统,每极采用由 2 个 6 脉动换流器组成的 12 脉动换流单元,同步调相机接入逆变侧换流母线处。

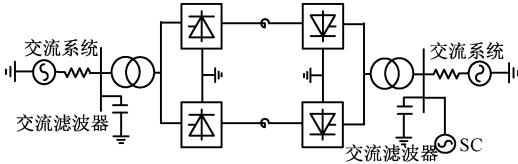


图 1 含有同步调相机的 LCC-HVDC 系统
Fig.1 LCC-HVDC with synchronous condenser

2.2 LCC-HVDC 基本控制策略

文中所用 LCC-HVDC 模型的控制系統如图 2 所示,与 CIGRE 标准模型相同,即逆变侧配备定关断角 γ 控制、定电流控制、电流偏差控制 (Current Error Controller, CEC) 和低压限流控制 (Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL),整流侧配备定电流控制和定 α_{\min} 控制^[9]。图 2 中, I_d 为直流电流, U_d 为直流电压, γ 为逆变侧关断角。

2.3 同步调相机的控制策略

同步调相机的基本控制策略如图 3 所示。同步调相机采用定机端电压控制方式,通过调节无功功率的输出来保持机端电压的稳定。同时为了防止励磁电流过大导致转子绕组过热的问题,同步调相机还配置有具有反时限特性的最大励磁电流限制功能^[10]。当同步调相机的输出未达到其限值前,其外

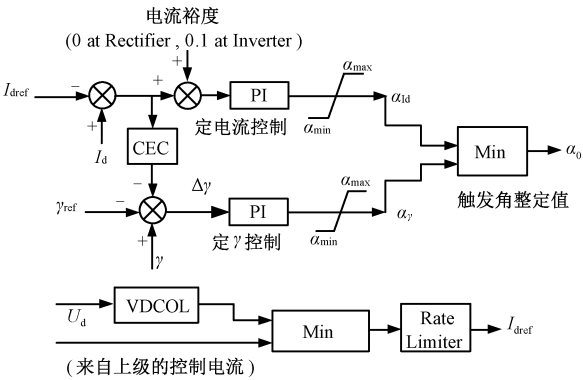


图 2 LCC-HVDC 控制系统
Fig.2 Control system of LCC-HVDC

特性相当于一个可控电压源,但当输出达到限值后,其外特性等效为一个恒定电流源。

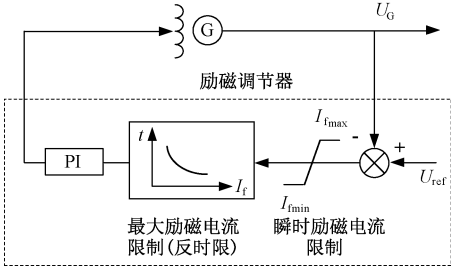


图 3 同步调相机控制系统
Fig.3 Control system of synchronous condenser

3 LCC-HVDC 换相失败机理

当逆变器的两个阀进行换相时,一个阀进入导通状态的同时,另一个阀在反向电压的作用下电流到零而关断。但为了确保阀可靠关断,需要确保即将关断的换流阀从电流过零时刻到其两端电压由负到正过零点时刻的时间充足,否则,换流阀没有恢复正向阻断能力,在承受正向电压时就会重新导通,造成换相失败。换相失败是一种严重的故障,会引起直流功率输送中断、电气应力增大等一系列的问题。LCC-HVDC 换相失败的机理可用如下公式说明^[11]:

$$\gamma = \arccos(\frac{\sqrt{2}kX_cI_d}{U_L} + \cos\beta) \tag{1}$$

式中, γ 为逆变侧关断角; k 为换流变压器变比; I_d 为直流电流; U_L 为逆变侧交流母线电压; X_c 为换流变压器漏抗; β 为逆变侧超前触发角。

当交流系统发生不对称故障引起电压波形相角偏移 φ 时,换流器关断角的计算公式^[11]表示为:

$$\gamma = \arccos(\frac{\sqrt{2}kX_cI_d}{U_L} + \cos\beta) - \varphi \tag{2}$$

逆变侧有定关断角的调节器,调节器会自动调节触发角 β ,保持 γ 为设定值,以保证阀从关断到阀上电压由负变正的过零点之间的时间充足。但是,由式(1)、式(2)可以看出,当逆变侧交流母线电压降低,或者不对称故障导致电压波形相角偏移,触发角 β 调节不及时,都会使换流器的关断角减小,存在逆变器发生换相失败的风险。

4 同步调相机提高 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的机理分析

同步调相机能提高 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的实质是交流母线电压下降时同步调相机发出无功稳定交流母线电压,从而抑制换相失败。母线电压下降幅度越大,同步调相机发出的无功越多。以下主要从 LCC-HVDC 换相失败后同步调相机的次暂态和暂态过程分析。

同步调相机消耗的有功功率忽略不计,母线处发生故障后同步调相机发出的无功增量表示为:

$$\Delta Q = U_L \Delta i_d + \Delta U i_{d0} \quad (3)$$

式中, ΔQ 为瞬时无功增量; ΔU 为交流母线电压增量; Δi_d 为同步调相机 d 轴无功电流增加量; i_{d0} 为故障前 d 轴无功电流。

不考虑励磁系统时,次暂态过程中同步调相机的定子电流增量表达式为:

$$\begin{aligned} \Delta i_d = & - \left(\frac{1}{X_d'' + X_s} - \frac{1}{X_d' + X_s} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} * \Delta U_q - \\ & \left(\frac{1}{X_d' + X_s} - \frac{1}{X_d + X_s} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} * \Delta U_q + \\ & \frac{\cos(\omega t + \delta)}{X_d'' + X_s} e^{-\frac{t}{T_a}} * \Delta U - \frac{\Delta U_q}{X_d + X_s} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,*为卷积符号; X_s 为同步调相机与系统母线间的等效电抗; X_d 为同步调相机的直轴同步电抗; X_d' 为同步调相机的 d 轴暂态电抗; X_d'' 为同步调相机的 d 轴次暂态电抗; T_d'' 为计及系统阻抗时的 d 轴次暂态短路时间常数; T_d' 为计及系统阻抗时的 d 轴暂态短路时间常数; T_a 为定子绕组暂态时间常数; ω 为交流系统的角频率; δ 为系统故障前母线电压与电动势 E_q 间的夹角; ΔU_q 为 ΔU 的 q 轴分量^[12]。

由式(4)可知, Δi_d 里面包含了稳态分量、直流分量和交流分量。考虑到 $\Delta U_q \approx \Delta U$,故障瞬间次暂态过程中同步调相机瞬时无功约为:

$$\Delta Q = - \frac{U_L \Delta U}{X_d'' + X_s} + \Delta U i_{d0} \quad (5)$$

由式(5)可知,忽略稳态时的电流 i_{d0} ,次暂态过程中同步调相机瞬时无功输出的变化与 $-\Delta U$ 变化趋势一致,当母线电压跌落即 ΔU 为负时,同步调相机发出无功功率。

忽略阻尼绕组和定子暂态过程,暂态过程中同步调相机无功电流增量和暂态电动势增量表示为:

$$\Delta i_d = \frac{\Delta E_q' - \Delta U}{X_d' + X_s} \quad (6)$$

$$\Delta E_q' = \frac{-[K_A X_d' - (X_d - X_d')] \Delta U}{(X_d' + X_s) T_{d0}' s + X_d + X_s + K_A X_s} \quad (7)$$

式中, $\Delta E_q'$ 为暂态电动势增量; K_A 为励磁放大倍数; T_{d0}' 为 d 轴开路暂态时间常数; s 为拉普拉斯变换中的复数。

由式(7)代入式(6),可知:

$$\Delta i_d = - \frac{[K_{3E}(K_A + 1) - 1] \Delta U}{(K_{3E} T_{d0}' s + 1)(X_d' + X_s)} - \frac{\Delta U}{X_d' + X_s} \quad (8)$$

式中

$$K_{3E} = \frac{X_d' + X_s}{X_d + X_s + K_A X_s} \quad (9)$$

将式(8)代入式(3),得到暂态过程中同步调相机无功输出增加量:

$$\begin{aligned} \Delta Q = & - \frac{[K_{3E}(K_A + 1) - 1] U_L}{(K_{3E} T_{d0}' s + 1)(X_d' + X_s)} \Delta U - \\ & \frac{U_L}{X_d' + X_s} \Delta U + \Delta U i_{d0} \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知,暂态过程中忽略稳态时的电流 i_{d0} ,当母线电压跌落即 ΔU 为负时,同步调相机发出无功功率, $-\Delta U$ 越大,同步调相机发出无功越多。

从以上原理可知,当母线电压 U_L 下降时,同步调相机发出无功功率。从系统交流侧来看,减少了线路上无功功率的交换,从而有效抑制了系统母线电压 U_L 下降。从式(1)、式(2)可知,其等同于抑制了关断角 γ 的降低,避免了 LCC-HVDC 的换相失败。

5 仿真研究

为研究同步调相机对 LCC-HVDC 抵御换相失败能力的影响程度及不同交流系统强度对同步调相机作用效果的影响,在 PSCAD/EMTDC 中搭建了图 1 所示含同步调相机的 LCC-HVDC 系统模型,其详细参数见表 1。同时设置了 2 个仿真案例,并在 PSCAD/EMTDC 中分别对其进行研究。案例设置如下所示:①案例 1:逆变侧不投入 SC;②案例 2:逆变侧投入 SC。

表 1 系统模型主要参数

Tab. 1 Main parameters of system model		
系统参数	LCC-HVDC	SC
额定电压/kV	—	20
额定电流/kA	—	8.66
额定容量/MW (MVar)	3000	300
直流电压/kV	± 500	—
直流电流/kA	3	—
换流变压器额定变比/(kV/kV)	230/203	230/20
联接变压器阻抗电压百分值(%)	12	8
平波电抗器的电感值/H	0.15	—

5.1 同步调相机提高 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的原理研究

为了验证同步调相机提高 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的机理,在逆变侧换流母线处设置三相感性接地故障,故障电感值设置为 0.16H (案例 1 条件下恰好不发生换相失败的电感值),故障时刻设置为 12.11s,故障持续时间为 0.05s。对比故障发生时案例 1、案例 2 条件下的直流电压、直流电流、直流功率、交流母线电压及 γ 角的变化,观察同步调相机励磁电流与励磁电压的波形。仿真波形如图 4 所示。

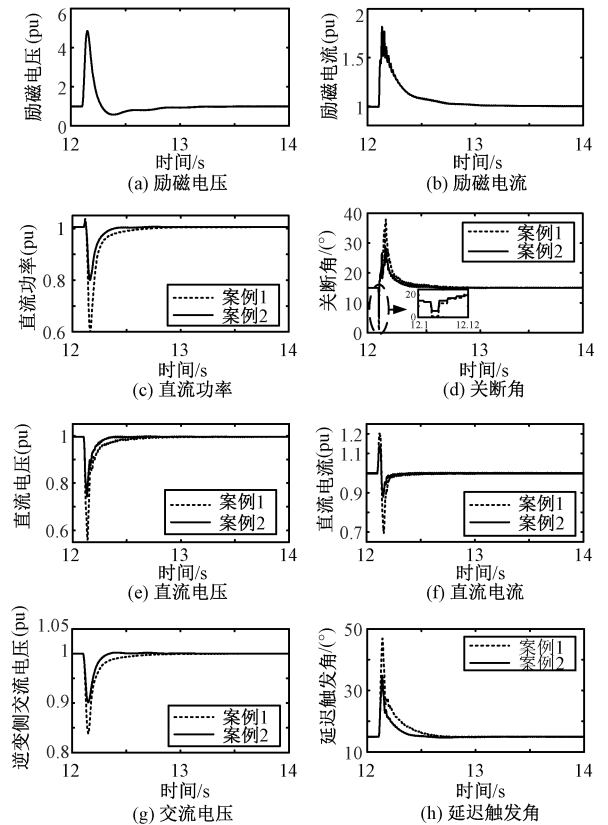


图 4 三相感性故障下特性对比

Fig. 4 Feature comparison under three-phase fault

当逆变侧交流母线处投入同步调相机后,如果逆变侧交流母线在 12.11s 发生三相短路故障,案例 2 中的同步调相机会瞬时提高励磁电流、励磁电压,如图 4(a)、图 4(b) 所示,说明故障瞬间,同步调相机瞬时增大了无功功率输出。然后经对比分析图 4(c) ~ 图 4(h) 中案例 1、案例 2 曲线变化趋势发现,案例 2 曲线在故障瞬间变化幅度均比案例 1 曲线的变化幅度小,由此可知,同步调相机的作用可以减小逆变侧交流母线电压降低的幅度,进而使得故障发生时系统直流电压降低幅度和直流电流增加幅度都减小。最终大幅减小了故障发生后 LCC-HVDC 逆变器关断角 γ 的降落幅度,从而验证了同步调相机提高 LCC-HVDC 抵御换相失败能力的机理。

5.2 整流侧或逆变侧短路比不同时案例 1 及案例 2 的换相失败免疫性指标对比

本文采用换相失败免疫性指标 (Commutation Failure Immunity Index, CFII) 值衡量 LCC-HVDC 抵御换相失败能力的强弱。CFII 值越大,代表逆变器抵御换相失败的能力越强,反之,则越弱。其定义如式(11)所示^[13,14]:

$$I_{CFII} = \frac{U_{ac}^2}{\omega L_{max} P_{dc}} \quad (11)$$

式中, I_{CFII} 为 CFII 值; U_{ac} 为逆变侧换流母线额定线电压; L_{max} 为换相失败临界电感; P_{dc} 为直流输电系统额定功率。

为了直观显示案例 2 相对于案例 1 的 CFII 值的提升程度,用 CFII 提升率 I_{Δ} 表征,公式如下^[15]:

$$I_{\Delta} = \frac{I_{CFII2} - I_{CFII1}}{I_{CFII1}} \times 100\% \quad (12)$$

式中, I_{CFII1} 为案例 1 的 CFII 值; I_{CFII2} 为案例 2 的 CFII 值。

短路比 (Short Circuit Ratio, SCR) 为直流换流母线的短路容量与额定直流功率的比值^[16,17],其可以作为表征交流系统强弱的指标。

分别对比 2 个案例在整流侧不同 SCR (逆变侧 SCR 不变) 及逆变侧不同 SCR (整流侧 SCR 不变) 时的 CFII 值变动情况,以下从单相故障和三相故障两方面进行研究。

5.2.1 单相故障

单相故障是最常见的接地故障,所以有必要研究逆变侧交流母线处发生单相故障时同步调相机的作用效果。以下针对整流侧和逆变侧交流系统强度变化对同步调相机作用效果的影响进行研究,通过

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中进行仿真,得到单相故障时,同步调相机投入及不投入工况下,整流侧和逆变侧不同交流系统强度的临界电感值,并代入式(11),最终得到对应运行工况下的 CFII 值,如图 5 所示。整流侧和逆变侧交流系统短路比变化时,案例 2 较案例 1 的 CFII 提升率如图 6 所示。

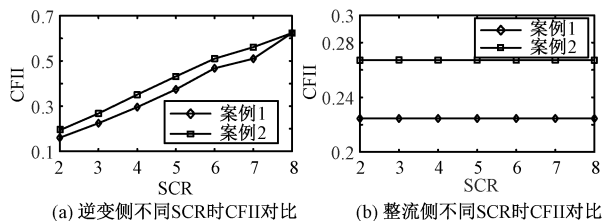


图 5 单相故障时案例 1 和案例 2 的 CFII 对比

Fig. 5 Comparison of CFII between case 1 and case 2 under single phase to ground fault

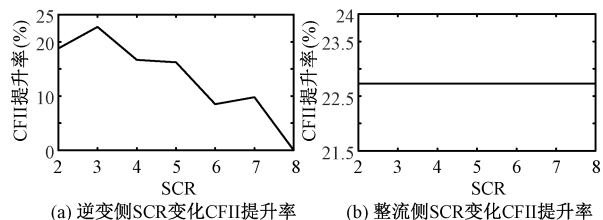


图 6 单相故障时的 CFII 提升率

Fig. 6 Increase rate of CFII under single phase to ground fault

由图 5(a)、图 6(a)可知,当逆变侧交流系统 SCR 为 2 时,此时交流系统较弱,案例 1 的 CFII 值为 0.16,案例 2 的 CFII 值为 0.19,案例 2 较案例 1 的 CFII 值提升了 18.75%。当逆变侧交流系统较强 SCR 达到 6 时,案例 1 的 CFII 值为 0.47,案例 2 的 CFII 值为 0.51,案例 2 较案例 1 的 CFII 值提升了 8.51%。所以,逆变侧交流系统 SCR 越大,案例 1 和案例 2 的 CFII 值分别随之增大。另外,总体来看,案例 2 的 CFII 值相比于案例 1 均有所增加。但是案例 2 较案例 1 的 CFII 值提升程度逐渐减缓,即随着 SCR 的增加,CFII 提升率的总体趋势是越来越小。根据图 5(b)、图 6(b)可知,无论整流侧交流系统 SCR 如何改变,案例 1 和案例 2 的 CFII 值分别保持在约 0.22 和 0.27 不变,案例 2 的 CFII 值较案例 1 提升了约 0.05,CFII 提升率保持在约 22.7% 不变。

5.2.2 三相故障

三相接地是交流系统最严重的接地故障,为了更进一步研究同步调相机的作用效果,在逆变侧交流母线处设置三相接地故障,改变整流侧和逆变侧

交流系统 SCR,得到的 CFII 值如图 7 所示,CFII 提升率如图 8 所示。

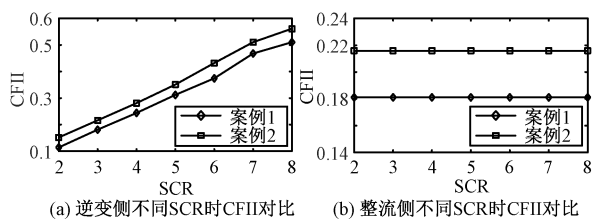


图 7 三相故障时案例 1 和案例 2 的 CFII 对比

Fig. 7 Comparison of CFII between case 1 and case 2 under three phase fault

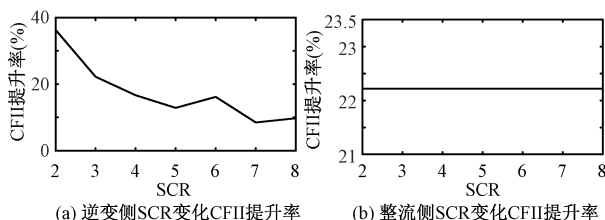


图 8 三相感性故障时的 CFII 提升率

Fig. 8 Increase rate of CFII under three phase fault

由图 7(a)、图 8(a)可知,在三相故障情况下,当逆变侧交流系统 SCR 为 2 时,案例 1 的 CFII 值为 0.11,案例 2 的 CFII 值为 0.15,案例 2 的 CFII 值较案例 1 提升了 36.36%。当逆变侧交流系统 SCR 为 6 时,此时交流系统较强,案例 1 的 CFII 值为 0.37,案例 2 的 CFII 值为 0.43,案例 2 较案例 1 的 CFII 值提升了 16.22%。所以,同单相故障情况类似,随着逆变侧交流系统 SCR 逐渐增大,虽然案例 2 的 CFII 值总比案例 1 的大,但是 CFII 提升率逐渐降低。根据图 7(b)、图 8(b)可知,无论整流侧交流系统 SCR 如何改变,案例 1 的 CFII 值保持 0.18 不变,案例 2 的 CFII 值保持约 0.22 不变,案例 2 的 CFII 值较案例 1 提升了约 0.04,CFII 提升率始终约为 22.22%。

综上所述,无论逆变侧交流母线处发生单相还是三相故障时,均可得到如下结论:

(1)改变逆变侧交流系统 SCR,投入同步调相机都能在一定程度上降低 CFII 值。随着逆变侧交流系统 SCR 增加,CFII 提升率总体上有下降趋势,说明逆变侧交流系统较弱时,同步调相机可以显著提高 LCC-HVDC 换相失败抵御能力。

(2)改变整流侧的交流系统 SCR,有无同步调相机投入对应的 CFII 值和 CFII 提升率均保持不变,有同步调相机投入时 CFII 值的降低幅度均相

同,所以整流侧交流系统强度不影响同步调相机对 LCC-HVDC 换相失败的作用效果。

5.3 不同故障水平下案例 1 和案例 2 的换相失败概率指标对比

在相同故障水平下,LCC-HVDC 是否换相失败也受同一周期内不同故障时刻的影响,因此有必要研究投入同步调相机后不同故障时刻的换相失败情况。换相失败概率是指同一故障水平下,将一个周期等分为 100 份,在一个周期内不同时刻发生故障导致 LCC-HVDC 发生换相失败的次数与总次数 100 的比值^[18,19],所以,采用换相失败概率来表征同一周期内不同故障时刻对 LCC-HVDC 换相失败的影响。

故障水平定义如式(13)所示^[20]:

$$F_L = \frac{U_L^2}{\omega L_f P_{dc}} \quad (13)$$

式中, L_f 为接地电感值。故障水平反映了故障的严重程度, F_L 值越大,故障越严重。

为了研究同步调相机对 LCC-HVDC 换相失败概率的影响,在逆变侧交流母线处设置单相和三相感性故障(逆变侧交流系统 SCR 均为 3),仿真研究了前述 2 个案例的换相失败概率。

5.3.1 单相故障

逆变侧交流母线处发生单相故障时,案例 1、案例 2 在不同故障水平下换相失败概率的变化情况如图 9 所示。

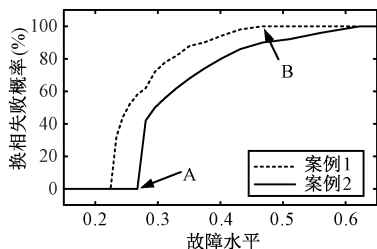


图 9 单相感性故障时的换相失败概率

Fig. 9 Probability of commutation failure under single phase to ground fault

由图 9 可知,在 A 点故障水平为 0.267 时,案例 2 比案例 1 的换相失败概率降低了 58%。随着故障水平的提高,在 B 点故障水平为 0.468 时,案例 2 比案例 1 的换相失败概率降低了 10%。结果表明,逆变侧交流母线发生单相故障时,投入同步调相机能降低不同故障水平下 LCC-HVDC 换相失败概率。

5.3.2 三相故障

交流母线处发生三相感性故障时,案例 1、案例

2 不同故障水平下换相失败概率的变化情况如图 10 所示。

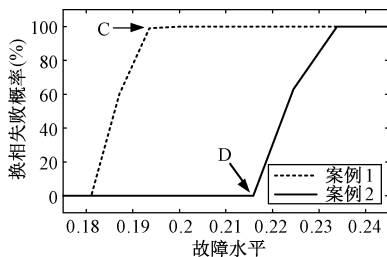


图 10 三相感性故障时的换相失败概率

Fig. 10 Probability of commutation failure under three phase fault

由图 10 可知,C 处故障水平为 0.194 时,案例 1 的换相失败概率已接近 100%,案例 2 没有发生换相失败,直到 D 处故障水平为 0.216 时,案例 2 的换相失败概率逐渐从 0 增加。结果表明,逆变侧交流母线处发生三相故障时,同步调相机能降低不同故障水平下 LCC-HVDC 的换相失败概率。

6 结论

本文针对同步调相机对 LCC-HVDC 换相失败的影响研究,首先进行了相关理论分析,然后在 PSCAD/EMTDC 中搭建了含同步调相机的 LCC-HVDC 系统模型。通过在逆变侧设置单相和三相故障两种故障类型,仿真分析得到如下结论:

(1)无论单相还是三相故障,从换相失败免疫性指标、换相失败概率指标来看,投入同步调相机后均可以提高 LCC-HVDC 的换相失败抵御能力,逆变侧交流系统强度越弱,同步调相机对 LCC-HVDC 换相失败的影响效果越明显。

(2)从换相失败免疫性指标来看,整流侧的交流系统强度不影响同步调相机对 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的作用效果。

参考文献 (References):

- [1] 袁清云 (Yuan Qingyun). 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景 (Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2005, 29 (14): 1-3.
- [2] 王玲, 文俊, 崔康生, 等 (Wang Ling, Wen Jun, Cui Kangsheng, et al.). 多馈入直流输电系统换相失败研究综述 (Research survey of commutation failure in MIDC transmission systems) [J]. 电工电能新技术

- (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (8): 56-65.
- [3] 刘婷婷, 文俊, 乔光尧, 等 (Liu Tingting, Wen Jun, Qiao Guangyao, et al.). 多馈入直流输电系统谐波相互影响的研究 (Study on harmonic effects of multi-infeed HVDC systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (1): 42-47.
- [4] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等 (Wang Yating, Zhang Yichi, Zhou Qinyong, et al.). 新一代大容量调相机在电网中的应用研究 (Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (1): 22-28.
- [5] Teleke S, Abdulahovic T, Thiringer T, et al. Dynamic performance comparison of synchronous condenser and SVC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (3): 1606-1612.
- [6] 郭春义, 李春华, 刘羽超, 等 (Guo Chunyi, Li Chunhua, Liu Yuchao, et al.). 一种抑制传统直流输电连续换相失败的虚拟电阻电流限制控制方法 (A DC current limitation control method based on virtual-resistance to mitigate the continuous commutation failure for conventional HVDC) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (18): 4930-4937.
- [7] 彭忠, 李少华, 李泰, 等 (Peng Zhong, Li Shaohua, Li Tai, et al.). 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略 (A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (17): 75-80.
- [8] 郭春义, 张岩坡, 赵成勇, 等 (Guo Chunyi, Zhang Yanpo, Zhao Chengyong, et al.). STATCOM 对双馈入直流系统运行特性的影响 (Impact of STATCOM on the operating characteristics of double-infeed HVDC system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (25): 99-106, 16.
- [9] 徐政 (Xu Zheng). 交直流电力系统的动态行为分析 (Dynamic performance analysis for AC/DC systems) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2004. 44-51.
- [10] 李岩松 (Li Yansong). 电力系统自动化 (Automation of electric power systems) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2004. 68-69.
- [11] 袁阳, 卫志农, 雷霄, 等 (Yuan Yang, Wei Zhinong, Lei Xiao, et al.). 直流输电系统换相失败研究综述 (Survey of commutation failures in DC transmission systems) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2013, 33 (11): 140-147.
- [12] 李志强, 蒋维勇, 王彦滨, 等 (Li Zhiqiang, Jiang Weiyong, Wang Yanbin, et al.). 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计 (Key technical parameters and optimal design of new types of large capacity synchronous condenser) [J]. 大电机技术 (Large Electric Machine and Hydraulic Turbine), 2017, (4): 15-22.
- [13] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure in single- and multi-infeed HVDC systems [A]. The 8th IEE international conference on AC and DC power transmission [C]. London, UK, 2006. 182-186.
- [14] Guo Chunyi, Zhang Yi, Gole A M, et al. Analysis of dual-infeed HVDC with LCC-HVDC and VSC-HVDC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27 (3): 1529-1537.
- [15] 陈欢, 王振, 杨治中, 等 (Chen Huan, Wang Zhen, Yang Zhizhong, et al.). 并联混合直流输电系统中传统直流和柔性直流暂态无功协调控制策略研究 (Coordinated reactive power control approach for LCC-HVDC and VSC-HVDC in hybrid parallel HVDC system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (6): 1719-1725.
- [16] 袁艺嘉, 赵成勇, 苑宾, 等 (Yuan Yijia, Zhao Chengyong, Yuan Bin, et al.). 弱交流电网条件下 VSC 无功类控制分析与优化 (Analysis and optimization of reactive power controllers of voltage source converters in weak AC grid) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (3): 696-703.
- [17] 徐政 (Xu Zheng). 联于弱交流系统的直流输电特性研究之一: 直流输电的输送能力 (Characteristics of HVDC connected to weak AC systems - Part 1: HVDC transmission capability) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 1997, 21 (1): 12-16.
- [18] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (1): 378-384.
- [19] Guo Chunyi, Yang Zhizhong, Jiang Bisong, et al. An evolved capacitor-commutated converter embedded with anti-parallel thyristors based dual-directional full-bridge module [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33 (2): 928-937.
- [20] 倪晓军, 赵成勇, 许韦华, 等 (Ni Xiaojun, Zhao Chengyong, Xu Weihua, et al.). 降低直流输电换相失败概率的改进拓扑及其控制策略 (An improved topology to decrease the commutation failure in LCC-HVDC and its control strategy) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (4): 811-820.

Study of impact of SC on ability to defend commutation failure of LCC-HVDC

WANG Qing¹, SHA Jiang-bo², YANG Peng-cheng¹, ZHAO Cheng-yong²,

XU Dong-hai³, HUANG Jin-jun⁴, YANG Zhi-zhong², GUO Chun-yi²

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China;

4. NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: The voltage fluctuations of AC bus in the inverter side of LCC-HVDC can readily lead to commutation failure. If synchronous condenser could be implemented to AC bus in the inverter of LCC-HVDC, it can significantly enhance the voltage stability to a certain extent, which also improves the ability of defending LCC-HVDC commutation failure. In this paper, the mechanism leading to the commutation failure of LCC-HVDC and using synchronous condenser to improve the commutation failure of LCC-HVDC is analyzed theoretically, then, the effect of synchronous condenser on raising the ability to defend commutation failure of LCC-HVDC is studied. The model of LCC-HVDC with synchronous condenser is developed in PSCAD/EMTDC to study the influence of the synchronous condenser on defending ability against commutation failure of LCC-HVDC under different fault types from the perspective of the CFII index and the probability of commutation failure index. The results show that the synchronous condenser can significantly improve the ability to defend the commutation failure of LCC-HVDC.

Key words: HVDC; synchronous condenser; commutation failure; commutation failure immunity index; probability of commutation failure