

与弱交流系统相连接的 HVDC 系统 临界换相电压降及逆变站的运行范围

袁旭峰, 文劲宇, 程时杰

(电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Research on Critical Commutating Voltage Reduction and Operating Range of Inverter Connected to a Weak AC System

YUAN Xu-feng, WEN Jin-yu, CHENG Shi-jie

(Electric Power Security and High Efficiency Laboratory (Huazhong University of Science and Technology),
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Both operating characteristic and voltage stability of HVDC system connected to weak AC power system are analyzed; the critical commutating voltage reduction and the variation of inverter operation range are adopted to research the mechanism of commutation failures in line-commutated thyristor inverter of such HVDC system; then the impacts of different reactive power compensating devices on power transmission of HVDC system are compared and the conclusion is obtained, that is, in order to raise the critical commutating voltage reduction, reduce the probability of occurring commutation failure effectively during the fault, enlarge the operation range of inverters and improve the voltage stability of weak AC power system, application of STATCOM in HVDC system connected to weak AC power system can yet be regarded as an effective measure. This conclusion is validated by the results of simulation that is carried out by the CIGRE benchmark HVDC test system with different reactive power compensating devices including STATCOM.

KEY WORDS: weak AC power system; commutation failure; short circuit ratio; STATCOM; critical commutating voltage reduction; HVDC power transmission

摘要: 分析了与弱交流系统相连的直流输电系统的运行特性及电压稳定性, 采用临界换相电压降指标和逆变器的运行范围变化研究逆变器换相失败的机理, 并比较了各种无功补偿方式对 HVDC 输电系统的影响, 得出在与弱交流系统相连接的直流输电系统中使用静止同步补偿器可提高系统的临界换相电压降, 有效减小故障过程中换相失败发生的概率, 扩大逆变器的运行范围, 提高弱交流系统电压稳定性的结论, 并通过对国际大电网会议(CIGRE)标准高压直流输电测

试系统的仿真验证了该结论。

关键词: 弱交流系统; 换相失败; 短路比; 静止同步补偿器; 临界换相电压降; 高压直流输电

0 引言

直流输电系统所连接交流系统容量的相对大小在很大程度上决定了交、直流输电系统间的相互作用及运行特性。通常用交流母线的短路容量与直流额定输送功率的比值, 即短路比(short circuit ratio, SCR)来表示。与直流系统所联交流系统的强弱可划分为: 极弱系统($SCR < 2$)、弱系统($2 < SCR < 3$)以及强系统($SCR > 3$)。在考虑无功功率补偿设备的作用时, 引入有效短路比(effective SCR, ESCR)概念, 即交流母线的短路容量和补偿无功功率容量之差与直流额定输送功率的比值^[1-2]。

联于弱交流系统的直流系统在运行过程中, 存在高动态过电压、电压不稳定、谐波谐振、故障恢复的暂态过程不稳等问题。解决这些问题的传统途径是使用同步调相机或静止无功补偿器(static var compensator, SVC)或者改变直流系统的控制方式^[1-9]; 然而, 这些解决方法具有一定的局限性。同步调相机既可以发出容性功率, 又可发出感性功率, 能够有效地提高弱交流系统电压的稳定性和减少交流电压波动造成的换相失败, 但其调节速度较慢、成本较高, 且其励磁调节动态特性还可能引起系统低频振荡的问题^[4]。SVC 能向直流输电系统提供平滑的无功功率支持, 但降低了交流系统的

ESCR, 在故障状态时常会引起继发性的换相失败^[3-4]。基于电压源逆变(voltage source inversion)技术的静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)是一种新型的无功补偿装置, 既能平滑地发出或吸收无功功率, 又能改进交流系统的电压品质, 提高系统暂态稳定和增强系统阻尼, 有效地抑制系统的低频振荡^[10-12]。

本文从理论上探讨了将传统补偿无功功率的几种方法用于与弱交流系统相连的直流输电系统时, 系统运行特性不能有效得到改善的原因; 提出可以采用临界换相电压降来评估联于弱交流系统的 HVDC 运行特性; 指出采用固定电容和 SVC 无功补偿方式时, 将会降低系统的临界换相电压降, 更易导致直流输电系统的继发性换相失败, 采用静止同步补偿器技术则是一条提高弱交流系统强度的途径, 可收到与同步调相机类似的效果, 还可有效避免同步调相机所带来的低频振荡问题。为验证所提方法的有效性, 本文在国际大电网会议(CIGRE)标准直流输电测试系统上进行了仿真分析^[13], 结果证明了上述观点。

1 直流输电系统换相失败机理及临界换相电压降

换相失败是直流输电中换流站最为常见的故障。造成换相失败的原因主要有: 交流电压下降; 直流电流增大; 触发角或关断角过小等^[14-15]。本文主要分析与弱交流系统相连逆变站换相失败的机理。

图 1 为直流输电逆变器的换相过程及电压突变对换相过程的影响。图中: E_m 为交流相电压的幅值; a 为触发角; m 为换相角; g 为熄弧超前角或关断余裕角。可以看出, 在换相角 m 期间, C 相和 A 相换相, 换流器交流侧 A、C 两相短路, 线电压 e_{ca} 全部降落在 A、C 两相的换相电抗上, 每相换相电抗的降落各为 e_{ca} 的一半, 此时逆变器直流侧电位处于 e_c 与 e_a 曲线之间的中点上, 即图中阴影部分 A 的上沿。由图 1 可知, 在给定熄弧超前角为 g_0 时,

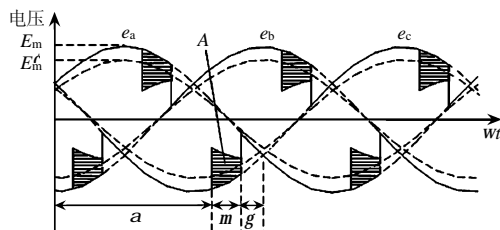


图 1 逆变器换相过程中交流电压波形
Fig. 1 The AC commutation voltage at the inverter side

换流过程既与换相角的大小有关, 又与换相积分面积 A (即图中所示阴影面积) 有关^[16]。

换相角为

$$m = -g + \arccos\left(\cos g - \frac{2X_c I_d}{\sqrt{3}E_m}\right) \quad (1)$$

式中: X_c 为换相电抗; I_d 为直流侧电流。由式(1)可知, 换相角与交流侧电压、直流电流、换相电抗及熄弧超前角有关。

弱交流系统具有较大的等值电抗, 其换流站母线电压对无功功率的波动非常敏感, 特别是在交流侧故障时, 会导致换流站交流侧母线电压幅值 E_m 急剧降落^[14-15]。同时, 由于系统等值阻抗的作用, 换流站的换相电抗 X_c 较大, 进而使得换相过程中所需的换相角就更大。

如图 1 所示, 为保证换流站的换相成功, 既需要足够大的熄弧超前角 g , 还必须保证有足够大的换相积分面积。本文假定在换流站交流侧母线电压幅值为 E_m 时, 换相成功所需换相积分面积为 A , 由文献[16]可知, A 可由式(2)计算

$$A = \frac{E_m}{2} [\cos a - \cos(a + m)] = \frac{E_m}{2} (\cos a + \cos g) \quad (2)$$

假设交流侧母线电压幅值 E_m 突然下降时, 换流站控制器尚未动作, 即换流器触发角 a 仍保持不变。由于流过换流管的电流不会突变, 为保证换相成功, 只有换相积分面积 A 保持不变时, 电流才可能由一相转移到另一相。由图 1 可知, 熄弧超前角 g 必须下降, 才能保证有足够的换相积分面积; 而熄弧超前角 g 必须大于最小熄弧超前角 g_{min} , 其下降的范围较小。因此, 从换相积分面积的角度考虑, 换流站交流侧母线电压的幅值不能降得过低, 否则交流系统就不能为换流站提供足够的换相积分面积来完成换相, 进而会导致换相失败。

由于直流输电系统联于弱交流系统时, 其负载的变化或故障将引起交流侧母线电压的大幅度下降, 容易引起逆变器的换相失败。本文引入临界换相电压降指标来表征该类型直流输电系统换相过程的稳定程度。临界电压降落 ΔU 的推导过程如下:

如交流侧母线电压幅值突然下降至 E'_m , 熄弧超前角为 g' , 则有

$$A = \frac{E'_m}{2} (\cos a + \cos g') \quad (3)$$

由式(2)(3)有

$$\frac{E'_m}{E_m} = \frac{\cos a + \cos g'}{\cos a + \cos g} \quad (4)$$

交流侧电压突变前直流侧电流为

$$I_d = \frac{E_m}{2X_c} (\cos a + \cos g) \quad (5)$$

如果考虑整流侧为定电流控制, 为维持直流电流恒定不变, 当逆变侧交流电压下降时, 熄弧超前角将下降至 g' , 即

$$I_d = \frac{E'_m}{2X_c} (\cos a + \cos g') \quad (6)$$

当交流侧电压下降且导致直流侧电流上升, 并使逆变侧熄弧超前角下降至最小允许值 g_0 , 导致换相失败, 此时直流电流有

$$I'_d = \frac{E'_m}{2X_c} (\cos a + \cos g_0) \quad (7)$$

由式(6)(7)可得

$$\frac{I'_d}{I_d} = \frac{\cos a + \cos g_0}{\cos a + \cos g'} \quad (8)$$

再经过运算, 可得

$$\cos g' = \frac{I_d}{I'_d} (\cos a + \cos g_0) - \cos a \quad (9)$$

将式(9)代入式(4)可得

$$\frac{E'_m}{E_m} = \frac{I'_d}{I_d} \frac{\cos a + \cos g}{\cos a + \cos g_0} \quad (10)$$

由式(5)可得

$$\cos a = \frac{2I_d X_c}{E_m} - \cos g \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)可得

$$\frac{E'_m}{E_m} = \frac{2I'_d X_c}{2I_d X_c + E_m (\cos g_0 - \cos g)} \quad (12)$$

令 $\Delta U = (E_m - E'_m) / E_m$, 则有

$$\Delta U = 1 - \frac{2I'_d}{2I_d + E_m (\cos g_0 - \cos g) / X_c} \quad (13)$$

其中 ΔU 即逆变侧交流母线的临界换相电压降, 也是避免电压换相失败的交流电压下降裕度, 一旦换相电压降超过该值, 将导致换相失败。

由上述分析可知, 与弱交流系统相联的直流输电系统中, 交流系统的等值电抗较大, 会使逆变站的临界换相电压降指标相对减小。当负载变化或故障时, 逆变站交流侧母线电压降落值又较大, 将进一步使得系统的临界换相电压降指标减小, 更易引起逆变器换相失败的发生。

2 传统无功功率补偿方式对换相过程的影响

在直流输电系统中, 无功补偿设备除提供逆变器所消耗的无功功率以外, 还需供给负荷所需要的

部分或全部无功功率。因此, 对于与弱交流系统相连接的逆变站, 其无功功率的调节和交流电压的稳定问题相对来说更为严重。目前, 补偿直流输电系统换流站无功功率的设备主要有如下几种: 固定电容、静止无功功率补偿器以及同步调相机。本文从逆变器运行范围及临界换相电压降的角度对几种传统无功补偿方式进行分析。

根据文献[15]的分析可知: 在 $P_n - Q_n$ 坐标系中, 等 I_d 特性是以原点为圆心的圆, 逆变器的正常工作应限制在最大直流电流 I_{dmax} 和最小直流电流 I_{dmin} 之间; 等 U_d 特性是一条通过原点的直线, 它与 P_n 轴的夹角为 j ; 等 g 特性是一条曲线。由此, 直流输电系统逆变器的有功和无功功率的运行范围可用图 2 中粗线所围成的区域表示。图中: U_{d0} 为逆变器的空载直流电压; X_{cmin} 和 X_{cmax} 分别为交流系统的最小等值电抗和最大等值电抗; P_{de} 为额定有功功率; I_{de} 为额定直流电流; I_{dmin} 和 I_{dmax} 分别为直流电流允许最小值和最大值; g_0 为逆变侧熄弧超前角允许最小值; j_0 为额定功率因数角。由图可知, 左下侧的曲线与 X_c 有关, X_c 的增大使曲线上翘, 逆变器的运行范围减小。该图表明, 受端交流系统越弱, 逆变器的运行范围越小, 直流系统输电能力降低, 输送相同直流功率所消耗的无功功率增加, 逆变站换相失败的几率也就越大。

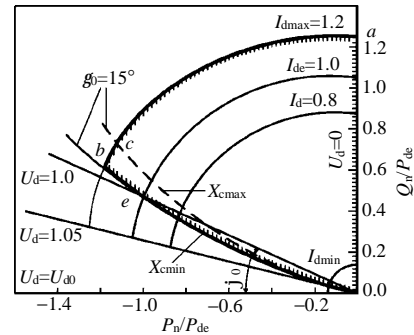


图2 逆变器运行范围

Fig. 2 Operation range of inverter

当采用固定电容(fixed capacitor, FC)进行无功功率补偿时, 由于它可有效补偿换流站所消耗的无功功率, 系统运行范围从第二象限向第三象限平移, 在不考虑交流系统等值电抗的影响时, 逆变器的可运行范围大小不变^[7]。然而, 随着并联固定电容补偿的无功功率容量增大, 系统的等值电抗也随之增大, 由式(1)(13)可知, 逆变器换相过程所需的

换相角 m 必然增大、临界换相电压降 ΔU 必然减小, 逆变器的运行范围也将变小, 导致直流系统输电能力的减弱, 更易造成逆变器换相失败。

当采用同步调相机(synchronous compensator, SC)和静止无功补偿器进行补偿时, 由于2种补偿方式向系统注入的无功均可连续平滑调节, 可有效提高逆变器的运行范围^[7]。SVC向系统注入的无功功率为^[17]

$$Q_{\text{SVC}} = Q_{\text{C}} - Q_{\text{L}} = \left(\omega C - \frac{2b - \sin 2b}{\pi \omega L} \right) U^2 \quad (14)$$

式中: C 为投切电容器; U 为投切点交流系统电压有效值; L 为电抗器; Q_{C} 为晶闸管投切电容器(thyristor switched capacitor, TSC)向系统注入的无功功率; Q_{L} 为晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)从系统吸收的无功功率; b 为开通角。由式(14)可得 SVC 的等值电抗为

$$X_{\text{SVC}} = -\frac{\pi \omega L}{2b - \sin 2b - \pi \omega^2 LC} \quad (15)$$

可见, SVC 的等值伏安特性由 TCR 和 TSC 共同构成, 导通角 b 从 0 增加到 $\pi/2$ 的过程中, X_{SVC} 将由容性最大值连续地变为感性最大值。因此, SVC 可视为一个电源电压恒定、内电抗可变的同步调相机。

如图 2 所示, 分析 SVC 处于某一工况下逆变器运行范围的变化情况。当 X_{SVC} 表现为感性电抗时, 可减小系统等值电抗, 扩大逆变器的运行范围。但 SVC 需要从系统中吸收无功功率, 而不是注入无功功率, 对于弱交流系统而言, 将导致系统的电压失稳。当 X_{SVC} 表现为容性阻抗时, 可向系统注入无功功率, 但同时增大了系统等值电抗, 使得直流系统传输容量降低。此外, 根据第 1 节的分析结果可知, 它还会使换相过程所需的换相角 m 增大, 导致临界换相电压降 ΔU 减小, 容易引起换相失败。

需要说明的是, 由于 SVC 的无功功率可平滑调节, 即 SVC 可从一种工作状态迅速转换至另一种工作状态, 实际上逆变器的工作范围是扩大的; 而 SVC 从一种工作状态转换至另一种工作状态的调节时间始终不为零。因此, 分析 SVC 的特定工作状态对逆变器的影响十分必要。

同步调相机通过励磁系统可平滑调节逆变站的无功功率, 在过励磁状态时, 同步调相机向系统注入无功功率; 在欠励磁状态时, 从系统吸收无功功率。由于同步调相机本身具有一定的内电抗, 既可扩大逆变器的运行范围, 又可减小系统等值电

抗, 进而减小换相过程所需的换相角 m , 增大临界换相电压降 ΔU , 提高直流系统的输送容量。因此, 对于弱交流系统而言, 采用同步调相机是提高交流侧系统电压稳定和减小换相失败的有效方法。由于同步调相机通过一般励磁系统来调节无功功率时调节时间较长; 而采用快速励磁系统时, 虽然减小了调节时间, 但当直流输电系统传输容量不变时, 易造成低频振荡^[4,18]。

3 STATCOM 对换流器换相过程的影响

STATCOM 也称为静止无功发生器, 由全控电力电子元件组成的电压源型换流器所构成^[9]。STATCOM 与电力系统的连接如图 3 所示。图中: U_{ASVG} 为 STATCOM 的交流输出电压; U_{S} 为接入电力系统的电压; U_{C} 为电容的直流电压; C 为直流电容, $r + jx$ 为 STATCOM 与系统间等值电抗。

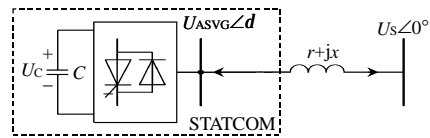


图 3 STATCOM 与系统的连接

Fig. 3 Connection of STATCOM and AC system

在理想的稳态情况下, STATCOM 既不吸收也不发出有功功率, 假设 $r = 0$, 根据文献[17]可知:

$$Q_{\text{ASVG}} = \frac{U_{\text{S}}^2 \sin 2d}{2x} \quad (16)$$

$$U_{\text{ASVG}} = K U_{\text{C}} \sin \frac{q}{2} \quad (17)$$

式中: Q_{ASVG} 为 STATCOM 输出的无功功率; K 为与逆变器的结构有关的常数; q 为脉冲宽度; d 为 U_{ASVG} 的相角。

由式(17)可知, 调节 d 即可控制 U_{ASVG} 的幅值和相位, 进而调节 STATCOM 注入系统的无功功率 Q_{ASVG} 。此时, STATCOM 的功能与同步调相机类似, 相当于一个幅值和相位均可变化的电压源。根据第 1 节描述的 SVC 无功补偿原理可知, SVC 通过调整电感接入系统时间的长短来改变自身的等值电抗, 而 STATCOM 则是通过调整其交流输出电压的幅值与相位来实现。如图 3 所示, STATCOM 本身也具有一定的感性等值电抗, 因此在交流电网中接入 STATCOM 时, 也并联一个感性等值电抗, 将使系统等值电抗减小, 进而使得交流电网强度得以增强, 其逆变器运行范围如图 4 所示, 图中 P'_{max} 为最大可传送有功功率。可以看出, 装设 STATCOM

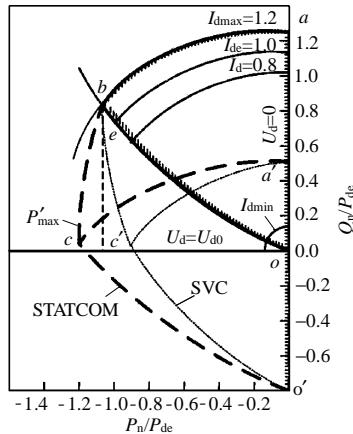


图 4 STATCOM 与 SVC 的逆变器运行范围
Fig. 4 Operation range of inverter
in STATCOM and SVC

后, 逆变器的运行范围从原来的 $o-b-a-o$ 围成的区域扩展至 $o'-c-b-a-o'$ 围成的区域。

需要指出的是, 由于 STATCOM 容量的限制, 相对同步调相机而言, 逆变器所扩展的运行范围较小, 同时直流系统输送容量的提高程度也较小。

图 5(a) 为 STATCOM 的电压调整示意图, 当系统的运行条件变化使系统节点电压下降时, STATCOM 加大 d 以增加注入系统的无功功率, 使节点电压维持不变; 反之, 如系统节点电压上升, 它通过减小 d 来维持节点电压不变。与 SVC 的运行特性相比较, STATCOM 的运行特性如图 5(b)^[17] 所示, 其无功功率的调节范围更大。当 STATCOM 接入弱交流系统时, 如图 4 所示, 其逆变器的运行范围也远大于装设 SVC 的逆变站, 有利于保证逆变站交流系统的电压稳定。

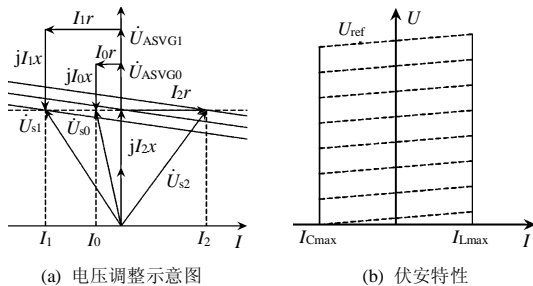


图 5 STATCOM 的电压调节特性
Fig. 5 The voltage regulation characteristic of STATCOM

从临界换相电压降指标角度出发, 装设 STATCOM 装置后, 交流系统的等值电抗得以减小, 从而使得换相过程所需的换相角 m 也减小, 临界换相电压降 ΔU 得以增大, 减小了逆变站发生换相失败的几率。图 4 中虚线 bc 所示逆变站最大传输容

量的变化情况进一步说明, 随着 STATCOM 注入无功功率的增加, 直流输电系统的最大传输容量也增大。而装设 SVC 的换流站则与之相反, 如图中曲线 bc' 所示, 逆变站的最大传输容量减小, 增加了发生换相失败的几率。此外, 相对同步调相机而言, STATCOM 的调节时间短, 且由于不存在转子的动态特性, 不会使交流侧系统产生低频振荡。

由上述分析结果可知, STATCOM 较其它传统的无功功率补偿方式能更有效提高联于弱交流系统的直流输电系统的运行特性。

4 仿真分析

4.1 直流输电系统模型

本文采用文献[13]的高压直流输电标准测试系统进行仿真分析, 为降低逆变站所连接交流系统的强度, 对逆变侧的交流参数进行了适当的修改。仿真系统的基本参数为: 直流输电线路额定电压 500 kV, 直流输电线路额定电流 2 kA; 整流侧和逆变侧平波电抗(包括线路电抗)均为 0.5968 H; 整流器换流电抗为 10.7127 Ω , 逆变器换流电抗为 0.4761 Ω ; 每一侧直流线路电阻 2.5 Ω , 直流输电线路总对地电容为 26 μF ; 逆变侧交流电压源的串联电感参数由 0.0365 H 增加为 0.05375 H, 使原来短路比由 2.5 下降至 2.0。对于逆变侧弱交流系统, 分别采用 FC、SVC、SC 及 STATCOM 进行补偿。其中固定电容向系统提供 220 Mvar 的无功; SVC 由 3 组 TSC 和 1 组 TCR 构成, 每组 TSC 向系统注入的最大无功功率为 92 Mvar, TCR 从系统吸收的最大无功功率为 93 Mvar; 同步调相机容量为 300 Mvar; STATCOM 由 6 脉波的三相电压源型逆变器构成, 其容量为 ± 275 Mvar。

4.2 交流侧三相短路故障

图 6 为直流输电系统在启动和三相短路故障时的仿真结果。由图可见, 在直流输电系统启动过程中, 无论采用同步调相机还是采用 STATCOM 进行无功补偿, 交流侧电压均存在一定的过电压, 但幅值较小; 而采用固定电容补偿和 SVC 补偿时, 启动过程较为平缓。此外, 由于 STATCOM 具有较快的响应特性, 与其他补偿方式相比, 能更快使系统进入稳定运行状态。

1.5 s 时逆变站交流系统发生三相接地短路故障, 持续时间为 0.04 s。仿真结果表明, 采用固定电容补偿和 SVC 补偿时均会产生继发性的换相失

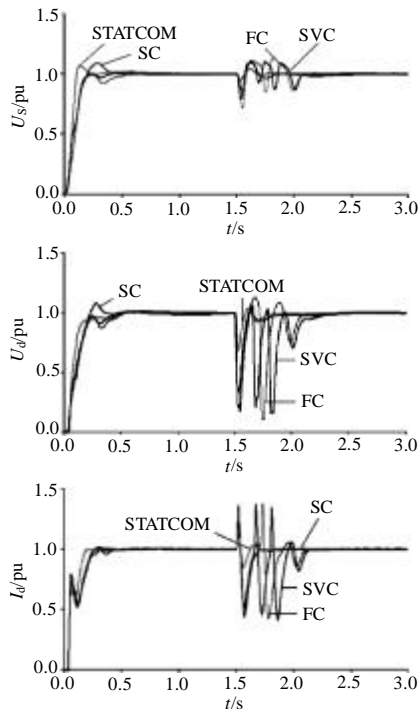


图 6 直流系统启动及交流侧三相短路故障运行结果

Fig. 6 The simulation results of the DC system during the start-up and a three phase grounding fault

败；而同步调相机或 STATCOM 能有效避免继发性的换相失败。STATCOM 比同步调相机的响应速度更快，能有效避免直流输电线路直流电压的下降和直流电流的上升，也能使整个系统更快地从故障过程恢复至正常的运行状态。

4.3 直流输电线路断路器故障

图 7 为直流输电线路发生永久性断路器故障，即直流输电系统输送功率突然中断时的仿真结果。

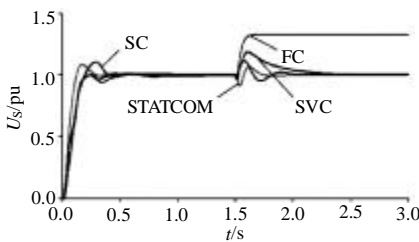


图 7 直流侧发生永久性断路器故障对交流侧输出电压的影响

Fig. 7 Influence of a permanent DC break fault on the AC voltage

由图 7 可知，固定电容补偿装置不能连续调节无功功率，在直流输电线路发生断路器故障时，将在弱交流系统中产生较大的稳态过电压；SVC 虽然具备一定调节注入无功功率的特性，但其响应速度慢，也将产生较大的暂态过电压，其持续时间较长；

同步调相机和 STATCOM 均能有效调整注入无功功率，快速抑制弱交流系统的电压波动。与同步调相机比较，STATCOM 能使弱交流系统的电压更快地恢复至额定值。

4.4 交流侧电源电压幅值下降 40%

由于弱交流系统的电压幅值受负载变化或交流远端故障的影响较为严重，本文通过使弱交流系统电源电压幅值永久性突降的故障来模拟弱系统的这一特征。

如前所述，当弱交流系统分别采用不同的方式进行无功补偿时，系统的临界电压降参数将受到不同的影响。其中，采用固定电容补偿方式时系统的临界电压下降最小；采用 SVC 补偿时的临界电压下降次之；相同容量的同步调相机和 STATCOM 的临界电压下降基本相同，均远大于 FC 和 SVC 的临界电压下降值。在本文的直流输电仿真系统中，弱交流系统电源电压的幅值为 215.05 kV 时各种补偿方式的临界电压降如表 1 所示。

表 1 各种补偿方式的临界电压降

Tab. 1 The critical commutation voltage reduction with different reactive power compensating devices

补偿方式	FC	SVC	SC	STATCOM
临界电压降/kV	10	25	77	65

由于本文中 STATCOM 的容量比同步调相机的容量小，由表 1 可知，STATCOM 临界电压降的值比同步调相机的小。图 8 为交流电压幅值在 1.5 s 下降 40% 时，分别采用同步调相机和 STATCOM 补偿时的逆变侧交流电压波形。

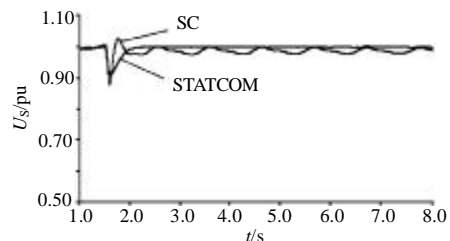


图 8 交流侧电源电压下降 40% 时的补偿效果

Fig. 8 Compensation results under forty percent decrease of AC source voltage

由图 8 可知，当交流侧电源电压突降至 40% 时，同步调相机和 STATCOM 均可向逆变站提供无功功率支持，维持逆变侧交流电压幅值基本不变。此外，采用同步调相机补偿时，逆变侧交流电压的幅值会有一些的波动，产生低频振荡的问题；而 STATCOM 则有效地克服了该问题。

5 结论

(1) 弱交流系统的等值电抗较大, 会使逆变站的临界换相电压降和逆变站的运行范围相对减小。

(2) 固定电容补偿方式将进一步降低逆变站的临界换相电压降和运行范围。

(3) SVC 能够扩大逆变站无功功率的调节范围, 扩大逆变站总的运行范围。但工作在容性状态时, 降低了临界换相电压降和逆变站的最大传输功率容量, 易引起换相失败; 工作在感性状态时, 虽然增加了临界换相电压降, 但由于需要吸收无功功率, 从而容易引起弱交流系统的电压失稳。

(4) STATCOM 与同步调相机均能有效扩大逆变站的运行范围, 提高系统的临界换相电压降, 提高与弱交流系统相连的直流输电系统的运行特性。两者相比, STATCOM 具有更快的动态响应特性, 能使系统更快地从故障状态中恢复, 且能克服同步调相机可能带来的低频振荡问题。

参考文献

- [1] 徐政. 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[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 12-16.
Xu Zheng. Characteristics of HVDC connected to weak AC systems-part 1: HVDC transmission capability[J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 12-16(in Chinese).
- [2] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之二——控制方式与电压稳定性[J]. 电网技术, 1997, 21(3): 1-4.
Xu Zheng. The characteristics of HVDC connected to weak AC systems-part II: control modes and voltage stability[J]. Power System Technology, 1997, 21(3): 1-4(in Chinese).
- [3] Nayak O B, Gole A M, Chapman D G, et al. Dynamic performance of static and synchronous compensators at an HVDC inverter bus in a very weak AC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(3): 1350-1358.
- [4] Zhuang Y, Menzies R W, Nayak O B, et al. Dynamic performance of a STATCOM at an HVDC inverter feeding a very weak AC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 958-964.
- [5] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 18-21.
Zhou Changchun, Xu Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 18-21(in Chinese).
- [6] Hansen A, Havemann H. Decreasing the commutation failure frequency in HVDC transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1022-1026.
- [7] Pilotto L A S, Szechtman M, Hammad A E. Transient AC voltage related phenomena for HVDC schemes connected to weak AC

- systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(3): 1396-1404.
- [8] 王雁凌, 任震. 静止无功补偿器在高压直流输电中的应用[J]. 电网技术, 1996, 20(12): 34-37.
Wang Yanling, Ren Zhen. Application of SVC in HVDC system[J]. Power System Technology, 1996, 20(12): 34-37(in Chinese).
- [9] 孙元章, 王志芳, 卢强. 静止无功补偿器对电压稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 373-376.
Sun Yuanzhang, Wang Zhifang, Lu Qiang. The experimental research on STATCOM to mitigate the voltage sag under load disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 373-376(in Chinese).
- [10] 栗春, 马晓军, 姜齐荣, 等. 用 STATCOM 改善系统电压调节特性的动模实验[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 46-49.
Li Chun, Ma Xiaojun, Jiang Qirong, et al. The experimental research on STATCOM to mitigate the voltage sag under load disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 46-49(in Chinese).
- [11] 栗春, 马晓军, 姜齐荣, 等. STATCOM 提高系统暂态稳定及阻尼的动模实验研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 36-40.
Li Chun, Ma Xiaojun, Jiang Qirong, et al. Transient stability enhancement and damping improvement by STACOM physical experimental study[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 36-40(in Chinese).
- [12] 栗春, 姜齐荣, 王仲鸿. STATCOM 电压控制性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 46-50.
Li Chun, Jiang Qirong, Wang Zhonghong. Voltage regulation stability analysis of STACOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 46-50(in Chinese).
- [13] Szechtman M, Wess T, Thio C V. A benchmark model for HVDC system studies[C]. Fifth International Conference on AC and DC Power Transmission, London, 1991.
- [14] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [15] 浙江大学直流输电电研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [16] Thio C V, Davies J B, Kent K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [17] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [18] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

收稿日期: 2007-03-14.

作者简介:

袁旭峰(1976—), 男, 博士, 研究方向为高压直流输电的运行与控制、FACTS 技术在电力系统中的应用, 现任教于贵州大学电气工程学院, E-mail: ee.xfyuan@gzu.edu.cn;

文劲宇(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制;

程时杰(1945—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用。

(责任编辑 马晓华)