

矢量电流控制的电压源换流器式 高压直流输电系统动态特性分析

魏晓云¹, 孙辉¹, 徐凤阁², 马千³

(1. 大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁省 大连市 116024;

2. 大连供电公司, 辽宁省 大连市 116011; 3. 辽宁省电力公司调度通讯部, 辽宁省 沈阳市 110006)

Dynamic Performance Analysis of Vector Current Controllers for VSC-HVDC

WEI Xiao-yun¹, SUN Hui¹, XU Feng-ge², MA Qian³

(1. Department of Electrical and Electronics Engineering, DaLian University of Technology, Dalian 116024,

Liaoning Province, China; 2. Dalian Power Supply Company, Dalian 116011, Liaoning Province, China;

3. Dispatching Communication Center, Liaoning Power Company, Shenyang 110006, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: When the AC system is faulted, the voltage magnitude is varied at point-of-common coupling (PCC), normally accompanied with phase angle jump. Voltage source converter-high voltage direct current transmission (VSC-HVDC) systems with vector current controller (VCC) and dual vector current controller (DVCC) were presented and analyzed under balanced and unbalanced fault considering phase angle jump in PSCAD/EMTDC. The dynamic performance of VSC-HVDC with VCC and DVCC was investigated. The results show that DVCC can restraint 100 Hz oscillation with certain condition, but its dynamic performance is inferior to VCC and susceptible to phase angle jump, weakening the VSC-HVDC original superiority.

KEY WORDS: high voltage direct current transmission; voltage source converter (VSC); vector current control (VCC); dynamic performance

摘要: 通常在交流系统故障时, 公共耦合点电压不仅幅值会发生变化, 同时还伴随着相角跳变。基于电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC, 建立了电压源换流器式高压直流输电 (voltage source converter-high voltage direct current transmission, VSC-HVDC) 模型及电流矢量控制器 (vector current controller, VCC)、双矢量电流控制器 (dual vector current controller, DVCC) 模型, 分别就对称三相短路故障、不对称两相短路故障及不同相位跳变角情况进行仿真分析。研究了系统故障条件下, 对 VSC-HVDC 分别采用 VCC、DVCC 时的系统动态特性。结果表明, DVCC 能更好地抑制直流电压的 2 倍频振荡, 但其动态特性比 VCC 差, 且对相角跳变更敏感, 可能会弱化 VSC-HVDC 应有的技术优势。

关键词: 高压直流输电; 电压源换流器; 矢量电流控制; 动

态特性

0 引言

电压源换流器式高压直流输电技术 (voltage source converter-high voltage direct current transmission, VSC-HVDC) 是一种基于电压源换流器 (voltage source converter, VSC) 和自关断器件的新型输电技术, 由于采用高频脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 技术, VSC-HVDC 能快速、独立地控制有功及无功, 提高系统电压及频率的稳定性^[1]。

基于其独特的技术特点, VSC-HVDC 在大规模风电并网、电网互联、电力交易、城市配网增容及电能质量提高等方面都有着广阔的应用前景^[2-7]。VSC 作为直流输电系统的核心, 在电网对称情况下, 其运行具有交流电流正弦、畸变小、功率因数高、直流电压恒定的优点。然而, 当系统不对称时, 尤其是不对称故障引起电压跌落时, 电网电压中的负序及谐波分量会恶化 VSC 的运行性能, 在直流侧出现大量偶次谐波, 在交流侧出现奇次谐波分量, 使 VSC 换流器及其他主要元件遭受过电压、过电流的危害, 影响 VSC-HVDC 的安全稳定运行^[8-10]。

矢量电流控制是基于同步旋转坐标系下的直接电流控制策略, 具有动态响应速度快、能有效实现限流控制等优点, 因而在各种基于 VSC 的应用中得到了广泛关注及研究^[11-13], 对于 VSC-HVDC 也是如此^[5-6, 14-17]。针对 VSC 运行性能易受系统电压不对称

的影响，大量文献开展了系统电压不对称情况下矢量电流控制的研究。文献[18]指出，基于正向同步坐标变换的电流矢量控制在对称系统电压条件下具有优越的控制响应特性，但在系统电压不对称情况下由于正向同步坐标系中的二倍频负序分量使电流内环PI控制无法实现无静差调节。为此，基于负序电压前馈的电流矢量控制和双矢量电流控制策略在VSC-HVDC系统中也得到了研究^[16]。

在实际的直流联网系统中，为提高联网交流系统的暂稳态特性，要求VSC-HVDC即使在交流系统故障情况下也应该具有良好的动态响应特性。而DVCC中电压、电流的正负序分解会带来控制系统延时，削弱VSC-HVDC的动态特性^[17]，使VSC-HVDC的技术特点不能充分体现。在已有研究中关于DVCC控制对VSC-HVDC系统动态特性的影响并未讨论。另外，电网故障除了引起VSC-HVDC的公共连接点(point-of-common coupling, PCC)电压幅值的跌落，还可能使PCC电压的相角发生跳变，对矢量电流控制会产生一定影响。在VSC-HVDC及其矢量电流控制策略研究中，这些问题亟待明确。

本文就VCC、DVCC在系统电压对称、不对称情况下，考虑到相角跳变因素，进行了多角度仿真研究，表明DVCC在静态中抑制直流电压倍频脉动更具成效，但其动态特性劣于VCC，更易受相位跳变影响，因此为了提高VSC-HVDC运行的可靠性、经济性，有必要根据其实际应用条件，确定合适的控制方案。

1 故障系统及相角跳变

在图1所示系统中，系统电压为 \dot{E}_s ，系统阻抗 $Z_s = |Z_s| \angle \varphi_s$ ， $Z_F = |Z_F| \angle \varphi_F$ 为故障点与PCC点之间的线路阻抗。当线路某处发生三相短路故障时，PCC点电压为

$$\dot{U}_{PCC} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_s} \dot{E}_s \quad (1)$$

PCC点电压跌落幅值与故障点距PCC点的距离有关。

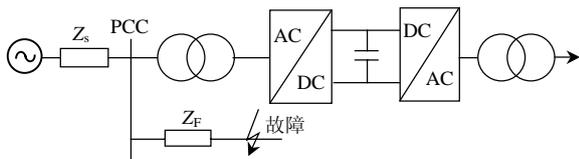


图 1 故障系统示意图

Fig. 1 Diagram of the faulted system

若 $\varphi_F \neq \varphi_s$ ，故障时 \dot{U}_{PCC} 较故障前的相角会有

一个突然的变化，称之为相角跳变，此角度为 $\varphi_{\text{jump}} = \arg Z_F - \arg(Z_F + Z_s)$ 。

在输电网中，系统的X/R值和线路的X/R值差别较小， φ_{jump} 很小；而在中低压系统中，系统的X/R值较大，线路的X/R值较小， φ_{jump} 较大。设阻抗角 $\alpha = \varphi_F - \varphi_s$ ，在输电网中通常 $\alpha = 0^\circ$ ，最大值一般不超过 10° ；配网架空线中 $\alpha = -20^\circ$ ；配网电缆中 $\alpha = -60^\circ$ 。在对大多数电压暂降情况的研究中，可认为相位跳变角在 $0^\circ \sim -60^\circ$ 之间变化^[19]。故障引起的PCC点电压跌落幅值及相角跳变间的关系如图2所示。可见，电压跌落越严重，相角跳变越大，并且在电压跌落同等程度下，配网电缆系统中相角跳变最突出。

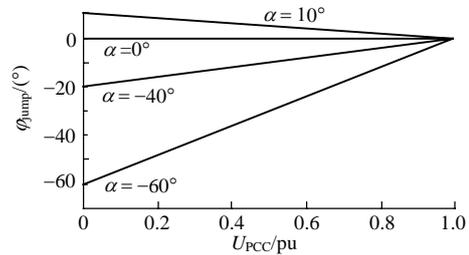


图 2 相位跳变角与电压跌落幅值的关系

Fig. 2 Dip magnitude versus phase-angle jump for different impedance angle

2 VSC-HVDC 及其控制模型

2.1 系统简介

VSC-HVDC的电路如图3所示，两端换流站是运行在PWM调制方式下的VSC，换流站间由直流输电线路连接。 L_1 、 L_2 为换流电抗器，主要用以滤除网侧电流的谐波分量； T_1 、 T_2 为换流变压器，为换流站提供合适的电压； R_1 、 R_2 为换流电抗器和VSC损耗的总等效电阻。直流电容为换流站提供电压，支撑并减小直流电压谐波，滤波器用以减少交流侧电压、电流的高频谐波。

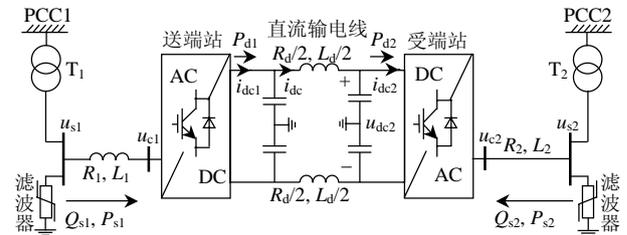


图 3 VSC-HVDC 系统示意图

Fig. 3 Diagram of VSC-HVDC

2.2 控制系统

2.2.1 内环电流控制器

VSC-HVDC系统的矢量电流控制采用内外环结构，如图4所示。内环实现对交流电流的快速控

制；外环根据系统要求可采用有功/频率控制、直流电压控制，及无功/交流电压控制，并为内环控制提供电流指令值。在保证直流功率传输平衡的基础上，两端换流站可分别独立地控制无功功率；为保证系统中有功传输的平衡及直流电压稳定，必须有一端换流站采用直流电压控制。

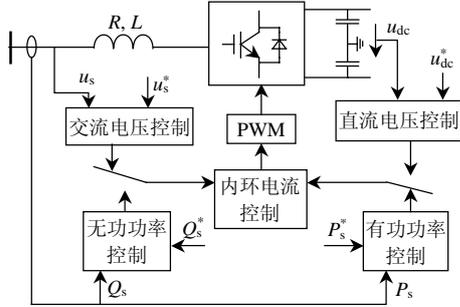


图4 VSC-HVDC 控制系统

Fig.4 Control system of VSC-HVDC

1) 矢量电流控制器。

图5为基于正序同步旋转坐标系(positive synchronous reference frame, P-SRF)的电流内环控制器。其中， $s_w(t)$ 为阀触发信号。

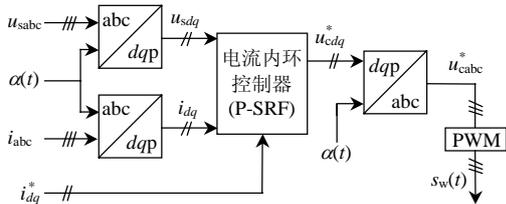


图5 基于P-SRF的电流内环控制器(VCC)

Fig.5 Diagram of VCC

当交流电网三相对称且不考虑零序分量时，图3所示的VSC-HVDC系统交流侧数学模型为

$$\begin{cases} u_{cd} = u_{sd} - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q \\ u_{cq} = u_{sq} - Ri_q - L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d \end{cases} \quad (2)$$

式中： u_s 为电网电压； u_c 为VSC交流侧基波电压； i 为电网电流；下标 d 、 q 分别表示各电压、电流的 d 、 q 轴分量。

当电流内环采用PI控制时，控制方程为

$$\begin{cases} u_{cd}^* = -(K_p + \frac{K_i}{s})(i_d^* - i_d) + u_{sd} - \omega Li_q \\ u_{cq}^* = -(K_p + \frac{K_i}{s})(i_q^* - i_q) + u_{sq} + \omega Li_d \end{cases} \quad (3)$$

式中：上标*表示指令值； K_p 、 K_i 为PI控制的比例、积分系数。

2) 双矢量电流控制器。

同时在正、负序旋转坐标系(negative

synchronous reference frame, N-SRF)中，分别对正、负序分量进行控制，即双矢量电流控制器，如图6所示。

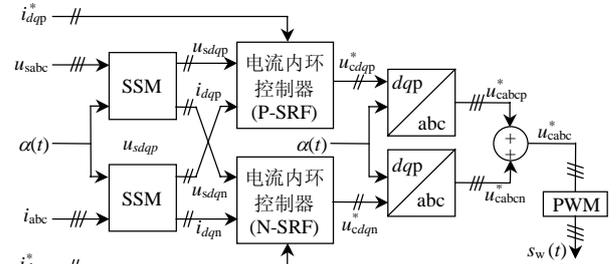


图6 双电流矢量内环控制器(DVCC)

Fig.6 Diagram of DVCC

在不对称情况下，VSC-HVDC交流侧的正负序分量的数学模型为

$$\begin{cases} u_{cdqp} = u_{sdqp} - Ri_{dqp} - L \frac{di_{dqp}}{dt} \mp \omega Li_{dqp} \\ u_{cdqn} = u_{sdqn} - Ri_{dqn} - L \frac{di_{dqn}}{dt} \pm \omega Li_{dqn} \end{cases} \quad (4)$$

式中：下标 dqp 、 dqn 分别表示各正序电压/电流在P-SRF、负序电压/电流在N-SRF中的 d 、 q 分量。

当电流内环采用PI控制时，控制方程为

$$\begin{cases} u_{cdqp}^* = -(K_p + \frac{K_i}{s})(i_{dqp}^* - i_{dqp}) + u_{sdqp} \mp \omega Li_{dqp} \\ u_{cdqn}^* = -(K_p + \frac{K_i}{s})(i_{dqn}^* - i_{dqn}) + u_{sdqn} \pm \omega Li_{dqn} \end{cases} \quad (5)$$

2.2.2 外环控制器

本文送端站采用有功、无功控制，受端站采用直流电压、无功控制。

交流系统注入换流站的瞬时有功、无功^[19]可表示为

$$\begin{cases} p_s = p_0 + p_{c2} \cos(2\omega t) + p_{s2} \sin(2\omega t) \\ q_s = q_0 + q_{c2} \cos(2\omega t) + q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (6)$$

式中： p_0 、 q_0 为有功、无功的平均值； p_{c2} 、 p_{s2} 为2次有功的余弦、正弦分量幅值； q_{c2} 、 q_{s2} 为2次无功的余弦、正弦分量幅值。为抑制直流电压的2倍频振荡，应使 $p_{c2}=0$ 、 $p_{s2}=0$ ，故得出电流指令值：

$$\begin{cases} i_{dn}^* = \frac{-u_{sdn} p_0}{D_0} + \frac{u_{sqn} q_0}{D_1} \\ i_{qn}^* = \frac{-u_{sqn} p_0}{D_0} - \frac{u_{sdn} q_0}{D_1} \end{cases} \quad (7)$$

式中：

$$\begin{cases} D_0 = u_{sdp}^2 + u_{sqp}^2 - u_{sdn}^2 - u_{sqn}^2 \\ D_1 = u_{sdp}^2 + u_{sqp}^2 + u_{sdn}^2 + u_{sqn}^2 \end{cases} \quad (8)$$

当电网不平衡时,为抑制直流电压的 2 次谐波,必须使电流中有一定量的负序电流,且瞬时无功中仍存在 2 次谐波分量^[13]。

3 仿真分析

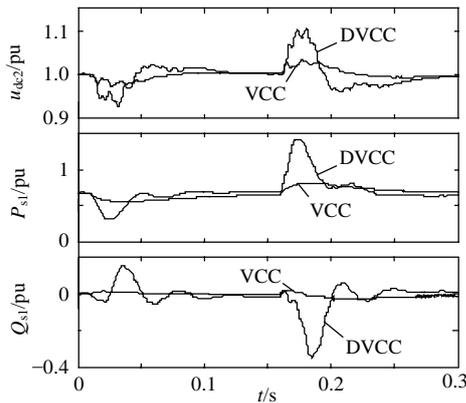
3.1 仿真系统

本文应用 PSCAD/EMTDC 仿真程序对图 3 所示系统,以对称三相短路故障、两相短路不对称故障为测试条件进行仿真分析。仿真中,交流系统额定电压为 10.5 kV,换流站额定容量为 6 MVA,直流额定电压 22 kV,直流电容为 125 μF,换流变压器漏抗为 0.2 pu,损耗电阻为 0.01 pu,载波频率为 2 kHz。

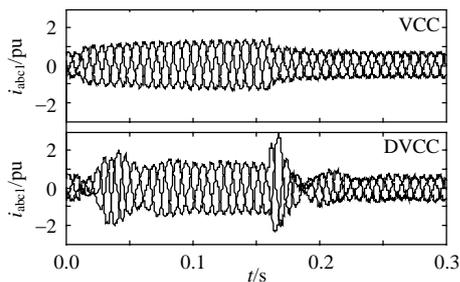
3.2 仿真算例

1) 三相短路故障下 VCC、DVCC 的控制性能比较。

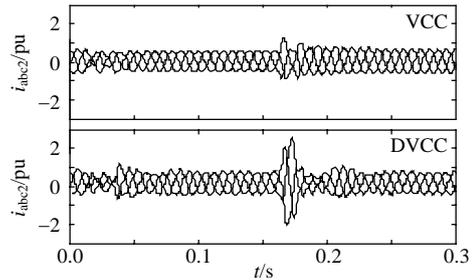
设 0.01 s 时刻送端系统发生三相短路故障,持续时间为 0.15 s, PCC 点电压跌落幅值为 0.5 pu,在相同系统条件下,分别采用 VCC、DVCC 控制。因是对称故障,无负序分量,故障期间对于直流电压、有功及无功,VCC 及 DVCC 都能使其恒定,未出现 2 次振荡,如图 7(a)所示。在故障初始及故障清除时刻,与 VCC 控制相比, DVCC 控制暂态过程较大、各量波动幅值较大且波动时间较长。VCC 控制下直流电压的波动在 0.97~1.05 pu,0.1 s 内可恢复至指令值;而 DVCC 控制时直流电压的波



(a) 受端站直流电压及送端站的有功和无功



(b) 送端站三相电流



(c) 受端站三相电流

图 7 三相短路故障、电压跌落幅值为 0.5 pu、 $\alpha=0^\circ$ 时的 VCC、DVCC 比较

Fig. 7 Comparison of VCC and DVCC under 3-phase fault with dip magnitude 0.5 pu and $\alpha=0^\circ$

动达到了 0.9~1.14 pu,需更长时间达到指令值。可见 DVCC 暂态控制响应较慢,动态控制性能比 VCC 差,这主要是由于正负序的分解延时造成的。

由图 7(a)可以看出, DVCC 控制中有功、无功波动也比 VCC 控制时大得多。DVCC 控制时,易出现直流系统容量越限情况。VCC 控制时,除故障后,送端及受端侧三相电流仍基本对称,而 DVCC 控制中电流却明显畸变,引起电流越限,如图 7(b)、(c)所示。

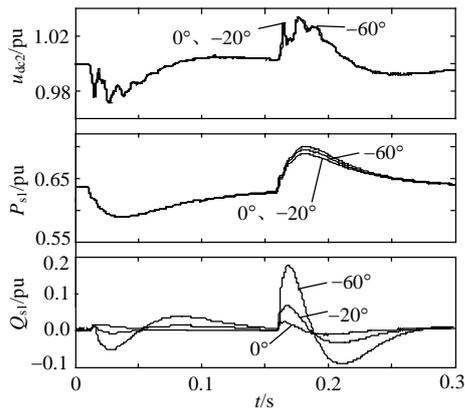
总之,在对称故障下,采用 VCC 控制的 VSC-HVDC 有更好的动态特性,更利于电力系统的安全稳定运行。

2) 三相短路故障、不同相位跳变角下的控制性能比较。

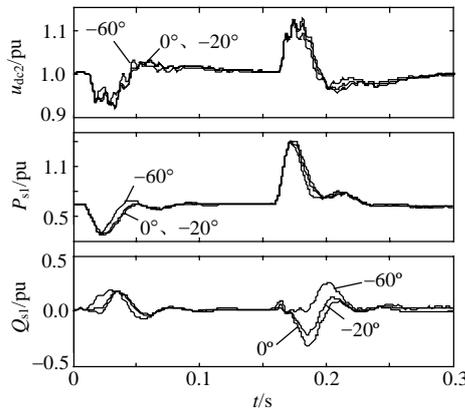
设 0.01 s 时刻送端系统发生三相短路故障,持续时间为 0.15 s, PCC 点电压跌落幅值为 0.5 pu,在相同系统条件下, α 分别为 0° 、 -20° 、 -60° 时比较控制响应。

由图 8(a)、(b)看出,相位跳变对直流电压、有功影响不大,尤其是跳变 -20° 与 0° 时的波形基本一致;无功差别较大,随跳变角的增大,无功振荡幅值增大。这是由于发生相位跳变时系统电压矢量 \mathbf{U}_s 相位不再与 d 轴重合,较大的相位跳变角使暂态过程中的 $u_{sq} \neq 0$,且 u_{sq} 变化较显著,而对 u_{sd} 的影响较小。由式(2)可知,相角跳变使无功电流 i_q 有较大波动,而有功电流 i_d 波动较小。

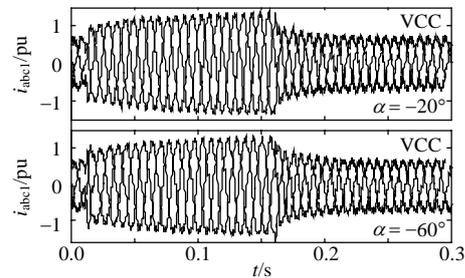
与 VCC 比较, DVCC 控制更易受相位跳变影响,如图 8(a)、(b)所示。图 8(c)、(d)表明,相角跳变对 DVCC 控制下的两端换流站的不利影响更明显,且跳变角越大、在故障始末电流幅值更大、畸变更严重。所以,在对称故障中遭遇相同的相角跳变时, VCC 的动态特性仍优于 DVCC。



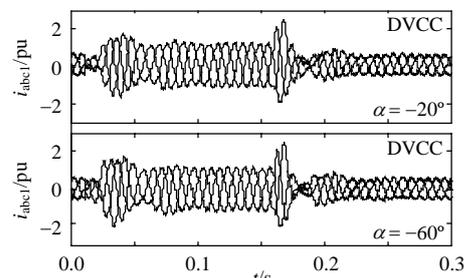
(a) VCC 下受端站直流电压及送端站的有功和无功



(b) DVCC 下受端站直流电压及送端站的有功和无功



(c) VCC 下送端站三相电流



(d) DVCC 下送端站三相电流

图8 三相短路故障、电压跌落幅值 0.5 pu、不同相位跳变角下的 VCC、DVCC 比较

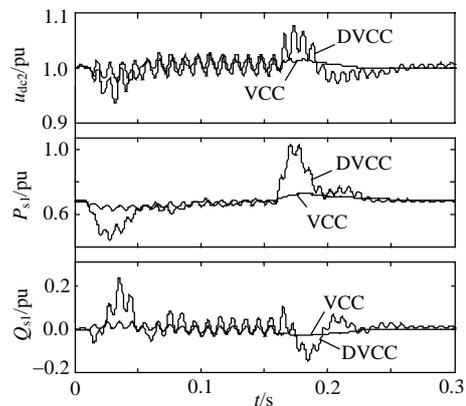
Fig. 8 Comparison of VCC and DVCC under 3-phase fault with dip magnitude 0.5 pu and $\alpha=0^\circ, -20^\circ, -60^\circ$

3) 两相短路故障下 VCC、DVCC 的控制性能比较。

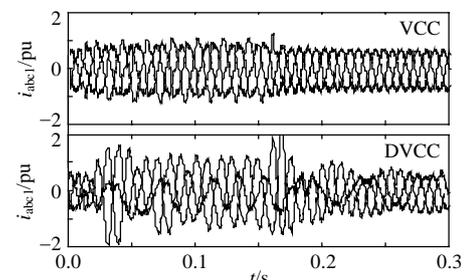
设 0.01 s 时刻送端系统发生两相短路故障，持

续时间为 0.15 s，PCC 点电压跌落幅值为 0.5 pu，在相同系统条件下，分别采用 VCC、DVCC 控制。

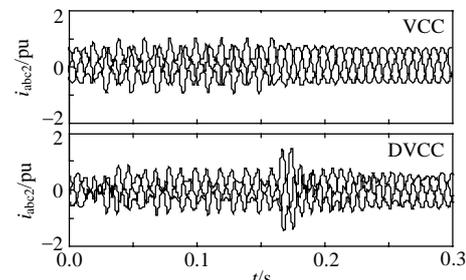
在不对称故障下，由于系统中存在的负序电压、电流分量，直流电压、有功、无功功率在故障期间都出现了 2 倍频的振荡。由于 DVCC 采用的是抑制直流电压 2 次波动的控制策略，在故障后期直流电压、有功都较 VCC 控制的脉动幅值有所减小，但在故障初及故障清除时刻，与 VCC 相比，DVCC 控制下各量仍表现出幅值较大、时间较长的暂态过程，再次表明 DVCC 动态控制性能比 VCC 弱，如图 9 所示。



(a) 受端站直流电压及送端站的有功和无功



(b) 送端站三相电流



(c) 受端站三相电流

图9 两相短路故障、电压跌落幅值为 0.5 pu、 $\alpha=0^\circ$ 时的 VCC、DVCC 比较

Fig. 9 Comparison of VCC and DVCC under 2-phase fault with dip magnitude 0.5 pu and $\alpha=0^\circ$

为了抑制直流电压的 2 次谐波，DVCC 控制时电流中必须引入一定量的负序电流，但这又导致瞬

时无功中仍存在 2 次谐波分量。可以看出,在图 9(a)中, DVCC 控制下的无功振荡稍大。在图 9(b)、(c)中, DVCC 控制下的两侧换流站电流的畸变及幅值的越限都比 VCC 控制下严重。总之,与 VCC 控制相比 DVCC 控制的优胜之处在于,故障稳定期间直流电压的 2 次脉动抑制,但同时故障始末阶段更可能出现 VSC 的过流、过压及容量越限情况,因此其动态特性能较差。

4) 两相短路故障、不同相位跳变角下的控制性能比较。

设 0.01 s 时刻送端系统发生两相短路故障,持续时间为 0.15 s, PCC 点电压跌落幅值为 0.5 pu,在相同系统条件下, α 分别是 0° 、 -20° 、 -60° 时比较控制响应。

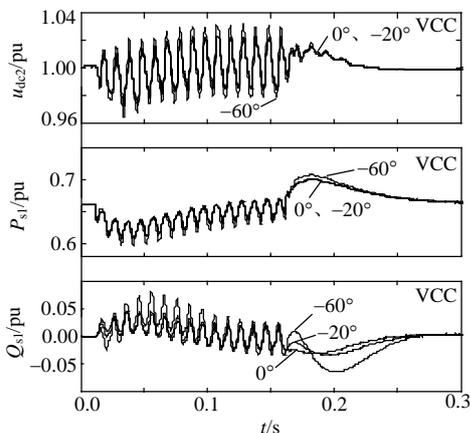
如表 1 所示,在电压跌落幅值相同情况下,随相位跳变角增大,电压负序分量也增大,因而在图中故障中各量的 2 次脉动幅值更大(见图 10(a)、(b))。而正负序分量跳变角的增大,使在故障初及故障后的暂态过程中各量幅值变化更大,从图 10(c)显示相同相位跳变下, DVCC 控制中的脉动增幅较大。

因系统中的负序电流使两侧换流站电流都发生畸变,相角跳变越大、畸变越严重,如图 10(d)、(e)所示。在相同跳变角时, DVCC 的电流越限及畸变都明显大于 VCC 控制时的情况。

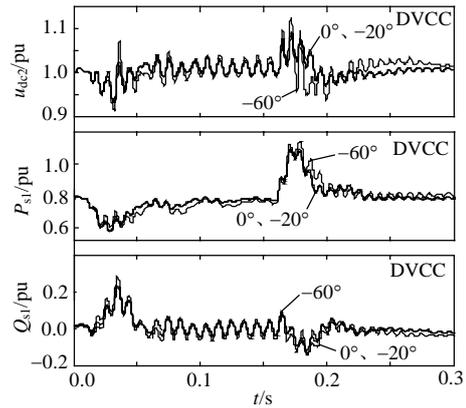
表 1 两相短路、电压跌落幅值为 0.5 pu 时的正负序分解表

Tab. 1 Amplitude and phase-angle jump of sequence components for 2-phase fault

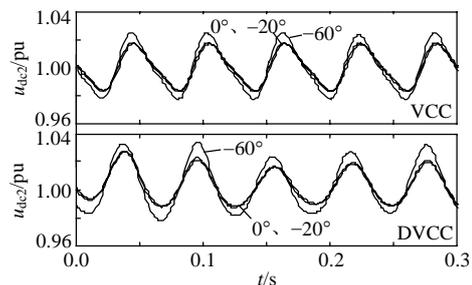
$\alpha/^\circ$	正序分量/ pu	正序分量 跳变角/ $^\circ$	负序分量/ pu	负序分量 跳变角/ $^\circ$
0	0.75	0	0.25	0
-20	0.747 5	-3.28	0.257 2	9.86
-60	0.720 5	-11.15	0.325 0	25.66



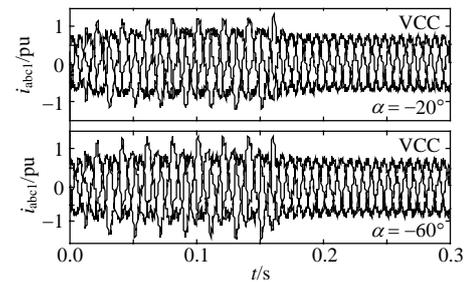
(a) VCC 下受端站直流电压及送端站的有功和无功



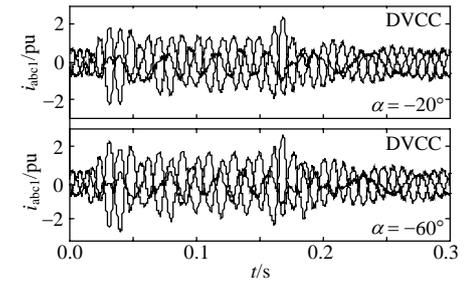
(b) DVCC 下受端站直流电压及送端站的有功和无功



(c) 受端站直流电压



(d) VCC 下送端站三相电流



(e) DVCC 下送端站三相电流

图 10 两相短路故障、电压跌落幅值为 0.5 pu、不同相位跳变角下的 VCC、DVCC 比较

Fig.10 Comparison of VCC and DVCC under 2-phase fault with dip magnitude 0.5 pu and $\alpha=0^\circ, -20^\circ, -60^\circ$

4 结论

1) 在交流对称故障和不对称故障情况下, DVCC 的动态控制性能均劣于 VCC, 在故障初及故障清除阶段各量波动幅值都较大, 更易出现过流、过压、容量越限情况, 对 VSC-HVDC 的运行不利。

2) 在不对称故障情况下, DVCC 比 VCC 抑制直流电压 2 次脉动的效果好; 但前提是在相对稳定的不对称条件下, 即故障持续时间需足够长。原因是, DVCC 控制中的正负序分解使故障始末时刻的暂态过程更长, 否则 DVCC 无法及时实现抑制直流电压二倍频振荡的目标。而在 VSC-HVDC 实际工程中, 由于保护装置快速动作, 实现 DVCC 的这一优点有困难。

3) 在发生对称故障且伴随相位跳变时, 对于 DVCC 和 VCC, 相位跳变角的大小对直流电压、有功、交流电流的影响不大, 但对无功的影响较大; 另外, 对相位跳变, DVCC 比 VCC 更敏感; 因此当 VSC-HVDC 经电缆连接应用于中低压系统时, 其无功电压动态调节性能会变差。

4) 在发生不对称故障伴随相位跳变时, 随相位跳变角增大, VCC 和 DVCC 控制各量的 2 倍频脉动幅值都增大; 相同跳变角时, DVCC 的电流越限及畸变都明显大于 VCC; 因此中低压系统电缆连接情况中, 采用 DVCC 控制的 VSC-HVDC 可能因过电流而被迫退出运行。

参考文献

- [1] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 21(2): 1-10.
Xu Zheng, Chen Hairong. Review and application of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 21(2): 1-10(in Chinese).
- [2] Chaudhary S K, Teodorescu R, Rodriguez P. Wind farm grid integration using VSC based HVDC transmission-an overview [C]. IEEE Energy 2030 Conference, Atlanta, GA, USA, 2008.
- [3] Axelsson U, Holm A, Liljegren C, et al. The Gotland HVDC light project-experiences from trial and commercial operation [C]. CIRED 2001, Amsterdam, Netherlands, 2001.
- [4] Ying J H, Duchon H, Karlsson M, et al. HVDC with voltage source converters-a powerful standby black start facility[C]. IEEE PES T&D Conference, Chicago, USA, 2008.
- [5] Du Cuiqing, Math H, Bollen J, et al. A new control strategy of a VSC-HVDC system for high-quality supply of industrial plants [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2386-2394.
- [6] Du Cuiqing, Agneholm E, Olsson G. Comparison of different frequency controllers for a VSC-HVDC supplied system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2224-2232.
- [7] Bahrman M, Edris A A, Haley R. Asynchronous back-to-back HVDC link with voltage source converters[C]. Minnesota Power Systems Conference, Minnesota, USA, 1999.
- [8] Wu Xinhui, Panda S K, Xu Jianxin. Frequency domain based repetitive control of three phase PWM rectifier under distorted supply voltage conditions[C]. 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008.
- [9] Song H S, Nam K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [10] 周国梁, 石新春, 魏晓光, 等. 电压源换流器高压直流输电不平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 137-143.
Zhou Guoliang, Shi Xinchun, Wei Xiaoguang, et al. Sliding-mode control based VSC-HVDC under unbalanced input voltage condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 137-143(in Chinese).
- [11] Saccomando G, Svensson J, Sannino A. Improving voltage disturbance rejection for variable-speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(3): 422-428.
- [12] Bongiorno M, Svensson J, Sannino A. An advanced cascade controller for series-connected VSC for voltage dip mitigation[C]. Fourtieth IAS Annual Meeting, Hongkong, China, 2005.
- [13] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 306-314.
Zhang Chongwei, Zhang Xin. PWM rectifier and control [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 306-314(in Chinese).
- [14] 尹明, 李庚银, 牛同义, 等. VSC-HVDC 连续时间状态空间模型及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 34-39.
Yin Ming, Li Gengyin, Niu Tongyi, et al. Continuous-time state-space model of VSC-HVDC and its control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 34-39(in Chinese).
- [15] 陈海荣, 徐政. 基于同步坐标变换的 VSC-HVDC 暂态模型及其控制器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 121-126.
Chen Hairong, Xu Zhen. Transient model and controller design for VSC-HVDC based on synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 121-126(in Chinese).
- [16] 皇甫成, 贺之渊, 汤广福, 等. 交流电网不平衡情况下电压源换相直流输电系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 144-151.
Huangfu Cheng, He Zhiyuan, Tang Guangfu, et al. Control strategy for the voltage source converter based HVDC Transmission system under unbalanced AC Grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 144-151(in Chinese).
- [17] Xu Lie, Andersen B R, Cartwright P. Control of VSC transmission systems under unbalanced network conditions[C]. Proceeding of Power Conference, Singapore, 2004.
- [18] Bongiorno M, Svensson J, Sannino A. Dynamic performance of vector current controllers for grid-connected VSC under voltage dips[C]. Fourtieth IAS Annual Meeting, Hongkong, China, 2005.
- [19] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 138-153.
Xiao Xiangning. Analysis and control of power quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 138-153(in Chinese).



魏晓云

收稿日期: 2009-08-24。

作者简介:

魏晓云(1973—), 女, 博士研究生, 研究方向为电压源换相高压直流输电、新能源并网技术, weixydl@163.com;

孙辉(1965—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统稳定分析与控制, 新能源并网技术的研究;

徐风阁(1971—), 男, 高级工程师, 从事电力系统经济运行及电能质量方向的研究。

(责任编辑 张玉荣)

