

轻型直流输电系统的不对称故障控制策略

邵文君, 宋强, 刘文华

(清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Control Strategy for VSC-HVDC Transmission System During Unbalanced Fault

SHAO Wen-jun, SONG Qiang, LIU Wen-hua

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The VSC-HVDC transmission system based on voltage source converter is becoming a new way for flexible power transmission due to its high controllability and high response speed. However, when unbalanced fault occurs in the AC system, negative-sequence components existing in AC system will lead to a lot of non-characteristic harmonics under the action of pulse width modulation (PWM), so the control performance of VSC-HVDC system will be deteriorated. On the basis of the positive-sequence model of converter station, a negative-sequence model of VSC-HVDC system is built and a nonlinear controller for positive- and negative-sequence currents based on exact feedback linearization theory is proposed, and two coping strategies are designed according to the DC side overvoltage which occurs during system fault. The proposed control strategy is validated by electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC, and prospective control effect is achieved.

KEY WORDS: voltage source converter (VSC); VSC-HVDC; unbalanced fault; accurate feedback linearization; negative current controller

摘要: 基于电压源变流器(voltage source converter, VSC)的轻型直流输电(VSC-HVDC)正成为一种经济灵活的新型输电方式。但是当交流系统发生不对称故障时,系统中存在的负序分量在脉宽调制(pulse width modulation, PWM)的作用下会产生大量的非特征谐波,并严重恶化 VSC-HVDC 系统的控制性能。文章在换流站正序模型的基础上建立了系统的负序模型,提出一种基于精确反馈线性化理论的正负序电流非线性控制器,并针对系统故障时出现的直流过电压问题设计了 2 种应对策略。在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 下对上述控制策略进行了仿真验证,达到了预期的控制效果。

关键词: 电压源变流器(VSC); 轻型直流输电; 不对称故障; 精确反馈线性化; 负序电流控制

0 引言

由于节约型、低能耗可持续发展方式的需要,风能、太阳能等可再生能源发电成为未来电力系统的发展方向。但是,新能源发电一般供电质量不稳定且远离交流主电网,采用传统的高压交流输电方式经济性较差,并且存在稳定性问题。因此,随着清洁能源发电装机容量和比重的不断提高,所发出的电能如何传输成为一个重要问题。

高压直流输电(HVDC)的输送能量与距离不受同步运行稳定性的限制,并且传输的有功功率快速可控,是交流输电的重要补充。但是传统的 HVDC 采用相控换流,必须依靠受端电网获取换相电压,并吸收大量的无功功率,产生大量的低次谐波,通常只适合于远距离大容量输电。

随着电力电子技术的不断进步,以门极可关断晶闸管(gate turn-off thyristor, GTO)、绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)、集成门极换向晶闸管(integrated gate commutated thyristor, IGCT)为代表的大功率全控型器件得到了迅速发展和广泛应用。基于全控型器件和电压源变流器(voltage source converter, VSC)的轻型直流(VSC-HVDC)输电技术成为最近发展起来的一种新型电力传输技术^[1-2]。相对于传统的 HVDC, VSC-HVDC 不需要借助受端电网进行换相,而是采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术对全控器件以较高的频率进行开通和关断控制,直接将直流电压逆变为幅值和相位都可控的交流电压,避免了换相失败,并可以大大消除 VSC 换流站产生的低次谐波电流^[3],实现有功和无功的快速独立控制;并且在交流电网故障时,仍可以维持功率传输,且不会增加系统的短路容量。基于上述优点, VSC-HVDC

输电系统成为清洁能源发电和交流主网之间的理想连接方式。

VSC-HVDC 可以对有功和无功进行快速解耦控制, 目前研究人员已对其进行了多方面研究^[4-19]。文献[20]对基于对称电压的 VSC 控制策略进行了仿真研究, 并对三相短路故障下的控制性能进行了验证, 但是, 交流系统中的非对称故障也会给 VSC-HVDC 带来一定的扰动, 引起交流侧过电流或直流侧过电压等^[21-22], 因此, 在交流系统发生不对称故障时, 必须设计相应的控制策略, 使 VSC-HVDC 继续维持功率传输, 不因过压或过流保护而退出。文献[23]提出了正序分量和负序分量分开控制的 VSC-HVDC 暂态控制策略, 但在不对称故障期间对直流电压波动和交流电流不对称的控制尚不够理想, 并且没有考虑功率传输受阻引起的直流电压上升问题。

本文建立了交流系统不对称故障条件下 VSC 换流站的数学模型, 并根据对称分量理论和瞬时功

率理论设计了基于精确反馈线性化的正负序电流控制器。此外, 针对直流电压控制侧交流系统不对称故障引起的直流过电压问题, 设计了 2 种控制策略并进行了对比。通过电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 对上述控制策略进行了仿真验证。

1 VSC-HVDC 输电系统建模

图 1 为 VSC-HVDC 系统结构, 其中包含 2 个换流站。隔离变压器交流母线侧采用星型接法, 换流站一侧采用三角形接法, 隔绝了零序分量的通路。两侧交流系统均等效为包含内电阻和内电感的电源, R_1 、 R_2 为交流输电线路等效电阻, L_1 、 L_2 为交流输电线路电感和平波电抗器之和, C_1 、 C_2 为直流侧电容, R_{p1} 、 R_{p2} 为换流站损耗等效电阻。由于换流站一侧变压器采用三角形接法, 没有零序分量的通路, 因此, 在换流站模型中可以只考虑正序和负序分量。

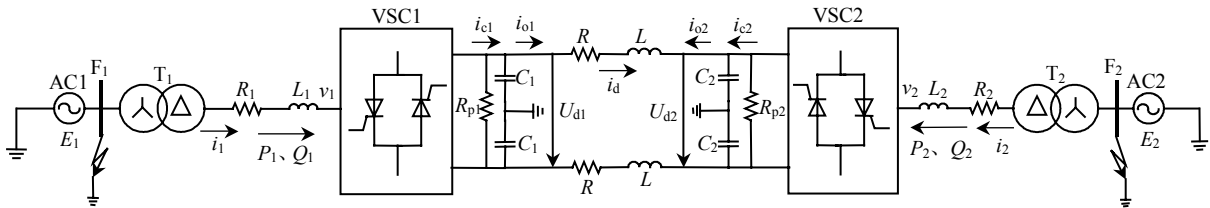


图 1 VSC-HVDC 系统主电路拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of VSC-HVDC system main circuit

在交流系统电压不平衡且只计及基波分量的情况下, VSC-HVDC 输电系统的 VSC 换流站模型可以分解为 2 个相互解耦的子模型——正序模型和负序模型, 2 部分模型可以独立控制^[24]。因此, 换流站 1 的数学模型为

$$\begin{cases} L_1 di_{1a}^+ / dt + R_1 i_{1a}^+ + v_{1a}^+ = E_{1a}^+ \\ L_1 di_{1b}^+ / dt + R_1 i_{1b}^+ + v_{1b}^+ = E_{1b}^+ \\ L_1 di_{1c}^+ / dt + R_1 i_{1c}^+ + v_{1c}^+ = E_{1c}^+ \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_1 di_{1a}^- / dt + R_1 i_{1a}^- + v_{1a}^- = E_{1a}^- \\ L_1 di_{1b}^- / dt + R_1 i_{1b}^- + v_{1b}^- = E_{1b}^- \\ L_1 di_{1c}^- / dt + R_1 i_{1c}^- + v_{1c}^- = E_{1c}^- \end{cases} \quad (2)$$

$$C_1 dv_{dc1} / dt + i_{c1} = i_{o1} \quad (3)$$

式中: E_1^+ 、 E_1^- 为换流母线 F_1 处的正、负序电压分量; v_1^+ 、 v_1^- 为换流站 1 输出交流电压的正、负序分量; i_1^+ 、 i_1^- 为换流站 1 交流电流的正、负序分量; v_{dc1} 为 VSC1 侧直流电压。

式(3)为换流站直流侧动态过程。换流站 2 的数学模型与换流站 1 对称, 不再赘述。由瞬时功率理论和功率平衡可以得到功率传输方程:

$$P_1 = E_a i_a + E_b i_b + E_c i_c \quad (4)$$

$$Q_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} [E_a (i_c - i_b) + E_b (i_a - i_c) + E_c (i_b - i_a)] \quad (5)$$

式中: P_1 、 Q_1 为系统输入 VSC1 换流站的有功和无功功率; $E = E^+ + E^-$, $i = i^+ + i^-$ 。

由式(1)(2)可得到换流站交流侧状态方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1a}^+ \\ i_{1b}^+ \\ i_{1c}^+ \\ v_{dc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 \\ \frac{v_{1a}}{C_1 v_{dc1}} & \frac{v_{1b}}{C_1 v_{dc1}} & \frac{v_{1c}}{C_1 v_{dc1}} & -\frac{1}{C_1 R_{p1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a}^+ \\ i_{1b}^+ \\ i_{1c}^+ \\ v_{dc1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_{1a}^+ - v_{1a}^+}{L_1} \\ \frac{E_{1b}^+ - v_{1b}^+}{L_1} \\ \frac{E_{1c}^+ - v_{1c}^+}{L_1} \\ -\frac{i_{c1}}{C_1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1a}^- \\ i_{1b}^- \\ i_{1c}^- \\ v_{dc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 \\ \frac{v_{1a}}{C_1 v_{dc1}} & \frac{v_{1b}}{C_1 v_{dc1}} & \frac{v_{1c}}{C_1 v_{dc1}} & -\frac{1}{C_1 R_{p1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a}^- \\ i_{1b}^- \\ i_{1c}^- \\ v_{dc1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_{1a}^- - v_{1a}^-}{L_1} \\ \frac{E_{1b}^- - v_{1b}^-}{L_1} \\ \frac{E_{1c}^- - v_{1c}^-}{L_1} \\ -\frac{i_{c1}}{C_1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(6)为正序分量状态方程,式(7)为负序分量状态方程。

在交流系统不对称故障时,系统中同时存在正序和负序分量,因此,考虑如下广义同步旋转坐标系变换矩阵:

$$\mathbf{C}_{abc \rightarrow dq}(\omega t) = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 ω 为广义同步旋转坐标系的角速度。

对于式(6)所示的正序模型,取旋转坐标系初相位与正序电压空间矢量方向一致, $\omega = \omega_1$ (ω_1 为同步角频率),则正序模型状态方程变换为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d}^+ \\ i_{1q}^+ \\ v_{dc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \omega_1 & 0 \\ -\omega_1 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 \\ \frac{v_{1d}^+}{C_1 v_{dc1}} & \frac{v_{1q}^+}{C_1 v_{dc1}} & -\frac{1}{C_1 R_{p1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d}^+ \\ i_{1q}^+ \\ v_{dc1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_{1d}^+ - v_{1d}^+}{L_1} \\ \frac{E_{1q}^+ - v_{1q}^+}{L_1} \\ -\frac{i_{c1}}{C_1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 v_{1d}^+ 、 v_{1q}^+ 、 i_{1d}^+ 、 i_{1q}^+ 、 E_{1d}^+ 、 E_{1q}^+ 分别为 v_1^+ 、 E_1^+ 、 i_1^+ 在正序旋转坐标系下的 d、q 轴分量。

对于式(7)所示的负序模型,取 $\omega = -\omega_1$ (ω_1 为同步角频率),则负序模型状态方程变换为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d}^- \\ i_{1q}^- \\ v_{dc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & -\omega_1 & 0 \\ \omega_1 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 \\ \frac{v_{1d}^-}{C_1 v_{dc1}} & \frac{v_{1q}^-}{C_1 v_{dc1}} & -\frac{1}{C_1 R_{p1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d}^- \\ i_{1q}^- \\ v_{dc1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_{1d}^- - v_{1d}^-}{L_1} \\ \frac{E_{1q}^- - v_{1q}^-}{L_1} \\ -\frac{i_{c1}}{C_1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 v_{1d}^- 、 v_{1q}^- 、 i_{1d}^- 、 i_{1q}^- 、 E_{1d}^- 、 E_{1q}^- 分别为 v_1^- 、 E_1^- 、 i_1^- 在负序旋转坐标系下的 d、q 轴分量。

功率传输方程变换为

$$P = \frac{3}{2}(E_{1d}^+ i_{1d}^+ + E_{1q}^+ i_{1q}^+) + \frac{3}{2}(E_{1d}^- i_{1d}^- + E_{1q}^- i_{1q}^-) + \frac{3}{2}(E_{1d}^+ i_{1d}^- + E_{1q}^+ i_{1q}^-) \cos(2\omega_1 t) + \frac{3}{2}(E_{1d}^+ i_{1q}^- - E_{1q}^+ i_{1d}^- + E_{1q}^- i_{1d}^+ - E_{1d}^- i_{1q}^+) \sin(2\omega_1 t) \quad (11)$$

$$Q = \frac{3}{2}(E_{1q}^+ i_{1d}^+ - E_{1d}^+ i_{1q}^+) + \frac{3}{2}(E_{1q}^- i_{1d}^- - E_{1d}^- i_{1q}^-) + \frac{3}{2}(E_{1q}^- i_{1d}^+ - E_{1d}^- i_{1q}^+ + E_{1q}^+ i_{1d}^- - E_{1d}^+ i_{1q}^-) \cos(2\omega_1 t) + \frac{3}{2}(-E_{1d}^- i_{1d}^+ - E_{1q}^- i_{1q}^+ + E_{1d}^+ i_{1d}^- + E_{1q}^+ i_{1q}^-) \sin(2\omega_1 t) \quad (12)$$

2 非线性控制器设计

2.1 基于精确反馈线性化的正负序电流控制器

由式(9)(10)可知,换流站 q 轴电流和 d 轴电流是相互耦合的,为了能够独立控制系统的有功和无功功率,需要对上述模型进行线性化。

文献[25]在系统三相对称的假设下,提出了一种基于精确反馈线性化的内环电流控制器。但是由于系统在不对称故障时会出现较大的负序分量,进而使直流侧产生 2 倍频分量,再经过 PWM 开关函数的调制,又会在 VSC 交流侧产生多种非特征谐波,这些非特征谐波会严重影响 VSC 控制器的性能,甚至危及换流装置的安全。因此,为了改善系统在不对称故障时的响应,保证换流设备的安全,需要对上述反馈线性化控制器加以改进,并分解为正序/负序 2 个独立的控制器,对正负序电流分别加以控制。

将式(9)(10)改写为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d}^+ \\ i_{1q}^+ \\ v_{dc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \omega_1 & -\frac{v_{1d}^+}{L_1 v_{dc1}} \\ -\omega_1 & -\frac{R_1}{L_1} & -\frac{v_{1q}^+}{L_1 v_{dc1}} \\ \frac{v_{1d}^+}{C_1 v_{dc1}} & \frac{v_{1q}^+}{C_1 v_{dc1}} & -\frac{1}{C_1 R_{p1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d}^+ \\ i_{1q}^+ \\ v_{dc1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_{1d}^+}{L_1} \\ \frac{E_{1q}^+}{L_1} \\ -\frac{i_{c1}}{C_1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d}^- \\ i_{1q}^- \\ v_{dc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & -\omega_1 & -\frac{v_{1d}^-}{L_1 v_{dc1}} \\ \omega_1 & -\frac{R_1}{L_1} & -\frac{v_{1q}^-}{L_1 v_{dc1}} \\ \frac{v_{1d}^-}{C_1 v_{dc1}} & \frac{v_{1q}^-}{C_1 v_{dc1}} & -\frac{1}{C_1 R_{p1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d}^- \\ i_{1q}^- \\ v_{dc1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_{1d}^-}{L_1} \\ \frac{E_{1q}^-}{L_1} \\ -\frac{i_{c1}}{C_1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

取 $\frac{v_{1d}^+}{v_{dc1}} = u_{1d}^+$, $\frac{v_{1q}^+}{v_{dc1}} = u_{1q}^+$, $\frac{v_{1d}^-}{v_{dc1}} = u_{1d}^-$, $\frac{v_{1q}^-}{v_{dc1}} = u_{1q}^-$ 为模型输入量,则式(13)(14)改写为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d}^+ \\ i_{1q}^+ \\ v_{dc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} i_{1d}^+ + \omega_1 i_{1q}^+ + \frac{E_{1d}^+}{L_1} \\ -\omega_1 i_{1d}^+ - \frac{R_1}{L_1} i_{1q}^+ \\ -\frac{i_{dc}}{C_1} - \frac{v_{dc1}}{C_1 R_{p1}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v_{dc1}}{L_1} \\ 0 \\ \frac{i_{1d}^+}{C_1} \end{bmatrix} u_{1d}^+ + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{v_{dc1}}{L_1} \\ \frac{i_{1q}^+}{C_1} \end{bmatrix} u_{1q}^+ \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d}^- \\ i_{1q}^- \\ v_{dc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} i_{1d}^- - \omega_1 i_{1q}^- + \frac{E_{1d}^-}{L_1} \\ \omega_1 i_{1d}^- - \frac{R_1}{L_1} i_{1q}^- \\ -\frac{i_{dc}}{C_1} - \frac{v_{dc1}}{C_1 R_{p1}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v_{dc1}}{L_1} \\ 0 \\ \frac{i_{1d}^-}{C_1} \end{bmatrix} u_{1d}^- + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{v_{dc1}}{L_1} \\ \frac{i_{1q}^-}{C_1} \end{bmatrix} u_{1q}^- \quad (16)$$

由精确反馈线性化理论^[25], 可以选用比例控制器作为上述正负序模型的新输入量, 即

$$\frac{i_{1d}^+}{i_{1dref}^+} = \frac{1}{1+s/\lambda_1^+}, \quad \frac{i_{1q}^+}{i_{1qref}^+} = \frac{1}{1+s/\lambda_2^+} \quad (17)$$

$$\frac{i_{1d}^-}{i_{1dref}^-} = \frac{1}{1+s/\lambda_1^-}, \quad \frac{i_{1q}^-}{i_{1qref}^-} = \frac{1}{1+s/\lambda_2^-} \quad (18)$$

最终得到如下非线性解耦控制器:

$$\begin{bmatrix} u_{1d}^+ \\ u_{1q}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L_1}{v_{dc1}}[\lambda_1^+(i_{1dref}^+ - i_{1d}^+) + \frac{R_1}{L_1}i_{1d}^+ - \omega_1 i_{1q}^+ - \frac{E_{1d}^+}{L_1}] \\ -\frac{L_1}{v_{dc1}}[\lambda_2^+(i_{1qref}^+ - i_{1q}^+) + \omega_1 i_{1d}^+ + \frac{R_1}{L_1}i_{1q}^+ - \frac{E_{1q}^+}{L_1}] \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} u_{1d}^- \\ u_{1q}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L_1}{v_{dc1}}[\lambda_1^-(i_{1dref}^- - i_{1d}^-) + \frac{R_1}{L_1}i_{1d}^- + \omega_1 i_{1q}^- - \frac{E_{1d}^-}{L_1}] \\ -\frac{L_1}{v_{dc1}}[\lambda_2^-(i_{1qref}^- - i_{1q}^-) - \omega_1 i_{1d}^- + \frac{R_1}{L_1}i_{1q}^- - \frac{E_{1q}^-}{L_1}] \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: i_{1dref}^+ 、 i_{1qref}^+ 、 i_{1dref}^- 、 i_{1qref}^- 为新的控制器输入量, 即换流站交流侧参考电流; λ_1^+ 、 λ_2^+ 、 λ_1^- 、 λ_2^- 为对应的比例系数; u_{1d}^+ 、 u_{1q}^+ 为换流站输出参考电压的正序分量; u_{1d}^- 、 u_{1q}^- 为输出参考电压的负序分量。控制器框图如图 2 所示。

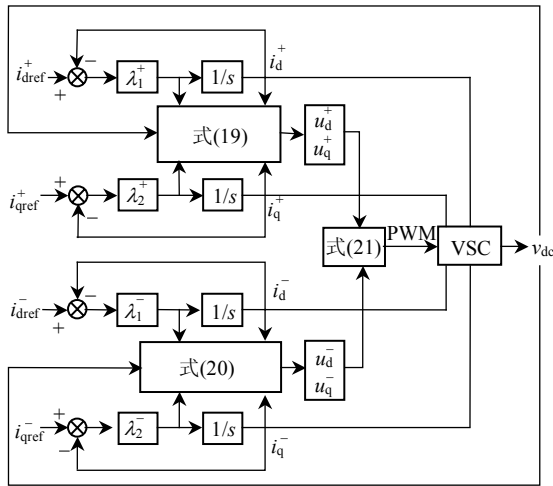


图 2 精确反馈线性化控制器

Fig. 2 Exact feedback linearization controller

由式(8)所示的广义变换矩阵及控制器输出可以得到换流站输出参考电压:

$$\begin{bmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \\ u_{1c} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{abc \rightarrow dq}^T(\omega_1 t) \begin{bmatrix} u_{1d}^+ \\ u_{1q}^+ \end{bmatrix} + \mathbf{C}_{abc \rightarrow dq}^T(-\omega_1 t) \begin{bmatrix} u_{1d}^- \\ u_{1q}^- \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.2 有功无功控制器和直流电压控制器

根据控制目标的不同, 可以选用不同的外环控制器来生成内环反馈线性化控制器的参考电流值:

为消除交流系统不对称故障时直流电压的 2 倍频波动, 可以通过抑制式(11)中有功功率的 2 倍频波动来实现; 为了实现交流系统不对称故障时交流电流三相对称, 可通过抑制系统负序电流来实现, 本文即采用这种方案。

由控制目标可以得到内环控制器负序电流的参考值:

$$\begin{cases} i_{1dref}^- = 0 \\ i_{1qref}^- = 0 \end{cases} \quad (22)$$

取同步旋转坐标系的初相位与电压空间矢量同向, 则稳态时式(11)可表示为比较简单的形式:

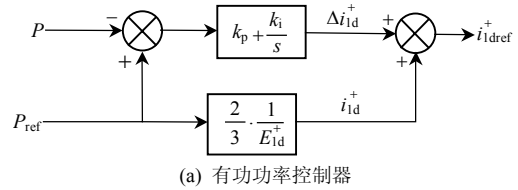
$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} E_{1d} i_{1d} \\ Q = -\frac{3}{2} E_{1d} i_{1q} \end{cases} \quad (23)$$

在故障时交流电流三相对称的控制目标下, 正序电流参考值也可由式(23)获得, 但由于负序电压的存在, 故障时直流电压、有功和无功的波动不会被消除。控制器框图如图 3 所示, 图中 k_p 、 k_i 为 PI 调节器的比例和积分常数。

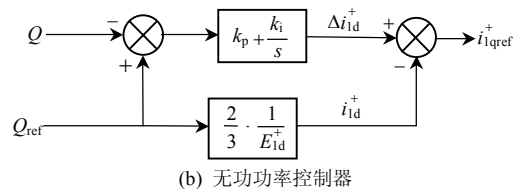
稳态时, 交流系统传输的有功功率与直流侧有功功率平衡, 因此有:

$$P = \frac{3}{2} E_{1d}^+ i_{1d}^+ = v_{dc1} i_{1d}^+ \quad (24)$$

由此得到直流电压控制器如图 4 所示。



(a) 有功功率控制器



(b) 无功功率控制器

图 3 功率控制器框图

Fig. 3 Sketch map of power controller

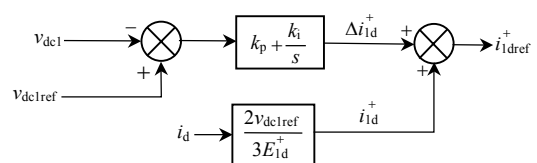


图 4 直流电压控制器

Fig. 4 DC voltage controller

2.3 直流电压故障控制策略

由上述控制器模型可知，两侧换流站需要一侧控制直流电压，另一侧控制有功功率。在理想条件下，任何一侧交流系统发生不对称故障时，两侧的交流电流均为三相对称的正弦波。但是，为保证开关器件正常运行，实际的换流站均设有限流环节，以抑制换流站过电流。而当直流电压控制侧发生不对称故障时，由于两侧有功传输不平衡，电容充电，直流电压上升，最终控制器限流环起作用，直流电压无法控制，系统退出运行。因此，必须针对此故障设计相应的控制策略。

由上述分析可知，直流电压控制侧交流系统故障时的直流过电压主要是由于有功功率不平衡引起的，本文提出如下 2 种直流电压故障控制策略。

控制策略 1：交流系统故障时，有功功率不能有效传输，造成直流过电压，因此，需要在系统故障时降低有功功率的设定值，故障消除后再将其恢复。控制流程如图 5 所示。采用此控制方法的优点是只需要对一侧的控制器进行改进，而另一侧不需要改动就能正常运行。

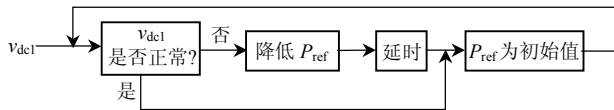


图 5 直流电压控制策略 1

Fig. 5 Strategy 1 of DC voltage control

控制策略 2：当换流站检测到直流电压上升超过阈值后，即可判断直流电压控制侧交流系统出现故障，此时，该侧换流站由定直流电压控制切换为定有功功率控制，同时，另一侧换流站由定有功功率控制切换为定直流电压控制，由此避免了有功功率不平衡引起的直流过电压。具体控制流程如图 6、7 所示。

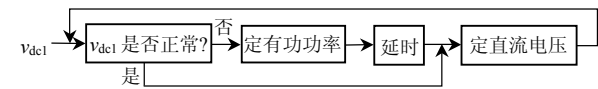


图 6 控直流电压侧换流站控制策略

Fig. 6 Control strategy of controlling DC voltage side converter

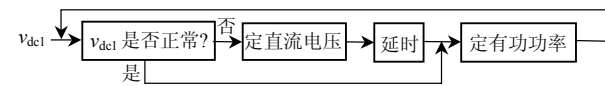


图 7 控有功功率侧换流站控制策略

Fig. 7 Control strategy of controlling active power side converter

3 仿真验证

3.1 概述

仿真模型中，VSC1 换流站采用定直流电压和

定无功功率控制，VSC2 换流站采用定有功功率和定无功功率控制，换流母线额定电压为 20 kV，直流电压设定值为 20 kV，有功功率设定值为 8 MW，无功功率设定值为 0；交流线路等效电阻 $R_1=R_2=0.2 \Omega$ ，等效电抗为 5 mH，换流站交流侧平波电抗器为 15 mH，直流线路等效电阻为 0.36Ω ，变压器系统侧接地故障接地电阻为 0.01Ω 。

3.2 VSC2 侧交流系统两相接地短路故障

开始运行 0.5 s 后，VSC2 侧换流母线发生两相接地短路故障，未采用负序电流控制的稳态模型直流电压 v_{dcl} 、直流电流 i_d 、VSC1 侧交流电流 i_1 、VSC2 侧交流电流 i_2 响应如图 8 所示。采用正负序非线性控制器的系统响应如图 9 所示。

对比图 8 和图 9 可知，采用本文提出的正负序非线性控制器，当 VSC2 侧交流系统发生两相接地短路故障时，经过短暂的暂态过程，故障侧和非故障侧的交流电流均为三相对称的正弦波，不存在负序分量，且由于电流控制器存在限流环，故障时两侧 VSC 换流站均未出现过流现象，避免了因故障过流 HVDC 系统退出运行的情况。

上述故障是发生在 VSC2 侧交流系统，虽然故障时 VSC2 侧有功功率传输设定值并未发生变化，但由于 VSC2 侧换流母线接地故障，系统实际传输

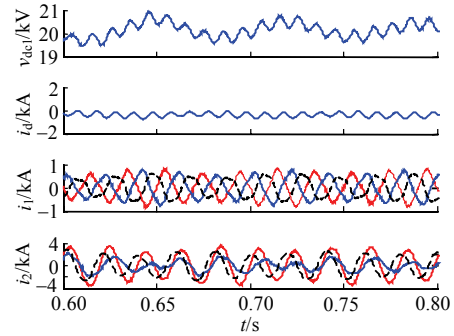


图 8 稳态模型仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms without negative sequence controller

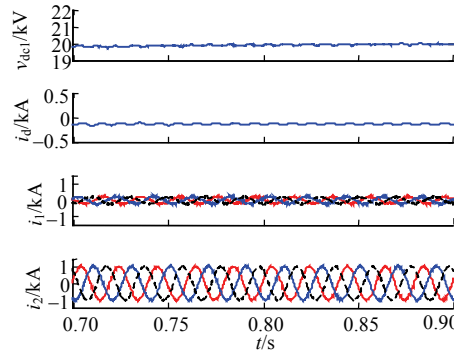


图 9 正负序非线性控制器仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms with proposed controller

的功率下降，因此 VSC1 侧交流电流幅值很低。

3.3 VSC1 侧交流系统两相接地短路故障

由于采用了相应的直流电压故障控制策略，因此，VSC1 侧交流系统发生故障时，当直流电压超过设定的阈值后，控制环起作用，直流电压最终会稳定在设定值附近，换流站不会因为直流电压无法控制而退出运行。仿真模型参数与前文相同。系统运行 0.5s 后，VSC1 侧换流母线发生两相接地短路故障，故障持续 0.5s。

1) 采用直流电压故障控制策略 1。

检测到直流电压超过阈值后，VSC2 侧有功功率设定值降低到 4MW，经过一定时间的延时后，再逐步恢复为初始值。直流过电压的阈值设置为 24kV，系统直流电压 v_{dc1} 、交流系统注入 VSC2 的有功功率 P_2 、无功功率 Q_2 以及直流电流 i_d 、VSC1 侧交流电流 i_1 、VSC2 侧交流电流 i_2 响应如图 10 所示。

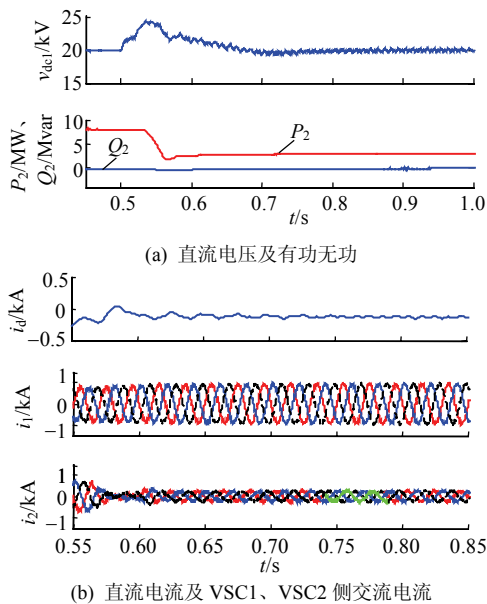


图 10 采用控制策略 1 时的系统响应

Fig. 10 System response when adopting control strategy 1

由图 10(a)可知，由于 VSC1 侧交流系统出现故障，为保证直流线路不出现过电压，VSC2 侧传输的有功功率大大减少，因此，VSC2 侧交流电流幅值较低。

2) 采用直流电压故障控制策略 2。

两侧换流站检测到直流过电压后，VSC1 切换为定有功功率控制，VSC2 切换为定直流电压控制，经过一定时间延时后再切换回原控制策略。仿真时，直流过电压的阈值设置为 24 kV，系统响应如图 11 所示。

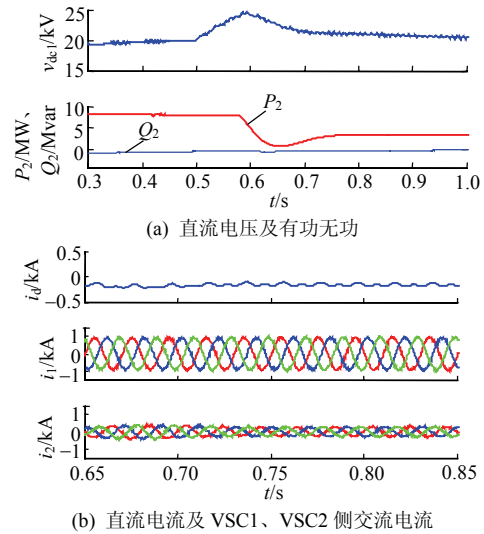


图 11 采用控制策略 2 时的系统响应

Fig. 11 System response when adopting control strategy 2

由上述结果可知，2 种直流电压控制策略均能满足故障侧和非故障侧交流电流控制的要求，两侧交流电流波形三相对称，无负序分量。但对比图 10(b)和图 11(b)可以发现，控制策略 2 的控制效果稍好于控制策略 1。

4 结论

根据变流器的正负序模型，采用正负序分量独立控制的策略可以有效抑制系统不对称故障时出现的三相电流不对称，同时，由于控制器的限流作用，对故障时出现的换流器过电流也有较好的抑制效果。对于特定故障时出现的直流过电压问题，需要通过降低故障时的功率传输或控制策略切换，消除两侧换流器功率传输的不平衡来解决。后续笔者会将该成果应用于风电场与主电网的连接中，并研究其给风电场和电网带来的影响。

参考文献

- [1] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电: 一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
Wen Jun, Zhang Yigong, Han Minxiao, et al. HVDC based on voltage source converter: a new generation of HVDC technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 47-51(in Chinese).
- [2] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 77-81.
Li Gengyin, Lü Pengfei, Li Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 77-81(in Chinese).
- [3] Sao C K, Lehn P W, Iravani M R, et al. A benchmark system for digital time-domain simulation of a pulse-width-modulated D-STATCOM[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(4): 1113-1120.

- [4] 陈谦, 唐国庆, 胡铭. 采用 dq0 坐标的 VSC-HVDC 稳态模型与控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 61-66.
Chen Qian, Tang Guoqing, Hu Ming. Steady-state model and controller design of a VSC-HVDC converter based on dq0-axis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 61-66(in Chinese).
- [5] 李金丰, 李广凯, 赵成勇, 等. 三相电压不对称时带有电压源换流器的 HVDC 系统的控制策略[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 16-20.
Li Jinfeng, Li Guangkai, Zhao Chengyong, et al. Control strategy for VSC-HVDC system under unsymmetry of three phase voltage [J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 16-20(in Chinese).
- [6] 陈海荣, 徐政. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 42-48.
Chen Hairong, Xu Zheng. Control design for VSC-HVDC supplying passive network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 42-48(in Chinese).
- [7] 李勋, 杨荫福, 陈坚. 基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(29): 37-40.
Li Xun, Yang YinFu, Chen Jian. Switching function mathematical model of UPFC based on SPWM control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(29): 37-40(in Chinese).
- [8] 孙栩, 孔力. VSC-HVDC 系统的动态相量法建模仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 44-47.
Sun Xu, Kong Li. Modeling and simulation analysis of VSC-HVDC system with dynamic phasors method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 44-47(in Chinese).
- [9] 魏晓光, 汤广福, 魏晓云, 等. VSC-HVDC 控制器抑制风电场电压波动的研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 150-156.
Wei Xiaoguang, Tang Guangfu, Wei Xiaoyun, et al. Study of VSC-HVDC controller to mitigate voltage fluctuation caused by wind farm integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 150-156(in Chinese).
- [10] 卢向东, 赵成勇. 基于 VSC-HVDC 的线路过电压抑制策略研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 462-467.
Lu Xiangdong, Zhao Chengyong. Study of control strategies of suppressing overvoltage on overhead lines by VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 462-467(in Chinese).
- [11] Yazdani A, Iravani R. A generalized state-space averaged model of the three-level NPC converter for systematic DC-voltage-balancer and current-controller design[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1105-1114.
- [12] Wu R, Dewan S B, Slemon G R. Analysis of an AC-to-DC voltage source converter using PWM with phase and amplitude control [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1991, 27(2): 355-364.
- [13] 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).
- [14] 赵成勇, 孙莹, 李广凯. 双馈入直流输电系统中 VSC-HVDC 的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 97-103.
Zhao Chengyong, Sun Ying, Li Guangkai. Control strategy of VSC-HVDC in dual-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 97-103(in Chinese).
- [15] 魏晓光, 汤广福, 郑健超. 电压源高压直流输电离散模型及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 6-11.
Wei Xiaoguang, Tang Guangfu, Zheng Jianchao. Study of VSC-HVDC discrete model and its control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 6-11(in Chinese).
- [16] 李广凯, 李庚银, 梁海峰, 等. 新型混合直流输电方式的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 82-86.
Li Guangkai, Li Gengyin, Liang Haifeng, et al. Research on a novel hybrid HVDC system[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 82-86(in Chinese).
- [17] 丁明, 李小燕, 毕锐, 等. 含 VSC-HVDC 的交直流混合输电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 53-58.
Ding Ming, Li Xiaoyin, Bi Rui, et al. Reliability assessment of hybrid AC/DC power system containing VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 53-58(in Chinese).
- [18] 阮思烨, 孙元章, 李国杰. 用电压源型高压直流输电解决高压电网中工业系统引起的电能质量问题[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 13-17.
Ruan Siye, Sun Yuanzhang, Li Guojie. Utilizing VSC-HVDC to solve power quality problem in power grid caused by industry system [J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 13-17(in Chinese).
- [19] 何斌, 张秀彬, 赵兴勇. 电压不对称条件下电压源换流器式高压直流输电的自适应无源控制[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 68-73.
He Bin, Zhang Xiubin, Zhao Xingyong. Adaptive passivity-based control for VSC-HVDC system under unbalanced voltage condition [J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 68-73(in Chinese).
- [20] Du Cuiqing, Sannino A, Bollen M H J. Analysis of the control algorithms of voltage-source converter HVDC[C]. 2005 IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg, Russia, 2005.
- [21] Hu Jiabing, He Yikang. Multi-frequency proportional-resonant (MFPR) current controller for PWM VSC under unbalanced supply conditions[J]. Journal of Zhejiang University, 2007, 8(10): 1527-1531.
- [22] Zmood D N, Holmes D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 18(3): 814-822.
- [23] Du Cuiqing, Sannino A, Bollen M H J. Analysis of response of VSC-based HVDC to unbalanced faults with different control systems [C]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.
- [24] Song Hong-Seok, Nam K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [25] Yuan Zhichang, Song Qiang, Liu Wenhua, et al. Nonlinear controller for cascade H-bridge inverter-based STATCOM[C]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.



邵文君

收稿日期: 2009-04-10.

作者简介:

邵文君(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轻型直流输电技术在清洁能源发电中的应用, E-mail: swj19841229@gmail.com;

宋强(1975—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为柔性交流输电技术及大功率电力电子技术;

刘文华(1968—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为柔性输配电技术。

(责任编辑 沈杰)