

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

皇甫成¹, 贺之渊², 汤广福², 阮江军¹, 王 燕³

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192;
3. 西安供电局, 陕西省 西安市 710032)

Control Strategy for the Voltage Source Converter Based HVDC Transmission System Under Unbalanced AC Grid Conditions

HUANGFU Cheng¹, HE Zhi-yuan², TANG Guang-fu², RUAN Jiang-jun¹, WANG Yan³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China; 2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 3. Xi'an Power Supply Bureau, Xi'an 710032, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: An electromagnetic transient model for the voltage source converter (VSC) based HVDC transmission system under unbalanced AC grid conditions was proposed. Based on this model, a control strategy was proposed to suppress the double line-frequency ripples in the DC link voltage. According to the relationship between the $\alpha\beta$ reference frame and the dq^+ and dq^- reference frames, it can be obtained that the negative-sequence appears as 100 Hz component in the positive-sequence synchronous reference frame; while, the positive-sequence component appears as 100 Hz component in the negative-sequence synchronous reference frame. Based on a simplified equivalent circuit of the VSC transmission system, a voltage source converter based high voltage direct current transmission (VSC-HVDC) electromagnetic transient model considering the loss of the phase reactors was constructed. To mitigate the additional stresses on the VSC valves and DC capacitor caused by the DC side ripples, the inner loop dual current controller which based on the positive-sequence synchronous reference frame and negative-sequence synchronous reference frame were designed. The outer loop DC voltage controller was designed. Simulation results demonstrate the validity of the mathematical model and the effectiveness of the proposed control strategy.

KEY WORDS: voltage source converter based high voltage direct current transmission system; unbalanced AC grid; double line-frequency ripples; additional stresses; dual current control; DC voltage control

摘要: 推导了交流电网不平衡情况下电压源换相高压直流输电系统(voltage source converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)电磁暂态模型, 提出了适用于该场合的抑制直流电压二次波动的控制策略。通过分析 $\alpha\beta$ 坐标与 dq^+ 和 dq^- 坐标之间的变换关系, 得出结论: 在正序旋转坐标下正序分量为直流量, 负序分量是频率为 100 Hz 的交流量; 而在负序旋转坐标下负序分量为直流量, 正序分量是频率为 100 Hz 的交流量。通过简化交、直流侧电路, 建立考虑换相电抗器损耗的交流系统不平衡情况下 VSC-HVDC 系统电磁暂态数学模型。为了抑制发生不平衡故障时直流电压的二次波动给 VSC 阀和直流电容器产生额外应力等问题, 设计基于正、负序旋转坐标系的双电流内环控制器和直流电压外环控制器。仿真结果证明所提出的数学模型正确、可靠, 所提出的控制策略能够有效地抑制直流电压二次波动。

关键词: 电压源换相高压直流输电系统; 不平衡交流电网; 二次波动; 额外应力; 双电流控制器; 直流电压控制器

0 引言

随着功率半导体开关器件性能的不断提高以及微电子控制技术的不断成熟, 电压源换流器的应用逐步从低压小容量电力拖动领域和高频电源领域向高压大容量输配电领域扩展, 这其中又以在输电领域应用的电压源换相高压直流输电为典型代表^[1-4]。

近年来, 国内外科研机构以及学者对交流电网平衡情况下的 VSC-HVDC 模型以及控制策略进行了广泛而深入的研究和讨论: 文献[5]对基于电压源换流器的新型直流输电系统的数学模型和控制策略

进行了研究；文献[6]建立了在同步旋转坐标系下新型直流输电系统的暂态数学模型，对向无源网络供电的直流输电系统的控制器进行了设计；文献[7]在 dq 同步旋转坐标系下，推导出 VSC-HVDC 的连续时间状态空间模型，实现了有功与无功、直流电压与无功的独立控制；文献[8]分析了 VSC-HVDC 的稳态功率特性及控制方式，为研究含有 VSC-HVDC 的交直流电力系统的潮流控制特性奠定了基础。

以上文献所研究的 VSC-HVDC 数学模型和控制策略等都是在交流系统平衡的情况下进行的，没有对交流系统发生故障导致交流电压不平衡情况下的控制策略进行讨论。而 VSC-HVDC 系统在实际运行的过程中，其交流侧电网不平衡故障时有发生，且单相接地故障占绝大多数^[9]，因此分析交流电网不平衡情况下的 VSC-HVDC 电磁暂态数学模型以及控制策略具有重大的现实意义。国内外学者对这方面内容也进行了讨论：其中，文献[10]研究了 STATCOM 在交流系统不平衡情况下的控制策略，对正、负序分解的内环控制器进行详细阐述；文献[11]对 PWM 换流器交流网络受到扰动情况下的数学模型和控制策略进行研究；文献[12]对交流系统不平衡情况下 VSC-HVDC 系统的工作特性进行分析研究，并提出相应的控制策略，然而，简单地将电压和电流分解为正、负序分量而设计的控制器，由于正、负序分解时造成的时延等问题会给控制系统的动态响应带来不利影响^[13]，而对于两端 VSC-HVDC 系统必须考虑 2 个交流系统之间的相互影响，需要控制系统具有更好的动态响应性能。

本文建立了 VSC-HVDC 系统交流侧不平衡情况下交、直流侧的电磁暂态模型。在正序旋转坐标系下负序分量表现为 100 Hz 交流量，采用陷波滤波器将该倍频分量滤除则得到正序旋转坐标系下的正序直流分量；在负序旋转坐标系下正序分量同样表现为 100 Hz 交流量，采用同样的方法可以将该分量滤除，由此得到的电流量用于双序电流控制器。抑制直流电压二次波动的控制策略将有效地减少过电压和过电流对 VSC 阀体以及直流侧电容的冲击，也可以减小 VSC 交流侧电压、电流的非特征谐波含量。

1 适用于交流网络不平衡时的电磁暂态模型

1.1 正、负序 dq 坐标变换

VSC-HVDC 系统一端换流站结构如图 1 所示，图中： U_c 为换流器侧交流电压； U_s 和 I 分别为交流电

网侧电压和交流电流； R 代表 VSC 换流器的损耗以及换流电抗器 L 的内阻；直流电容器 C 为换流器提供电压支撑以及滤波作用；为减小 VSC 换流器产生的高次特征谐波对交流网络的影响而在交流侧设置了滤波器。

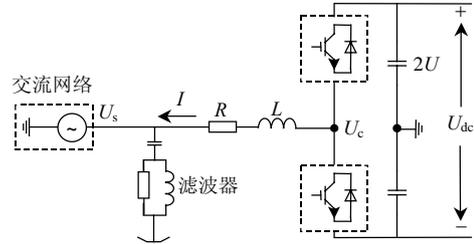


图 1 VSC 换流站结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a VSC based power conversion system

在交流电网不平衡的情况下，假设无零序分量，三相电压或电流可以分解为正序分量和负序分量。在固定坐标系 $\alpha\beta$ 下，三相电压或电流可以分解为^[14]

$$f_{\alpha\beta}(t) = f_{\alpha\beta+} \cdot e^{j\omega t} + f_{\alpha\beta-} \cdot e^{-j\omega t} \quad (1)$$

式中 f 为电压或电流分量。

将固定坐标系 $\alpha\beta$ 下的正、负序分量分别乘 $e^{-j\omega t}$ 、 $e^{j\omega t}$ ，转换为旋转坐标系下的 dq^+ 和 dq^- ，转换关系如图 2 所示，则：

$$\tilde{f}_{dq}^+ = f_{dq}^+ + f_{dq}^- \cdot e^{-2j\omega t} \quad (2)$$

$$\tilde{f}_{dq}^- = f_{dq}^- + f_{dq}^+ \cdot e^{2j\omega t} \quad (3)$$

从式(2)、(3)可得，在正序旋转坐标下，正序分量为直流量，而负序分量则是频率为 100 Hz 的交流量；同样，在负序旋转坐标下，负序分量为直流量，而正序分量是频率为 100 Hz 的交流量，所以可以在正序旋转坐标系下使用低通滤波器或 100 Hz 陷波滤波器将其滤除；在负序旋转坐标系下也采用同样的方法，但是由于采用低通滤波器对控制系统的频带会有所限制^[12]，所以本文采用 100 Hz 陷波的方

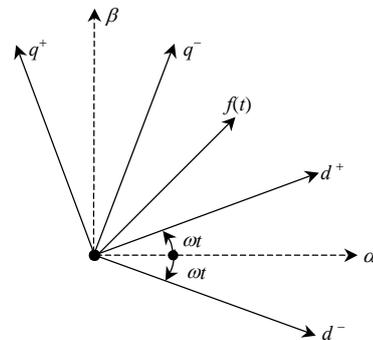


图 2 $\alpha\beta$ 与 dq^+ 和 dq^- 坐标之间的变换关系

Fig. 2 Relationship between the $\alpha\beta$ reference frame and the dq^+ and dq^- reference frames

法来滤除二次谐波分量。

1.2 交流侧电磁暂态模型

通过图1所示VSC换流站结构可以得到如图3所示VSC系统交直流侧等效电路。通过分析该等效电路可以得到在交流电网不平衡情况下VSC系统交流侧的电磁暂态模型。

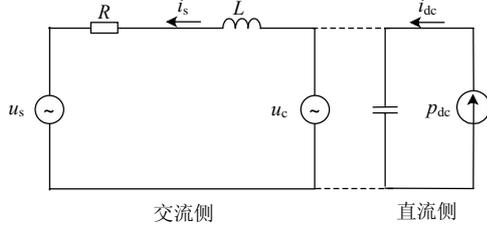


图3 VSC系统等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of the VSC transmission system

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d+}^+ \\ i_{q+}^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{cd+}^+ \\ u_{cq+}^+ \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sd+}^+ \\ u_{sq+}^+ \end{bmatrix} - \mathbf{T}_+ \begin{bmatrix} i_{d+}^+ \\ i_{q+}^+ \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d-}^- \\ i_{q-}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{cd-}^- \\ u_{cq-}^- \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{sd-}^- \\ u_{sq-}^- \end{bmatrix} - \mathbf{T}_- \begin{bmatrix} i_{d-}^- \\ i_{q-}^- \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{式中: } \mathbf{T}_+ = \begin{bmatrix} \frac{R}{L} & -\omega \\ \omega & \frac{R}{L} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{T}_- = \begin{bmatrix} \frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & \frac{R}{L} \end{bmatrix}; \quad i_{dq+}^{\pm} \text{ 为输出量;}$$

u_{cdq+}^{\pm} 为控制输入量; u_{sdq+}^{\pm} 为干扰输入量; 各变量右下角的+、-号分别表示正序旋转坐标系下和负序旋转坐标系下的变量; 右上角的+、-号分别表示处于相应旋转坐标系下各变量的正、负序分量。通过1.1节可知,在正、负序旋转坐标系下的100 Hz交流量都将通过陷波滤波器滤除。为表示方便,表示各变量正、负序旋转坐标系的+、-号在下文中将省略。

不考虑交流滤波器消耗的功率^[15],显然VSC交流侧输出的瞬时功率可以表示为

$$P_s = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \quad (6)$$

$$Q_s = Q \quad (7)$$

$$\text{式中} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_{c2} \\ P_{s2} \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{sd}^+ & u_{sq}^+ & u_{sd}^- & u_{sq}^- \\ u_{sd}^- & u_{sq}^- & u_{sd}^+ & u_{sq}^+ \\ u_{sq}^- & -u_{sd}^- & -u_{sq}^+ & u_{sd}^+ \\ u_{sq}^+ & -u_{sd}^+ & u_{sq}^- & -u_{sd}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d+}^+ \\ i_{q+}^+ \\ i_{d-}^- \\ i_{q-}^- \end{bmatrix}.$$

为了消除直流侧电压二次波动以及达到系统较高功率因数运行的目的,必须使

$$[P_0 \ P_{c2} \ P_{s2} \ Q]^T = [P_0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (8)$$

即

$$\begin{bmatrix} i_{d+}^+ \\ i_{q+}^+ \\ i_{d-}^- \\ i_{q-}^- \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} u_{sd}^+ & u_{sq}^+ & u_{sd}^- & u_{sq}^- \\ u_{sd}^- & u_{sq}^- & u_{sd}^+ & u_{sq}^+ \\ u_{sq}^- & -u_{sd}^- & -u_{sq}^+ & u_{sd}^+ \\ u_{sq}^+ & -u_{sd}^+ & u_{sq}^- & -u_{sd}^- \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

换流电抗器吸收的瞬时功率可以表达为

$$P_L = P_{L0} + P_{Lc2} \cos(2\omega t) - P_{Ls2} \sin(2\omega t) \quad (10)$$

$$\text{式中: } P_{L0} = \frac{3L}{4} \left(\frac{di_{d+}^+}{dt} + \frac{di_{q+}^+}{dt} + \frac{di_{d-}^-}{dt} + \frac{di_{q-}^-}{dt} \right); \quad P_{Lc2} = 3\omega L (i_{d+}^+ i_{q-}^- - i_{q+}^+ i_{d-}^-); \quad P_{Ls2} = 3\omega L (i_{d+}^+ i_{d-}^- + i_{q+}^+ i_{q-}^-).$$

以上就是在交流侧电压不平衡情况下,VSC系统交流侧电磁暂态数学模型。式(6)、(10)表明,在交流系统不平衡情况下,从VSC交流侧注入到直流系统的瞬时有功功率中包含有2倍工频分量,该分量的产生主要是由于正、负序电压和电流分量相互作用的结果,由此也导致了直流侧电压二次波动等不利影响,因此,为了保证直流电压的稳定性,减小对阀的冲击以及消除非特征低次谐波等问题,必须使 P_{c2} 、 P_{s2} 、 P_{Lc2} 和 P_{Ls2} 等分量为零值。

1.3 直流侧电磁暂态模型

根据VSC交流侧和直流侧瞬时有功功率相等的原理^[16],则

$$P_{dc} - \frac{1}{2} \cdot C \frac{du_{dc}^2}{dt} = P_s + P_L \quad (11)$$

将式(6)、(10)代入式(11),整理可得:

$$\frac{du_{dc}^2}{dt} = \frac{2}{C} (P_{dc} - P_0 - P_{L0}) - \frac{2}{C} (P_{Lc2} + P_{c2}) \cdot \cos(2\omega t) + \frac{2}{C} (P_{Ls2} - P_{s2}) \sin(2\omega t) \quad (12)$$

则式(12)为交流电网不平衡情况下一端VSC换流站直流侧电磁暂态数学模型。

2 控制策略

2.1 基于正、负序旋转坐标系的双电流内环控制

在内环电流控制策略方面,采用双电流控制方式,即正序旋转坐标系下的直接电流控制和负序旋转坐标系下的直接电流控制。从式(4)、(5)和式(12)所描述的VSC交、直流侧电磁暂态模型可知,状态输出变量 i_{dq+}^{\pm} 与输入量 u_{cdq+}^{\pm} 之间存在强耦合关系,所以必须设计解耦控制器以消除它们之间的耦合作用^[16]。

在正序旋转坐标系下,正序电流解耦控制器由下式定义:

$$u_{cd}^+ = u_d^+ - \omega L \cdot i_q^+ + u_{sd}^+ \quad (13)$$

$$u_{cq}^+ = u_q^+ + \omega L \cdot i_d^+ + u_{sq}^+ \quad (14)$$

式中： $u_d^+ = K_p^+ \cdot (i_{dref}^+ - i_d^+) + K_i^+ \cdot \int (i_{dref}^+ - i_d^+) dt$ ； $u_q^+ = K_p^+ \cdot (i_{qref}^+ - i_q^+) + K_i^+ \cdot \int (i_{qref}^+ - i_q^+) dt$ ； u_d^+ 和 u_q^+ 是新引进的用于 d 、 q 轴解耦的 2 个控制量； i_d^+ 、 i_q^+ 、 u_{sd}^+ 和 u_{sq}^+ 都是经 100 Hz 陷波滤波器滤波后的输出量。

在 VSC-HVDC 系统交流侧平衡的情况下，系统各变量不存在负序分量，而当交流系统发生不平衡故障时则导致 VSC 交流电压不平衡且出现负序分量，直流电压也将包含倍频谐波分量。

在负序旋转坐标系下，负序电流解耦控制器由下式定义：

$$u_{cd}^- = u_d^- + \omega L \cdot i_q^- + u_{sd}^- \quad (15)$$

$$u_{cq}^- = u_q^- - \omega L \cdot i_d^- + u_{sq}^- \quad (16)$$

式中： $u_d^- = K_p^- \cdot (i_{dref}^- - i_d^-) + K_i^- \cdot \int (i_{dref}^- - i_d^-) dt$ ； $u_q^- = K_p^- \cdot (i_{qref}^- - i_q^-) + K_i^- \cdot \int (i_{qref}^- - i_q^-) dt$ ； u_d^- 和 u_q^- 为新引进的用于 d 、 q 轴解耦的 2 个控制量。

如图 4 所示，将正、负序旋转坐标系下的控制器结合起来，则构成了完整的双电流内环控制器。

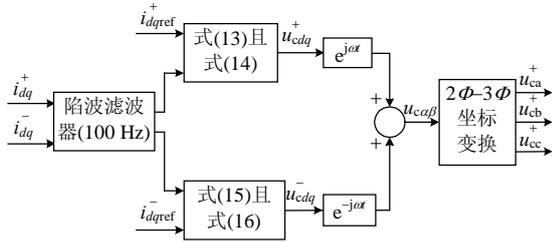


图 4 双电流控制示意图

Fig. 4 Structure of the proposed dual current controller

2.2 外环直流电压控制器

根据式(12)所描述的VSC-HVDC系统直流侧电磁暂态数学模型，设^[17]：

$$u_{dc}^2 = f_0 + f_{c2} \cdot \cos(2\omega t) + f_{s2} \cdot \sin(2\omega t) \quad (17)$$

则有：

$$\frac{df_0}{dt} = \frac{2}{C} (P_{dc} - P_0 - P_{L0}) \quad (18)$$

$$\frac{df_{c2}}{dt} = -\frac{2}{C} (P_{Lc2} + P_{c2}) - 2\omega \cdot f_{s2} \quad (19)$$

$$\frac{df_{s2}}{dt} = \frac{2}{C} (P_{Ls2} - P_{s2}) + 2\omega \cdot f_{c2} \quad (20)$$

式中： f_0 为 u_{dc}^2 的直流分量； f_{s2} 和 f_{c2} 为VSC-HVDC系统交流侧不平衡情况下 u_{dc}^2 的倍频分量，则式(17)可以表示为

$$u_{dc}^2 = f_0 + \sqrt{f_{s2}^2 + f_{c2}^2} \cdot \sin(2\omega t + \arctan \frac{f_{c2}}{f_{s2}}) \quad (21)$$

由此得到 u_{dc}^2 的倍频分量幅值为 $\sqrt{f_{s2}^2 + f_{c2}^2}$ 。

以正序旋转坐标系下的 d 轴分量为电网电压向量定位^[18]，即 $u_{sq}^+ = 0$ ，式(18)可表示为

$$\begin{aligned} \frac{df_0}{dt} &= \frac{2}{C} P_{dc} - \frac{3}{C} u_{sd}^+ i_d^+ - \frac{3L}{2C} \left(\frac{di_d^{+2}}{dt} + \frac{di_q^{+2}}{dt} \right) - \\ &\frac{3}{C} (u_{sd}^- i_d^- - u_{sq}^- i_q^-) - \frac{3L}{2C} \left(\frac{di_d^{-2}}{dt} + \frac{di_q^{-2}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

由式(22)可知 f_0 为直流电压控制器的输出量， i_d^+ 为控制输入量，其他分量为干扰量^[19]，该式用来指导外环直流电压控制器的设计。

外环直流电压控制器的设计原理如图 5 所示，

图中 $f^- = -\frac{3}{C} (u_{sd}^- i_d^- - u_{sq}^- i_q^-) - \frac{3L}{2C} \left(\frac{di_d^{-2}}{dt} + \frac{di_q^{-2}}{dt} \right)$ 为输入干扰量。由于反馈量 u_{dc}^2 含有二次谐波成分，为了消除该谐波，设置了如图 5 所示的 100 Hz 谐波滤波器。

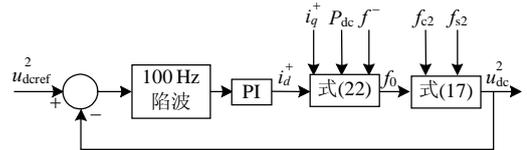


图 5 直流电压控制器

Fig. 5 Structure of the DC voltage controller

3 仿真实验

3.1 直接电流控制

为了验证所提出电磁暂态模型的正确性以及相应控制策略的有效性，建立如图 6 所示联结两端有源交流网络的VSC-HVDC系统仿真模型^[20]。其中，VSC换流站 I 采用定有功功率控制和定无功功率控制策略，VSC换流站 II 采用定直流电压控制和定交流电压控制策略。利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC对VSC换流站 II 交流电网侧发生单相接地短路故障和两相短路故障进行仿真研究，试验用VSC-HVDC系统主要参数如表 1 所示。

首先对采用直接电流控制策略^[13]时联结两端有源交流网络的VSC-HVDC系统VSC换流站 II 在发生单相接地短路故障时进行仿真试验研究。系统在 $t=0.05$ s时刻发生该故障，故障持续时间 0.2 s。系统仿真结果如图 7 所示，可以得知，VSC换流站

表 1 VSC 系统主要技术参数

Tab. 1 Parameters of VSC converter station

容量 S/MVA	开关频率 f /Hz	直流电压 U_{dc} /kV	直流电缆长度 l /km
50	1950	50	10
直流电容 $C/\mu\text{F}$	换相电抗 L/mH	交流电压 U_s/kV	等效电阻 R/Ω
128	5.1	25	0.5

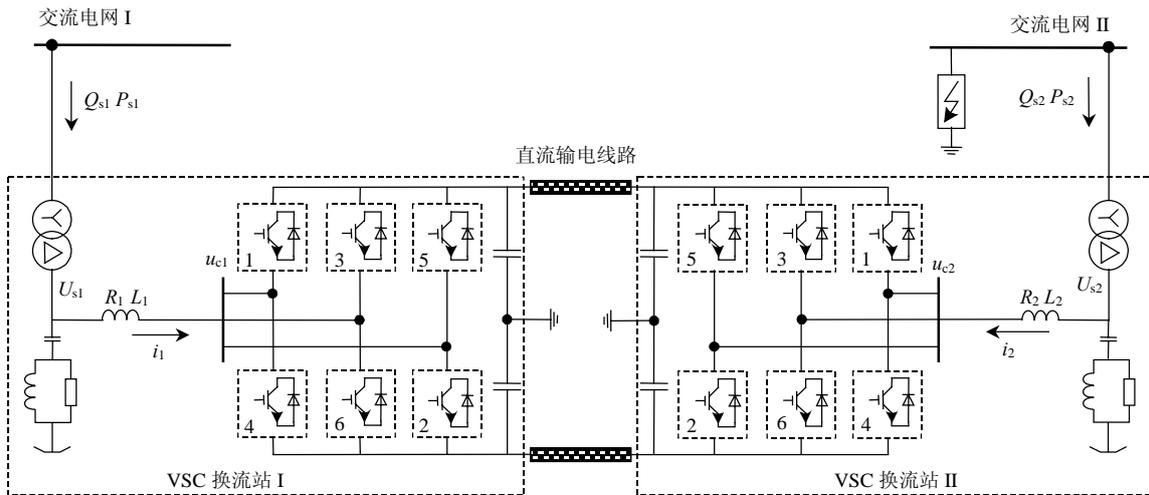
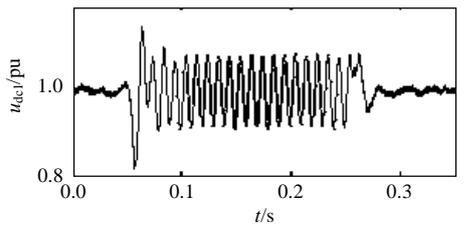


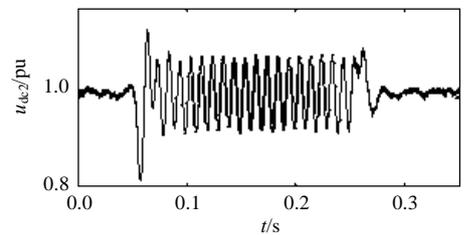
图6 VSC-HVDC 系统仿真模型

Fig. 6 Simulation model of VSC-HVDC

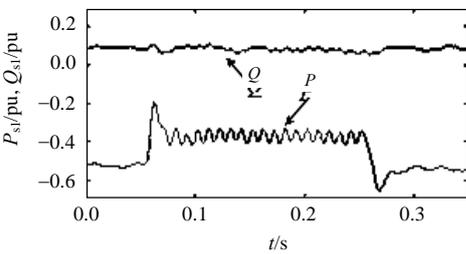
II 侧交流母线电压跌落，两端换流站直流母线电压、有功功率以及相关物理量都发生了非常明显的二次波动现象。



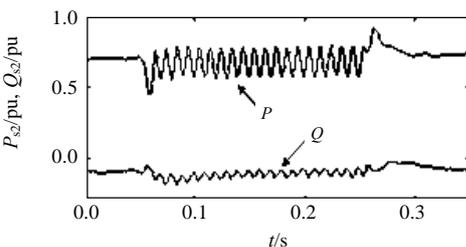
(a) VSC 换流站 I 侧直流电压



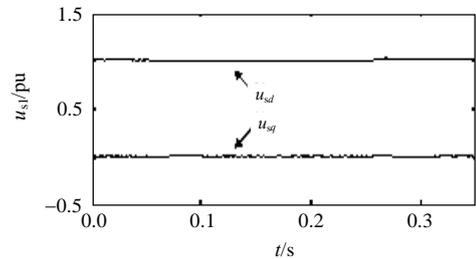
(b) VSC 换流站 II 侧直流电压



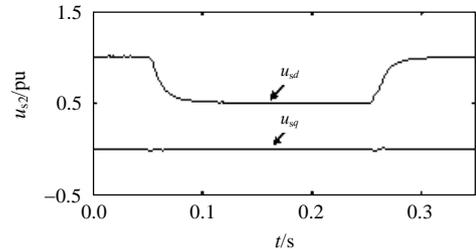
(c) VSC 换流站 I 侧有功、无功功率



(d) VSC 换流站 II 侧有功、无功功率



(e) VSC 换流站 I 侧交流电压 d-q 轴分量



(f) VSC 换流站 II 侧交流电压 d-q 轴分量

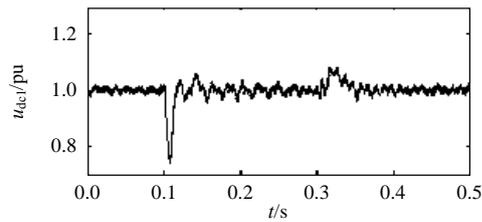
图7 交流电网不平衡情况下系统仿真结果

Fig. 7 Simulation results of VSC-HVDC under unbalanced AC conditions

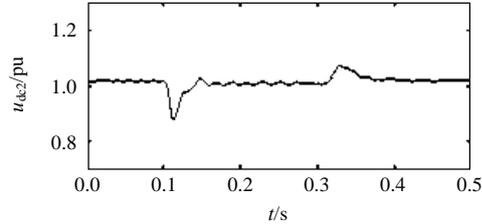
3.2 抑制直流电压二次波动控制

采用本文提出的基于正、负序旋转坐标系的双电流内环控制和外环直流电压控制器对 VSC-HVDC 系统 VSC 换流站 II 交流电网侧发生单相接地短路故障以及相间短路故障进行仿真试验研究。试验系统在 $t=0.1s$ 时刻发生故障，故障持续时间 $0.2s$ 。

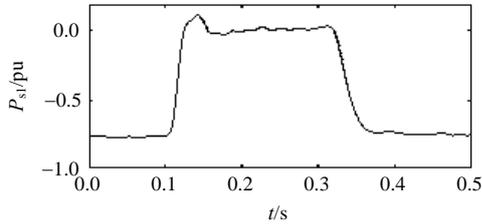
如图 8 所示为 VSC 换流站 II 交流电网侧发生单相对地短路故障时系统仿真结果示意图，故障发生后由于交流电网电压不对称从而导致了 VSC 换流站 II 交流电压、电流都出现了负序分量，在采用本文所提出的控制器作用下，两端换流站直流母线电压和有功功率都没有出现明显的二次波动现象。



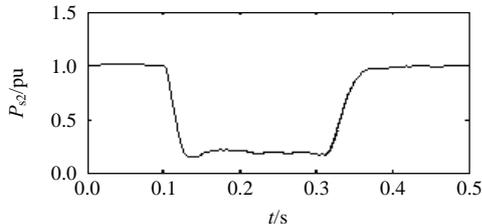
(a) VSC 换流站 I 侧直流电压



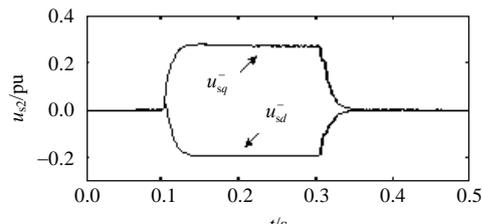
(b) VSC 换流站 II 侧直流电压



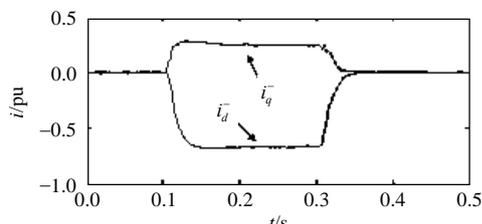
(c) VSC 换流站 I 侧有功功率



(d) VSC 换流站 II 侧有功功率



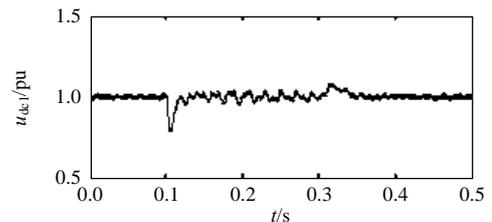
(e) VSC 换流站 II 侧负序 d - q 轴交流电压



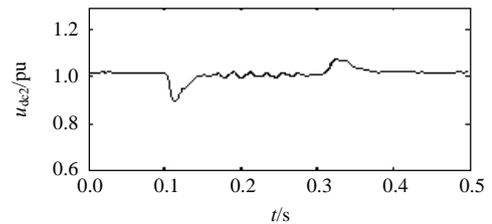
(f) VSC 换流站 II 侧负序 d - q 轴交流电流

图 8 单相接地故障情况下系统仿真结果
Fig. 8 Simulation results of VSC-HVDC under single phase to ground fault

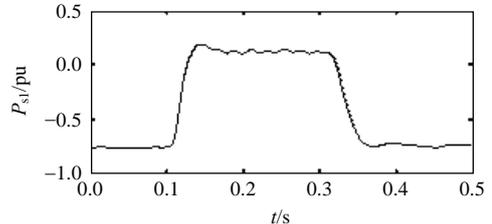
如图 9 所示为 VSC 换流站 II 交流电网侧发生相间短路故障时系统仿真结果示意图, 由于此类故



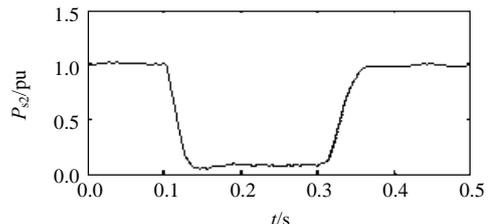
(a) VSC 换流站 I 侧直流电压



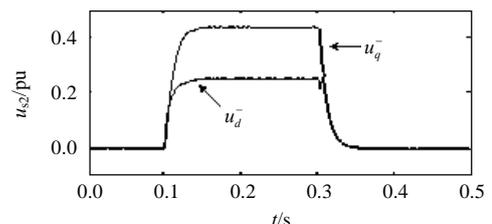
(b) VSC 换流站 II 侧直流电压



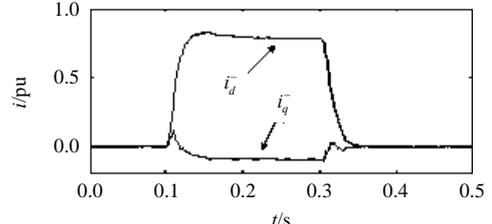
(c) VSC 换流站 I 侧有功功率



(d) VSC 换流站 II 侧有功功率



(e) VSC 换流站 II 侧负序 d - q 轴交流电压



(f) VSC 换流站 II 侧负序 d - q 轴交流电流

图 9 相间短路故障情况下系统仿真结果
Fig. 9 Simulation results of VSC-HVDC under phase to phase short circuit

障导致了交流电压不平衡, 从而产生了电压、电流负序分量。仿真结果表明在本文提出的控制器作用

下,两端换流站直流电压的二次波动现象得到了有效地抑制。

在采用本文所提出的控制策略的基础上,通过对以上2种较为常见的导致VSC-HVDC系统交流电网不平衡的故障仿真研究结果证明:控制器动态响应速度较好,能够快速的根据系统条件的变化进行调整,不会产生明显时延现象;控制器均能有效地抑制直流电压二次波动,由此缓解了直流电压二次波动对阀体的冲击,减少了非特征谐波的大量产生,提高了系统在发生不平衡故障情况下不间断安全稳定运行能力。

4 结论

(1) 利用瞬时对称分量理论,建立了在 $d-q$ 同步旋转坐标系下并考虑换相电抗器损耗的交、直流侧VSC-HVDC系统电磁暂态模型。

(2) 设计了正、负序旋转坐标系下的控制器,将其结合起来构成了完整的双电流内环控制器。通过对VSC-HVDC系统直流侧电磁暂态数学模型的研究,设计了外环直流电抗控制器,其中100 Hz陷波滤波器用来消除直流电压中的倍频分量。

(3) 通过对仿真计算结果的对比研究证明,由于对式(17)中导致直流电压二次波动的影响因子 f_{s2} 和 f_{c2} 进行了有效地抑制,并在内、外环控制器中加入了100 Hz陷波滤波器以消除由于相序分解和反馈控制所带来的倍频分量,本文所提出的控制策略能有效地抑制交流电网不平衡情况下VSC-HVDC系统直流电压二次波动现象,该控制策略可以应用到实际控制器设计中。

参考文献

- [1] Thomas J L, Poullain S, Benchaib A. Analysis of a robust DC-bus voltage control system for a VSC transmission scheme[C]. Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission, London, UK, 2001.
- [2] Nikkhajoei H, Irvani R. Dynamic model and control of AC-DC-AC voltage-sourced converter system for distributed resources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1169-1178.
- [3] Dinavahi V R, Irvani R M, Bonert R. Real-time digital simulation of power electronic apparatus interfaced with digital controllers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 775-781.
- [4] 梁海峰, 李庚银, 李广凯, 等. 向无源网络供电的VSC-HVDC系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 45-50.
Liang Haifeng, Li Gengyin, Li Guangkai, et al. Simulation study of VSC-HVDC system connected to passive network[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 45-50(in Chinese).
- [5] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于VSC的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.
Zhang Guibin, Xu Zheng, Wang Guangzhu. Steady-state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22(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] 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).
- [8] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 1-5.
Zheng Chao, Zhou Xiaoxin, Li Ruomei, et al. Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 1-5(in Chinese).
- [9] 马玉龙, 肖湘宁, 姜旭. 交流系统接地故障对HVDC的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 144-149.
Ma Yulong, Xiao Xiangning, Jiang Xu. Analysis of the impact of AC system single-phase earth fault on HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 144-149(in Chinese).
- [10] Hochgraf C, Lasseter R H. STATCOM controls for operation with unbalanced voltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2): 538-544.
- [11] Rioual P, Pouliquen H, Louis J. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(3): 495-502.
- [12] Song H, Nam K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalance input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [13] 魏晓光. 电压源换流器高压直流输电控制策略及其在风电场并网中的应用研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
Wei Xiaoguang. Research on control strategies of voltage source converter based HVDC and its application in wind farm integration system [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2007(in Chinese).
- [14] Gerardus C P. Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 522-528.
- [15] Lie Xu, Bjarne R A, Cartwright P. VSC transmission operating under unbalanced AC conditions-analysis and control design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 427-434.
- [16] 李国栋, 毛承雄, 陆继明, 等. 基于逆系统理论的VSC-HVDC新型控制[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 45-50.

- Li Guodong, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. New control of VSC-HVDC based on the inverse system theory[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 45-50(in Chinese).
- [17] Yazdani A, Iravani R. A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Quebec, Canada, 2006.
- [18] Mauricio J M , Exposito A G. Modeling and control of an HVDC-VSC transmission system[C]. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2006.
- [19] Xu L, Andersen B R , Cartwright P. Multilevel-converter-based VSC transmission operating under fault AC conditions[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(2): 185-193.
- [20] ABB power technology AB. It's time to connect – technical description of HVDC light technology[R/OL]. 2005. <http://www.abb.com/hvdc>.



皇甫成

收稿日期：2008-06-21。

作者简介：

皇甫成(1981—)，男，博士研究生，研究方向为高压直流输电技术以及电磁场数值计算，huangfuc@epri.ac.cn;

贺之渊(1977—)，男，博士，工程师，从事VSC-HVDC 技术及相关试验方法的研究；

汤广福(1966—)，男，博士，教授级高级工程师，博士生导师，从事电力系统电力电子技术的研究；

阮江军(1968—)，男，博士，教授，博士生导师，从事高电压与绝缘技术、电磁场理论与数值计算、电磁兼容等方面的研究。

(编辑 刘浩芳)