

VSC-HVDC 三相不平衡控制策略

袁旭峰¹, 高璐¹, 文劲宇², 程时杰²

(1. 贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550003;

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

摘要: 分析了电网三相不平衡时电压源换流器高压直流输电(VSC-HVDC)系统的谐波传递特性,设计了一种基于瞬时对称分量法的序分量检测技术,适用于 VSC-HVDC 系统的正、负序双回路的双闭环控制策略。该控制策略利用瞬时对称分量变换获取电压和电流的无延迟正、负序分量,不仅在时域范围内对传统对称分量法进行了扩展,而且也解决了正、负序分解时所带来的延迟问题。另外,提出在三相不平衡电力系统的控制中增加一个不平衡指令补偿模块,改善 VSC-HVDC 系统在电网三相不平衡时的运行特性。最后,在仿真软件 PSCAD/EMTDC 的环境下建立了一个 VSC-HVDC 系统及相关控制策略,验证了所设计控制策略的正确性。

关键词: VSC-HVDC 系统; 三相不平衡; 谐波传递特性; 瞬时对称分量法; 双闭环控制策略

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0001-05

0 引言

造成电网三相不平衡的原因主要有 2 个方面:一是三相负载不平衡;二是存在不对称故障或非全相运行。对于电压源换流器高压直流输电(VSC-HVDC,也称为轻型直流输电)系统,其逆变侧交流系统为无源系统或弱交流系统时,负载侧难以保证完全的三相对称,也容易发生三相不对称故障。因此,研究 VSC-HVDC 系统在电网不平衡时的运行特性,并提出相应的控制策略保证其可靠运行具有积极的意义。文献[1]较早研究了电网不平衡时 PWM 整流器调节特性的影响,并采用对称分量法,以交流侧传递的瞬时有功功率和直流侧瞬时功率相等为基础,提出了对正、负序电流进行跟踪控制的策略。但是,由于跟踪的正、负序电流为正弦量,无法实现无时差控制。

文献[2]提出了由正、负序 2 套基于正序同步旋转坐标系的独立电流跟踪方案。该方案中正、负序电流被转换为直流量,可实现对正、负序电流的无差控制。文献[3]提出了一种使用状态估计器获取输入侧电压的正、负序分量的方法,无需使用锁相环,避免了电压相位信号检测不准确所带来的问题。但由于状态估计器建立在受控系统模型准确可知基础上,将其应用于实际系统时有一定的困难。文献[4]基于 PWM 整流器直流侧仅传送恒定功率的原则,提出了一种消除电网不平衡时直流侧谐波电流的控制策略。文献[5]则利用内模控制直接实现了对正、负序电流的无差跟踪,消除了电网不平衡时三相 PWM 整流器直流电压的谐波。

文献[6-7]分析了 VSC-HVDC 系统在电网不平

衡时的运行特性,并提出了相关的控制策略,其实质也是在同步旋转坐标系中将电流信号转换为正、负序直流分量,实现无差跟踪控制。文献[8]则在此基础上提出采用一种基于 1/4 周期延迟的转换方法,缩短了正、负序分量分解的延迟时间,提高了系统的动态响应特性。但这些方法没有对 VSC-HVDC 系统在电网不平衡时的谐波传递特性作进一步的分析。

上述控制策略均是针对电网三相不平衡系统的稳态运行而提出的,没有考虑系统从三相平衡状态到不平衡状态运行的动态过程。另外,以上文献仅仅分析了 PWM 整流器或逆变器的单侧谐波特性,没有在 VSC-HVDC 系统某一侧电网出现不平衡时对另一侧谐波传递特性进行分析。本文首先分析了 VSC-HVDC 系统在电网三相不平衡时谐波传递特性,然后利用瞬时对称分量法提出了相关的控制策略。最后,建立了一个 VSC-HVDC 系统的仿真系统,分析了其在单相接地故障的运行特性。仿真结果表明所提出的控制策略是可行的。

1 VSC-HVDC 系统的谐波传递特性分析

VSC-HVDC 系统的结构如图 1 所示,其中,整流侧和逆变侧的换流变压器分别用等值电感 L_r 和 L_i 表示。整流侧通过变压器直接与同步发电机相连接,逆变侧通过变压器接入电网。则整流侧交流系统可用下式描述:

$$L_r \frac{di_{rk}}{dt} + Ri_{rk} = u_g - u_{rk} \quad k=a, b, c \quad (1)$$

逆变侧交流系统为

$$L_i \frac{di_{ik}}{dt} + Ri_{ik} = u_s - u_{ik} \quad k=a, b, c \quad (2)$$

直流输电网络为

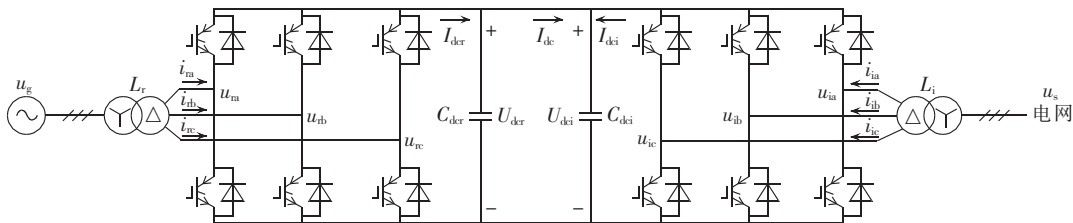


图 1 VSC-HVDC 系统结构图

Fig.1 Structure of VSC-HVDC system

$$\begin{cases} C_{dc} \frac{dU_{dcr}}{dt} = I_{dcr} - I_{dc} \\ C_{dc} \frac{dU_{dci}}{dt} = I_{dci} + I_{dc} \\ U_{dcr} = U_{dci} + R_{dc} I_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

其中,直流输电线路用电阻 R_{dc} 来等效。

为简化分析,只讨论电网基波电动势的作用,双极性开关函数也仅考虑其基波分量,且采用三相平衡时的控制策略,则整流侧有

$$\begin{cases} u_{ra}(\omega t) = U_{dcr} A_r \sin \omega t \\ u_{rb}(\omega t) = U_{dcr} A_r \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_{rc}(\omega t) = U_{dcr} A_r \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

同理,对逆变侧有

$$\begin{cases} u_{ia}(\omega t) = U_{dci} A_i \sin \omega t \\ u_{ib}(\omega t) = U_{dci} A_i \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_{ic}(\omega t) = U_{dci} A_i \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式(1)~(5)构成 VSC-HVDC 系统的数学模型。

逆变侧直流电流 I_{dci} 为

$$I_{dci}(\omega t) = I_{ia} \sin(\omega t - \phi_{ia}) A_i \sin \omega t + I_{ib} \sin(\omega t - \phi_{ib}) A_i \sin(\omega t - 120^\circ) + I_{ic} \sin(\omega t - \phi_{ic}) A_i \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (6)$$

由式(6)可得式(7),其中 I_{dci0} 如式(8)所示。

$$I_{dci}(\omega t) = -\frac{1}{2} A_i [I_{ia} \cos(2\omega t - \phi_{ia}) + I_{ib} \cos(2\omega t - \phi_{ib} - 120^\circ) + I_{ic} \cos(2\omega t - \phi_{ic} + 120^\circ)] + I_{dci0} \quad (7)$$

$$I_{dci0} = \frac{1}{2} A_i [I_{ia} \cos \phi_{ia} + I_{ib} \cos(\phi_{ib} + 120^\circ) + I_{ic} \cos(\phi_{ic} - 120^\circ)] \quad (8)$$

由式(7)可知,当逆变侧三相交流系统不平衡时,直流侧电流不仅含有直流分量 I_{dci0} ,而且还含有 2 次谐波分量。由式(3)可知,直流电流的 2 次谐波分量必然在逆变侧直流电压上产生 2 次谐波分量^[9-12],由下式表示:

$$U_{dci}(t) = U_{dci0} + U_{dci2} \sin(2\omega t + \theta_{i2}) \quad (9)$$

将式(9)代入式(5),以 a 相为例可得:

$$u_{ia}(\omega t) = U_{dci0} A_i \sin \omega t + \frac{1}{2} U_{dci2} A_i [\cos(\omega t + \theta_{i2}) - \cos(3\omega t + \theta_{i2})] \quad (10)$$

这表明在逆变侧交流系统中将产生 3 次谐波分量。交流侧的 3 次谐波分量将在直流侧产生 4 次谐波分量;直流侧的 4 次谐波分量将在交流侧产生 5 次谐波分量等。因此,当 VSC-HVDC 系统的某一侧交

流系统电网三相不平衡时,除了会在 VSC-HVDC 系统的直流侧产生 6、12、18 等 6 的整数倍次特征谐波外,还会产生 2、4、8、10 等次的非特征谐波。而这些非特征谐波又将在交流侧产生 $2n+1$ ($n \neq 3m, n$ 和 m 均为整数)次的非特征谐波。

下面对 VSC-HVDC 系统直流输电网络的谐波传递特性作进一步的分析。

由式(3)可得:

$$R_{dc} C_{dc} \frac{dI_{dc}}{dt} + 2I_{dc} = I_{dcr} - I_{dci} \quad (11)$$

当逆变侧直流电流含有 2 次谐波分量时,由式(11)可知, I_{dcr} 也会产生 2 次谐波电流,即逆变侧直流电流的 2 次谐波电流将传递至整流侧。再由式(3)可知,直流电流的 2 次谐波必然导致整流侧直流电压上产生 2 次谐波分量,由下式表示:

$$U_{dcr}(t) = U_{dcr0} + U_{dcr2} \sin(2\omega t + \theta_{r2}) \quad (12)$$

将式(12)代入式(4),以 a 相为例可得:

$$u_{ra}(\omega t) = U_{dcr0} A_r \sin \omega t + \frac{1}{2} U_{dcr2} A_r [\cos(\omega t + \theta_{r2}) - \cos(3\omega t + \theta_{r2})] \quad (13)$$

由式(13)可知,逆变器直流侧的谐波电压和电流也会通过直流输电线路传送到另一侧交流系统,进而使得 VSC-HVDC 输电系统另一侧的交流系统除了产生 $6n+1$ 次特征谐波外,还会产生 $2n+1$ ($n \neq 3m, n$ 和 m 均为整数)次的非特征谐波。

因此,当逆变侧交流电网三相不平衡较为严重时,将极大地降低 VSC-HVDC 系统的运行特性。

2 基于瞬时对称分量法的不平衡控制策略

当电网不平衡时,适当增加 VSC-HVDC 系统交流侧电感和直流侧电容可以降低谐波幅值。但这些电感、电容的取值过大时,将增大 VSC-HVDC 系统的损耗,降低系统的动态响应特性。为此,必须进一步探讨电网不平衡时 VSC 的控制策略,以限制逆变侧直流电流及直流电压的 2 次谐波,保证系统逆变器及直流输电线路的稳定运行,并使逆变侧故障不传递至整流侧。

考虑到 VSC 具有 2 个自由控制变量,可以独立控制系统的 2 个输出变量,本文在整流器侧采用定交流有功功率/无功功率控制,在逆变器侧采用定直流电压/交流电压幅值控制。并在电网不平衡时,使定直流电压控制具有抑制 2 次谐波的功能,定交

流电压幅值控制含有一个修正补偿环节。

文中设定三相不平衡故障发生在逆变侧,故在整流器侧采用双闭环控制策略,即外环控制电压、内环控制电流;在逆变器侧采用文献[3]所提出的正、负序双回路的双闭环控制策略。其中,正、负序分量采用改进瞬时对称分量法求取;同时,由于正、负序分量均为三相对称分量,因此在设计控制策略时,直接采用同步参考坐标法进行同步,以避免三角函数的复杂计算以及使用锁相环所带来的误差^[9-10,13-14]。

2.1 瞬时对称分量法^[15]

以三相电流为例,瞬时对称分量法可描述为

$$\begin{bmatrix} i_a^p \\ i_a^N \\ i_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, i_a, i_b, i_c 分别表示三相电流的瞬时值; i_a^p, i_a^N, i_a^0 分别为用复数形式表示的正序、负序和零序电流。利用移相算子 $T_x = e^{-jx^\circ}$, i_a^p, i_a^N, i_a^0 可以将其表示为式(15)所示的实数形式:

$$\begin{bmatrix} i_a^p \\ i_a^N \\ i_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_a + i_b + i_c \\ i_a - \frac{1}{2}(i_b + i_c) + \frac{\sqrt{3}}{2}T_{90}(i_b - i_c) \\ i_a - \frac{1}{2}(i_b + i_c) - \frac{\sqrt{3}}{2}T_{90}(i_b - i_c) \end{bmatrix} \quad (15)$$

相应地,可以得到 b 相和 c 相的电流各序分量的瞬时值 $i_b^p, i_b^N, i_b^0, i_c^p, i_c^N, i_c^0$ 。采用同样方法,可以对三相电压进行瞬时对称分量变换,以获得 $u_a^p, u_b^p, u_c^p, u_a^N, u_b^N, u_c^N, u_a^0, u_b^0, u_c^0$ 的瞬时值。

由式(14)(15)可知,由于瞬时对称分量法利用三相电流的瞬时值进行对称分量变换,故可以用于三相电流的动态和暂态分析中。考虑到图1所示直流输电系统的交流侧换流变压器均含有三角形绕组,不构成对外电路的零序分量回路,故本文在进行瞬时分量变换时,仅使用了正、负序分量。

2.2 同步参考坐标法

对正序电压、电流分量进行 $\alpha\beta$ 变换,可得:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha\beta}^p \\ i_{\alpha\beta}^p \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc/\alpha\beta} \begin{bmatrix} u_{abc}^p \\ i_{abc}^p \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据正序电流矢量 i^p 在正序电压矢量 u^p 上的投影关系,从 $\alpha\beta$ 坐标变换到 dq 坐标的同步旋转角可以直接用式(17)表示:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta^p \\ \sin \theta^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha^p / \sqrt{(u_\alpha^p)^2 + (u_\beta^p)^2} \\ u_\beta^p / \sqrt{(u_\alpha^p)^2 + (u_\beta^p)^2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

进而可以得到在正序同步参考坐标系下正序电流的 $\alpha\beta/dq$ 变换为

$$\begin{bmatrix} i_d^p \\ i_q^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (i_\alpha^p u_\alpha^p + i_\beta^p u_\beta^p) / \sqrt{(u_\alpha^p)^2 + (u_\beta^p)^2} \\ (i_\beta^p u_\alpha^p - i_\alpha^p u_\beta^p) / \sqrt{(u_\alpha^p)^2 + (u_\beta^p)^2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

在式(17)的正序同步参考坐标系下正序电压分量为 $u_d^p = \sqrt{(u_\alpha^p)^2 + (u_\beta^p)^2}$, $u_q^p = 0$ 。

同理,可得到在负序同步参考坐标系下负序电

流的 $\alpha\beta/dq$ 变换为

$$\begin{bmatrix} i_d^N \\ i_q^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (i_\alpha^N u_\alpha^N + i_\beta^N u_\beta^N) / \sqrt{(u_\alpha^N)^2 + (u_\beta^N)^2} \\ (i_\beta^N u_\alpha^N - i_\alpha^N u_\beta^N) / \sqrt{(u_\alpha^N)^2 + (u_\beta^N)^2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

在同步参考坐标系下负序电压分量为 $u_d^N = \sqrt{(u_\alpha^N)^2 + (u_\beta^N)^2}$, $u_q^N = 0$ 。

由式(18)(19)可以直接得到正、负序电流的 dq 分量 $i_d^p, i_q^p, i_d^N, i_q^N$ 。

2.3 不平衡控制策略

由文献[5]可知,电网不平衡时,三相 VSR 交流侧复功率矢量 $\mathbf{S}$ 可表示为

$$\mathbf{S} = p(t) + j q(t) = (e^{j\omega t} \mathbf{U}_{dq}^p + e^{-j\omega t} \mathbf{U}_{dq}^N) (\overline{e^{j\omega t} \mathbf{I}_{dq}^p + e^{-j\omega t} \mathbf{I}_{dq}^N}) \quad (20)$$

求解式(20)得:

$$\begin{cases} p(t) = p_0 + p_{c2} \cos(2\omega t) + p_{s2} \sin(2\omega t) \\ q(t) = q_0 + q_{c2} \cos(2\omega t) + q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (21)$$

令 VSC 的有功和无功功率指令为 $p_0^*, q_0^*, p_{c2}^*, p_{s2}^*$, 且相应的电流指令为 $i_d^{p*}, i_q^{p*}, i_d^{N*}, i_q^{N*}$ 。根据文献[5],并考虑到在同步参考坐标系^[9-10,13-14]下 $u_q^p = u_q^N = 0$, 要使 $p_{c2}^* = 0, p_{s2}^* = 0$, 可得出抑制三相 VSR 直流侧电压 2 次谐波的交流电流指令, 即

$$\begin{bmatrix} i_d^{p*} \\ i_q^{p*} \\ i_d^{N*} \\ i_q^{N*} \end{bmatrix} = \frac{2p_0^*}{3D_1} \begin{bmatrix} u_d^p \\ 0 \\ -u_d^N \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{2q_0^*}{3D_2} \begin{bmatrix} 0 \\ u_d^p \\ 0 \\ -u_d^N \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$D_1 = (u_d^p)^2 - (u_d^N)^2 \neq 0$$

$$D_2 = (u_d^p)^2 + (u_d^N)^2 \neq 0$$

由式(22)可计算出正、负序电流内环的给定电压指令。

前面提及,逆变器采用定直流电压/定交流电流幅值控制。其中,直流电压与有功功率 p_0^* 的传递有关;交流电压幅值则与无功功率 q_0^* 的传递有关。在逆变侧有

$$C_{dc} \frac{dU_{dci}}{dt} = I_{dci} + I_{dc} \quad (23)$$

对式(23)离散化有

$$\frac{C_{dc}}{T_s} [U_{dci}(k+1) - U_{dci}(k)] = I_{dci}(k) + I_{dc}(k)$$

逆变侧直流电压给定值 $U_{dci}^*(k) = U_{dci}(k+1)$, 又直流功率与交流侧有功功率相等, 则有

$$p_0^* = U_{dci}^*(k) \left\{ \frac{C_{dc}}{T_s} [U_{dci}^*(k) - U_{dci}(k)] - I_{dc}(k) \right\} \quad (24)$$

由此可以求出简单的电压外环 PI 控制器输出有功功率的给定值 p_0^* 。

定交流电压幅值控制也可以用 PI 控制实现,考虑到在发生电网三相不对称故障时,交流电压的幅值难以满足给定值要求。此时,可以通过引入一个附加控制,使逆变器可以由定交流电压幅值控制转为定无功功率控制。无功功率控制的给定值可以根据在故障时交流系统的情况具体给定。本文将其给定为 0, 即在故障时将逆变器转为单位功率因数控制。

综合以上过程,可以得到抑制系统不平衡的逆变器控制策略,如图 2 所示。

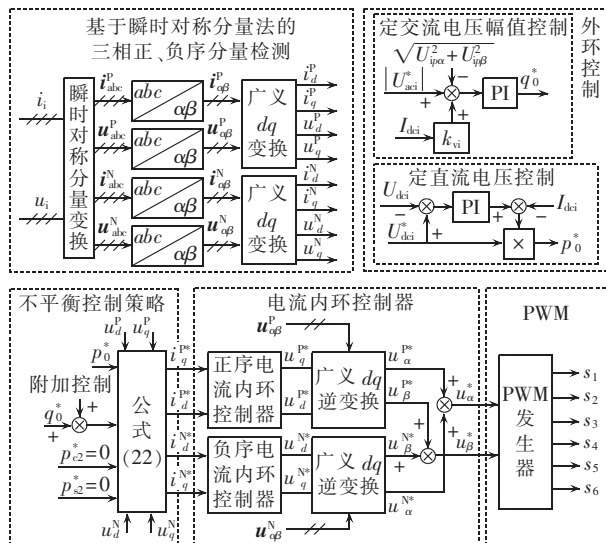


图 2 逆变器电网不平衡控制策略

Fig.2 Inverter-side control strategy of unbalanced system

3 仿真及结果分析

3.1 仿真参数

利用仿真软件 PSCAD/EMTDC 建立了一个由全控元件 IGBT 构成的两电平的 VSC-HVDC 仿真系统。整流侧交流系统参数如下:电源采用线电压为 13.8 kV、内电阻为 3.737Ω 的三相电压源;变压器如图 1 所示,一次侧星形连接,二次侧三角形连接,容量为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$,正序泄漏电抗为 0.1 p.u. ,变比为 $13.8/62.5$;交流电容滤波器参数为 $2.0 \mu\text{F}$;在变压器与整流器间接入 0.01 H 的滤波电感。直流输电线路采用长度为 100 km 的直流电缆。逆变侧交流系统参数如下:电源采用线电压为 115.0 kV 、内电抗为 26.45Ω 、相角为 80° 的三相电压源;变压器一次侧星形连接,二次侧三角形连接,容量为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$,正序泄漏电抗为 0.1 p.u. ,变比为 $115/52.5$;交流电容滤波器参数为 $2.0 \mu\text{F}$;在变压器与整流器间接入 0.0175 H 的电感。在额定工况下运行时,直流输电系统的传输容量为 80 MW ;逆变器侧直流电压为 125.0 kV 。

3.2 仿真分析

为验证基于瞬时对称分量法的三相不平衡控制策略在逆变侧交流系统发生不对称故障时的工作特性, $6.0 \sim 10.0 \text{ s}$ 时在电源侧设置了一个单相短路故障,分析并比较了发生以上故障时,采用本文提出的控制策略(不平衡控制)与无负序控制回路的常规控制策略(传统 PI 控制)时系统的运行特性。

图 3 为逆变侧交流系统发生单相短路故障时的仿真结果(图中, U_{dci} 、 p_0^* 、 q_0^* 为标么值)。由图可知,在该故障下,采用本文所提出的不平衡控制策略可以使交流侧有功功率的传送维持恒定,基本消除了直流电压的 2 次谐波,并极大减小了故障相交流电流的幅值。

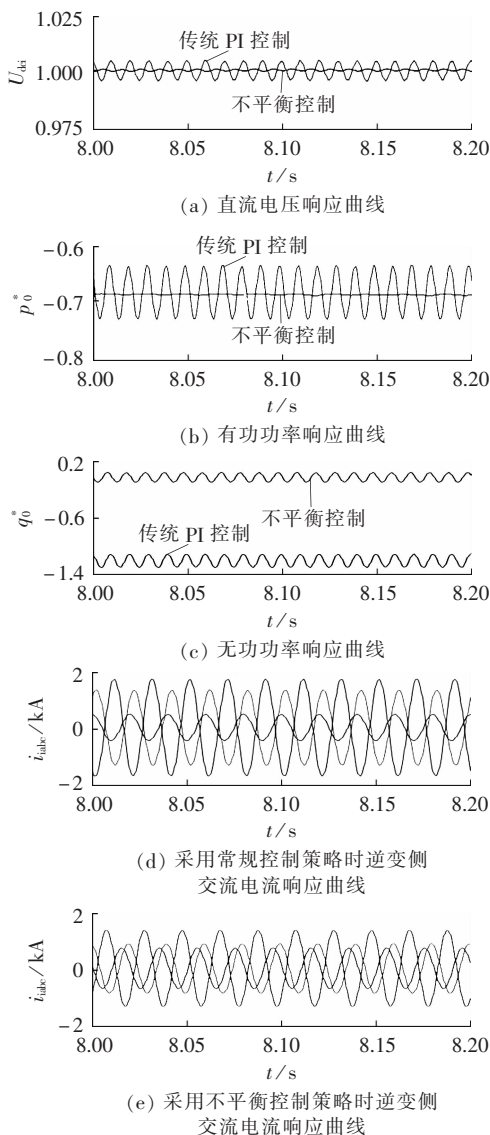


图 3 单相短路故障时系统运行仿真结果

Fig.3 Simulative results of system operation with single-phase grounding fault

4 结论

对 VSC-HVDC 系统在发生三相不对称故障或带三相负荷不平衡时的谐波传递特性进行了分析。指出交流电网三相不平衡时,将在所接入换流器的直流侧产生直流电压的 2 次谐波,而且也会通过直流输电线路将谐波传送至另一侧交流系统,进而使得 VSC-HVDC 系统另一侧的交流系统除了产生 $6n+1$ 次特征谐波外,还会产生 $2n+1$ ($n \neq 3m$, n 和 m 均为整数)次的非特征谐波。因此,当交流电网三相不平衡较为严重时,这些谐波的存在将极大地降低 VSC-HVDC 系统的运行特性。对此,基于瞬时对称分量法及同步参考坐标法,提出了一种新的 VSC-HVDC 系统的控制策略,可有效抑制系统中出现的不平衡。采用基于仿真软件 PSCAD/EMTDC 建立的 VSC-HVDC 系统及基于所提出控制策略的控制器,仿真结果验证了所提出控制策略的有效性。

参考文献:

- [1] RIOUAL P,POULIQUEN H,LOUIS J P. 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.
- [2] 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.
- [3] SONG H S,JOO I W,NAM K. Source voltage sensorless estimation scheme for PWM rectifiers under unbalanced conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2003,50(6): 1238-1245.
- [4] STANKOVIC A V,LIPO T A. A novel control method for input output harmonic elimination of the PWM boost type rectifier under unbalanced operating conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2001,16(5):603-611.
- [5] 张兴,季建强,张崇巍,等. 基于内模控制的三相电压型 PWM 整流器不平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(13): 51-56.
ZHANG Xing,JI Jianqiang,ZHANG Chongwei,et al. Study on internal model control based three-phase PWM rectifier under unbalanced input voltage condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(13):51-56.
- [6] XU Lie,ANDERSEN B R,CARTWRIGHT P. VSC transmission operating under unbalanced AC conditions—analysis and control design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1): 427-434.
- [7] 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 & Exhibition:Asia and Pacific. Dalian,China:[s.n.], 2005:1-6.
- [8] de OLIVEIRA M M. Power electronics for mitigation of voltage sags and improved control of AC power systems[D]. Stockholm, Sweden:Royal Institute of Technology,2000.
- [9] MORÁN L,ZIOGAS P D,JOOS G. Design aspects of synchronous PWM rectifier-inverter systems under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1992, 28(6):1286-1293.
- [10] SUH Y,LIPO T A. Modeling and analysis of instantaneous active and reactive power for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(3):1530-1540.
- [11] HU Lihua,MORRISON R E. The use of modulation theory to calculate the harmonic distortion in HVDC systems operating on an unbalanced supply[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1997,12(2):973-980.
- [12] SADEK K,PEREIRA M. Harmonic transfer in HVDC systems under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1999,14(4):1394-1399.
- [13] Blažič B,Papič I. Improved D-STATCOM control for operation with unbalanced currents and voltages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):225-233.
- [14] JACOBINA C B,de ROSSITER C M B,PINHEIRO R F,et al. Modeling and control of unbalanced three-phase systems containing PWM converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2001,37(6):1807-1816.
- [15] 袁旭峰,程时杰,文劲宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. 中国电机工程学报,2008,28(1):52-58.
YUAN Xufeng,CHENG Shijie,WEN Jinyu. An improved method of instantaneous symmetrical components and its detection for positive and negative sequence current[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(1):52-58.

(编辑:李育燕)

作者简介:

袁旭峰(1976-),男,贵州遵义人,副教授,博士,研究方向为高压直流输电的运行与控制,以及 FACTS 技术在电力系统中的应用(E-mail:ee.xfyuan@gzu.edu.cn);

高璐(1984-),男,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,研究方向为高压直流输电运行与控制;

文劲宇(1970-),男,湖南长沙人,教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制;

程时杰(1945-),男,湖北通山人,院士,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用。

Unbalanced three-phase control strategy of VSC-HVDC system

YUAN Xufeng¹,GAO Lu¹,WEN Jinyu²,CHENG Shijie²

(1. College of Electric Engineering,Guizhou University,Guiyang 550003,China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: The harmonic transfer characteristics of VSC-HVDC system in three-phase imbalance are analyzed and a dual-circuit and dual-loop current control strategy based on the detection technique of instantaneous symmetrical components is proposed for it,which acquires the sequence components of voltage and current without time delay by the instantaneous symmetrical component transformation and extends the conventional symmetrical component method in time domain. An imbalance instruction compensator is added to improve the operating characteristics of VSC-HVDC system in three-phase imbalance. A VSC-HVDC system and its control strategy are built with PSCAD/EMTDC and the simulative results show the correctness of the proposed strategy.

This work is supported by Guizhou Province Natural Science Technology Fund(QKH-J 2008-2212).

Key words: VSC-HVDC system; three-phase imbalance; harmonic transfer; instantaneous symmetrical component; dual-loop control scheme