

# 基于PWM-CSC的混合直流输电系统电网故障穿越策略

夏冰<sup>1,2,3</sup>, 李耀华<sup>1,2,3</sup>, 李子欣<sup>1,2,3</sup>, 徐飞<sup>1,2,3</sup>, 高范强<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

**摘要:**研究了一种整流侧采用传统电网换相换流器(LCC)、逆变侧采用脉宽调制型电流源换流器(PWM-CSC)的混合直流输电系统。为了降低开关频率和提高系统故障响应性能,提出了电网正常运行时采用特定谐波消除法(SHE)调制和电网故障时切换为正弦脉宽调制(SPWM)的调制策略。分析了电网故障情况下逆变侧PWM-CSC在 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下的数学模型,提出了一种基于比例谐振控制器的控制策略并对控制器参数进行了设计,实现了负序电网电流的抑制和单位功率因数运行。此外,给出了电网故障情况下系统传输的最大有功功率的计算方法。在PSCAD/EMTDC中搭建了400 kV/1 250 MW的单极混合直流输电系统仿真模型。仿真结果验证了所提控制策略的正确性和有效性。

**关键词:**混合直流输电;脉宽调制型电流源换流器;脉冲宽度调制;比例谐振控制器;最大传输功率;负序电流抑制;单位功率因数

**中图分类号:**TM 721.3

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201908038

## 0 引言

根据换流器特性,应用于高压直流(HVDC)输电系统的换流器拓扑可以分为电流源换流器(CSC)和电压源换流器(VSC)两大类。目前,应用于高压直流输电工程的CSC采用基于晶闸管的电网换相换流器(LCC),其具有造价低、损耗小、可靠性高、技术成熟等优点<sup>[1-2]</sup>。但是,LCC作为逆变器使用时存在电网换相失败的风险,所以其不适用于连接弱电网及无源网络<sup>[3]</sup>。应用于高压直流输电工程的VSC主要有桥臂器件串联的两电平VSC和模块化多电平换流器(MMC)<sup>[4-5]</sup>。由于两电平VSC在发生直流短路故障时,直流侧并联的大电容放电会导致桥臂的严重过电流,并不适用于远距离架空线高压直流输电。为了穿越直流短路故障,MMC桥臂必须串联能输出负电压的功率模块,导致系统造价较高、损耗大<sup>[6]</sup>。

相较于LCC、两电平VSC和MMC,由于脉宽调制型电流源换流器(PWM-CSC)具有结构简单、造价低、损耗小、直流短路故障穿越能力强、不存在换相失败等优点,其在高压直流输电系统中具有广阔的应用前景<sup>[7-9]</sup>。文献[10]提出了一种整流侧采用PWM-CSC、逆变侧采用LCC的海上风电并网高压直流输电系统,并对系统的数学模型进行了推导研究。文献[11]对整流侧采用LCC、逆变侧采用PWM-CSC的混合直流输电系统进行了建模与仿真研究。文献[12]针对整流侧采用LCC、逆变侧采用双移相

PWM-CSC的混合直流输电系统,提出了一种功率控制策略。然而,文献[10-12]并没有对电网故障情况下混合直流输电系统的控制策略进行研究。

为了抑制电网发生故障时电网电流的负序分量和实现单位功率因数运行,一些学者提出了基于正负序旋转坐标系的控制策略<sup>[13-14]</sup>。通过在正序坐标系中引入比例积分(PI)调节器实现有功功率和无功功率的给定值跟踪,在负序坐标系中引入PI调节器实现负序电网电流的抑制。然而,上述控制策略的研究对象主要是交流侧仅存在滤波电感的VSC。由于CSC交流侧存在电容-电感二阶滤波装置,其在旋转坐标系下的 $dq$ 轴分量存在很强的耦合关系<sup>[15]</sup>,基于正负序旋转坐标系的控制策略存在控制变量解耦困难和控制器参数整定复杂的问题。文献[16]提出了一种在 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下的基于比例谐振(PR)调节器的CSC准直接功率控制策略。该控制策略直接将功率计算值作为CSC电流参考波的给定值用于生成开关信号,无需解耦控制就可以实现单位功率因数运行。然而文中并没有对电网故障情况下CSC的数学模型进行推导,也没有对控制器参数进行设计。文献[17]提出了一种电网发生故障时可以消除CSC直流侧二倍频的滑模控制策略,实现在 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下的电流调节。文献[18]提出了一种优化的负序电流参考值控制策略,实现了CSC直流电流中二倍频的抑制。然而文献[17-18]提出的方法需要较高的开关频率,并不适用于混合直流输电系统。

本文研究了整流侧采用LCC、逆变侧采用PWM-CSC的混合直流输电系统。由于高压直流输电系统逆变侧一般接入负荷中心,电网特性比较复杂,电网故障率较高,所以主要对逆变侧电网故障状

收稿日期:2018-12-02;修回日期:2019-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507167)

Projected supported by the National Natural Science Foundation of China(51507167)

态进行研究。提出了电网正常运行时采用特定谐波消除法(SHE)调制和电网故障时切换为正弦脉宽调制(SPWM)的调制策略。分析了电网故障情况下 PWM-CSC 的数学模型,给出了一种基于 PR 调节器的控制策略并对控制器参数进行了设计。此外,为了防止过调制,给出了电网故障情况下系统能够传输的最大有功功率参考值的计算方法。所提控制策略可以在较低的开关频率和没有解耦运算的条件下实现负序电网电流的抑制和单位功率因数运行。

本文首先介绍了混合直流输电的电路结构,分析了电网故障时逆变侧 PWM-CSC 在  $\alpha\beta$  两相静止坐标系下的数学模型。对 PWM-CSC 能够传输的最大有功功率计算表达式进行了推导。给出了抑制负序电网电流和实现单位功率因数运行的控制策略并对控制器参数进行了设计。最后,在 PSCAD / EMTDC 中搭建了 400 kV / 1 250 MW 的单极混合直流输电系统仿真模型,对提出的控制策略进行了仿真验证。

### 1 混合直流输电系统

基于 PWM-CSC 的混合直流输电系统的电路结构如图 1 所示,图 1 中仅给出了接地双极系统中的正极。整流侧沿用传统直流输电系统的配置,由 12 脉波的晶闸管换流阀、换流变压器、高通滤波器、双调谐滤波器及无功补偿电容器组构成,逆变侧由 2 个移相的 PWM-CSC 直流侧串联、交流侧并联组成。

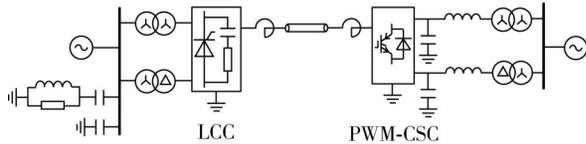


图 1 混合直流输电系统电路原理图

Fig.1 Circuit principle diagram of hybrid HVDC system

逆变侧由 2 个结构完全相同的 PWM-CSC 构成,电路结构如图 2 所示。图中,  $L_{dc}$  为直流侧滤波电感;  $R$  为线路等效电阻;  $L$  和  $C$  分别为交流侧滤波电感和电容;  $U_{dc}$  和  $I_{dc}$  分别为直流侧电压和电流;  $U_{dc1}$  和  $U_{dc2}$  分别为 PWM-CSC<sub>1</sub> 和 PWM-CSC<sub>2</sub> 的输出直流电压;  $i_{cabc1}$  和  $i_{cabc2}$  分别为 PWM-CSC<sub>1</sub> 和 PWM-CSC<sub>2</sub> 的输出交流电流;  $u_{cabc1}$  和  $u_{cabc2}$  分别为 PWM-CSC<sub>1</sub> 和 PWM-CSC<sub>2</sub> 的滤波电容电压;  $i_{gabc1}$  和  $i_{gabc2}$  分别为 PWM-CSC<sub>1</sub> 和 PWM-CSC<sub>2</sub> 的变压器阀侧电流;  $u_{gabc}$  为电网电压。其中每个 PWM-CSC 的桥臂由一定数量的 IGBT 全控型器件串联构成。2 个移相换流器分别通过 Y / Y 结构和 Y / Δ 结构的电力变压器与电网连接,每个换流器交流输出侧必须串联 LC 二阶低通滤波器。

根据文献[13],电网正常运行时采用 SHE 调制策略控制换流器输出的基波分量并消除 11、13 次谐波分量。开关器件的开关频率为  $50 \times (2 \times 3 + 1) = 350$

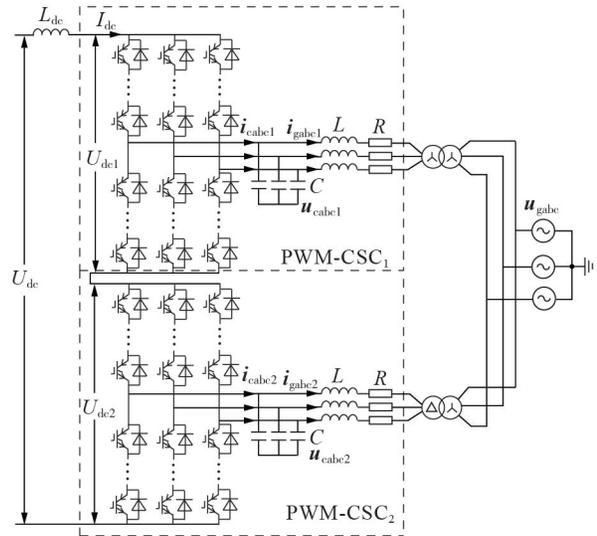


图 2 双移相 PWM-CSC 电路结构

Fig.2 Circuit structure of dual-phase-shift PWM-CSC

(Hz)。交流侧电网的最低次谐波为 23 次。由于换流器输出侧的 LC 二阶低通滤波,电网电流的谐波含量进一步下降。考虑 2 个移相的 PWM-CSC 与电网的连接方式,将 PWM-CSC<sub>1</sub> 的调制信号滞后  $\pi/6$  就可以得到 PWM-CSC<sub>2</sub> 的调制信号。

### 2 电网故障运行时混合直流输电系统的数学模型

本文以 PWM-CSC<sub>1</sub> 为例进行分析,根据基尔霍夫电压和电流定律,等功率矩阵变换后可以得到在  $\alpha\beta$  两相静止坐标系下的电压、电流关系式为:

$$\begin{cases} LC \frac{d^2 i_{g\alpha 1}}{dt^2} + RC \frac{di_{g\alpha 1}}{dt} + i_{g\alpha 1} = i_{c\alpha 1} - \frac{C}{\rho} \frac{du_{g\alpha}}{dt} \\ LC \frac{d^2 i_{g\beta 1}}{dt^2} + RC \frac{di_{g\beta 1}}{dt} + i_{g\beta 1} = i_{c\beta 1} - \frac{C}{\rho} \frac{du_{g\beta}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $u_{g\alpha}$  和  $u_{g\beta}$  分别为电网电压在  $\alpha, \beta$  轴上的分量;  $i_{g\alpha 1}$  和  $i_{g\beta 1}$  分别为 PWM-CSC<sub>1</sub> 变压器副边电网电流在  $\alpha, \beta$  轴上的分量;  $i_{c\alpha 1}$  和  $i_{c\beta 1}$  分别为 PWM-CSC<sub>1</sub> 输出电流在  $\alpha, \beta$  轴上的分量;  $\rho$  为变压器变比。

交流侧连接电力变压器,所以不考虑电网电压中的零序分量。根据瞬时功率理论, PWM-CSC<sub>1</sub> 向电网输送的瞬时有功功率和无功功率可以表示为:

$$\begin{cases} P = \frac{1}{\rho} \left[ (u_{ga}^+ + u_{ga}^-)(i_{ga1}^+ + i_{ga1}^-) + (u_{gb}^+ + u_{gb}^-) \times \right. \\ \left. (i_{gb1}^+ + i_{gb1}^-) + (u_{gc}^+ + u_{gc}^-)(i_{gc1}^+ + i_{gc1}^-) \right] \\ Q = \frac{1}{\sqrt{3}\rho} \left[ (u_{gb}^+ - u_{gb}^- + u_{gc}^+ - u_{gc}^-)(i_{ga1}^+ + i_{ga1}^-) + \right. \\ \left. (u_{gc}^+ - u_{gc}^- + u_{ga}^+ - u_{ga}^-)(i_{gb1}^+ + i_{gb1}^-) + \right. \\ \left. (u_{ga}^+ - u_{ga}^- + u_{gb}^+ - u_{gb}^-)(i_{gc1}^+ + i_{gc1}^-) \right] \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $u_{ga}^+, u_{gb}^+, u_{gc}^+$  和  $u_{ga}^-, u_{gb}^-, u_{gc}^-$  分别为电网电压的正序

和负序分量;  $i_{ga1}^+$ 、 $i_{gb1}^+$ 、 $i_{gc1}^+$  和  $i_{ga1}^-$ 、 $i_{gb1}^-$ 、 $i_{gc1}^-$  分别为 PWM-CSC<sub>1</sub> 变压器副边电网电流的正序和负序分量。

电网发生故障时为了抑制电网电流的负序分量同时实现单位功率因数运行, 必须满足:

$$\begin{cases} i_{ga1}^- = i_{gb1}^- = i_{gc1}^- = 0 \\ Q = 0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)并做等功率矩阵变换后可以得到在  $\alpha\beta$  两相静止坐标系下电网电流的表达式为:

$$\begin{cases} i_{g\alpha 1}^+ = i_{g\alpha 1}^- = u_{g\alpha}^+ P_{dc} / (u_{g\alpha}^+ u_{g\alpha}^+ + u_{g\beta}^+ u_{g\beta}^+) \\ i_{g\beta 1}^+ = i_{g\beta 1}^- = u_{g\beta}^+ P_{dc} / (u_{g\alpha}^+ u_{g\alpha}^+ + u_{g\beta}^+ u_{g\beta}^+) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $u_{g\alpha}^+$ 、 $u_{g\beta}^+$  和  $u_{g\alpha}^-$ 、 $u_{g\beta}^-$  分别为电网电压在  $\alpha$ 、 $\beta$  轴上的正序和负序分量;  $P_{dc}$  为 PWM-CSC<sub>1</sub> 向电网传输的有功功率的直流分量。

根据等功率变换矩阵的变换关系, 容易得出电网电压在  $\alpha\beta$  轴上的正、负序分量存在如下关系:

$$\begin{cases} \frac{du_{g\alpha}^+}{dt} = -\omega C u_{g\beta}^+ + \omega C u_{g\beta}^- \\ \frac{du_{g\beta}^+}{dt} = \omega C u_{g\alpha}^+ - \omega C u_{g\alpha}^- \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\omega$  为电网电压的角频率。将式(5)代入式(1), 可以得到  $s$  域的电压、电流关系表达式为:

$$\begin{cases} (LCs^2 + RCs + 1)i_{g\alpha 1} = i_{c\alpha 1} + \frac{\omega C}{\rho}(u_{g\beta}^+ - u_{g\beta}^-) \\ (LCs^2 + RCs + 1)i_{g\beta 1} = i_{c\beta 1} - \frac{\omega C}{\rho}(u_{g\alpha}^+ - u_{g\alpha}^-) \end{cases} \quad (6)$$

### 3 电网故障运行时混合直流输电系统最大有功功率计算表达式

由式(4)可知, 电网电流在  $\alpha\beta$  轴上分量的幅值大小与传输的有功功率  $P_{dc}$  成正比。电网发生故障时, 过大的有功功率给定值会导致电网电流参考值幅值过大, 从而导致过调制。为了避免过调制, 需要计算电网发生故障时能够输送的最大有功功率。电网发生故障时, PWM-CSC<sub>1</sub> 的三相调制度可表示为:

$$\begin{cases} m_a = m^+ \sin(\omega t + \theta^+) + m^- \sin(\omega t + \theta^-) \\ m_b = m^+ \sin\left(\omega t + \theta^+ - \frac{2\pi}{3}\right) + m^- \sin\left(\omega t + \theta^- + \frac{2\pi}{3}\right) \\ m_c = m^+ \sin\left(\omega t + \theta^+ + \frac{2\pi}{3}\right) + m^- \sin\left(\omega t + \theta^- - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $m^+$  和  $\theta^+$  分别为正序调制度的幅值和初相角;  $m^-$  和  $\theta^-$  分别为负序调制度的幅值和初相角。由于直流侧存在大电感, 电网发生故障时直流电流的谐波分量较小。LCC 侧采用定电流控制, 直流电流维持在额定值, 则换流器输出的电流可以表示为:

$$\begin{cases} i_{c\alpha 1}^+ = \sqrt{\frac{3}{2}} m^+ I_{dc} \sin(\omega t + \theta^+) \\ i_{c\beta 1}^+ = -\sqrt{\frac{3}{2}} m^+ I_{dc} \cos(\omega t + \theta^+) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} i_{c\alpha 1}^- = \sqrt{\frac{3}{2}} m^- I_{dc} \sin(\omega t + \theta^+) \\ i_{c\beta 1}^- = \sqrt{\frac{3}{2}} m^- I_{dc} \cos(\omega t + \theta^+) \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $i_{c\alpha 1}^+$ 、 $i_{c\beta 1}^+$  和  $i_{c\alpha 1}^-$ 、 $i_{c\beta 1}^-$  分别为 PWM-CSC<sub>1</sub> 输出电流在  $\alpha$ 、 $\beta$  轴上的正序和负序分量。将式(8)和式(9)代入式(7)可以得到三相调制度的幅值为:

$$\begin{cases} m_{ap}^2 = \frac{2}{3I_{dc}^2} \left[ (i_{c\alpha 1}^+)^2 + (i_{c\beta 1}^+)^2 + (i_{c\alpha 1}^-)^2 + (i_{c\beta 1}^-)^2 + 2i_{c\alpha 1}^+ i_{c\alpha 1}^- - 2i_{c\beta 1}^+ i_{c\beta 1}^- \right] \\ m_{bp}^2 = \frac{2}{3I_{dc}^2} \left[ (i_{c\alpha 1}^+)^2 + (i_{c\beta 1}^+)^2 + (i_{c\alpha 1}^-)^2 + (i_{c\beta 1}^-)^2 - 2i_{c\alpha 1}^+ i_{c\alpha 1}^- + 2i_{c\beta 1}^+ i_{c\beta 1}^- - \sqrt{3} i_{c\alpha 1}^+ i_{c\beta 1}^- - \sqrt{3} i_{c\beta 1}^+ i_{c\alpha 1}^- \right] \\ m_{cp}^2 = \frac{2}{3I_{dc}^2} \left[ (i_{c\alpha 1}^+)^2 + (i_{c\beta 1}^+)^2 + (i_{c\alpha 1}^-)^2 + (i_{c\beta 1}^-)^2 - 2i_{c\alpha 1}^+ i_{c\alpha 1}^- + 2i_{c\beta 1}^+ i_{c\beta 1}^- + \sqrt{3} i_{c\alpha 1}^+ i_{c\beta 1}^- + \sqrt{3} i_{c\beta 1}^+ i_{c\alpha 1}^- \right] \end{cases} \quad (10)$$

电网发生故障时调制策略切换为 SPWM, 调制度的幅值为 0.866。三相调制度的幅值需满足:

$$\max(m_{ap}, m_{bp}, m_{cp}) \leq 0.866 \quad (11)$$

由式(1)可知, 电网故障系统处于稳态后 PWM-CSC<sub>1</sub> 输出电流在  $\alpha\beta$  轴上的正、负序分量可以表示为:

$$\begin{cases} i_{c\alpha 1}^+ = (1 - \omega^2 LC)i_{g\alpha}^+ - \omega RC i_{g\beta}^+ - \frac{\omega C}{\rho} u_{g\beta}^+ \\ i_{c\beta 1}^+ = (1 - \omega^2 LC)i_{g\beta}^+ + \omega RC i_{g\alpha}^+ + \frac{\omega C}{\rho} u_{g\alpha}^+ \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} i_{c\alpha 1}^- = \frac{\omega C}{\rho} u_{g\beta}^- \\ i_{c\beta 1}^- = -\frac{\omega C}{\rho} u_{g\alpha}^- \end{cases} \quad (13)$$

将式(10)、式(12)和式(13)代入式(11)可得每相调制度幅值约束下的最大传输功率计算表达式为:

$$\begin{cases} P_{am} = \frac{-2C_3 K_3 + \sqrt{4C_3^2 K_3^2 - 4C_1 A_1}}{2C_1} \\ P_{bm} = \frac{-2A_2 + \sqrt{A_2^2 - 4C_1 A_3}}{2C_1} \\ P_{cm} = \frac{-2A_4 + \sqrt{A_4^2 - 4C_1 A_5}}{2C_1} \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $K_1$ — $K_3$ 、 $C_1$ — $C_3$  以及  $A_1$ — $A_5$  的具体表达式见附录。

由式(14)及附录可得, 控制系统实时采集逆变侧的电网电压并对电网电压进行正负序提取就可以计算出对应的 3 个最大功率值。取  $P_{am}$ 、 $P_{bm}$  和  $P_{cm}$  中的最小值作为功率  $P_{dc}$  的参考值, 即可实现混合直流输电系统中电网发生故障时的最大功率传输。

## 4 控制器参数设计

在  $\alpha\beta$  两相静止坐标系下,被控对象是交流量,采用 PR 控制器能够实现对交流信号稳态无静差控制,其传递函数为:

$$F_{PR}(s) = K_p + K_r s / (s^2 + \omega^2) \quad (15)$$

其中,  $K_p$  为控制器的比例系数;  $K_r$  为控制器的谐振系数。根据式(6), PWM-CSC<sub>1</sub> 在  $\alpha\beta$  两相静止坐标系下的电流参考值为:

$$\begin{cases} i_{\alpha 1} = F_{PR}(s) (i_{\alpha 1\_ref} - i_{\alpha 1}) - \frac{\omega C}{\rho} (u_{\beta}^+ - u_{\beta}^-) \\ i_{\beta 1} = F_{PR}(s) (i_{\beta 1\_ref} - i_{\beta 1}) + \frac{\omega C}{\rho} (u_{\alpha}^+ - u_{\alpha}^-) \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)代入式(6)中可以得到电网电流的闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_p s^2 + K_r s + K_p \omega^2}{LCs^4 + RCs^3 + b_2 s^2 + b_1 s + (K_p + 1)\omega^2} \quad (17)$$

其中,  $b_1 = K_r + \omega^2 RC$ ;  $b_2 = K_p + 1 + \omega^2 LC$ 。

由式(17)可以看出,电网电流的闭环传递函数为四阶系统。在本文仿真实验中,电感  $L=50$  mH, 电容  $C=40$   $\mu$ F, 电阻  $R=3$   $\Omega$ 。利用 MATLAB/SISO 设计工具可以对 PR 调节器参数进行整定,使系统具有期望的动态响应性能。PR 调节器参数整定结果为:  $K_p=45$ ,  $K_r=270$ 。电流闭环传递函数的波特图如图 3 所示,由图可知闭环传递函数带宽为 1 030 Hz, 低频段的幅值增益基本维持为 1 dB, 相角裕度为  $180^\circ$ 。

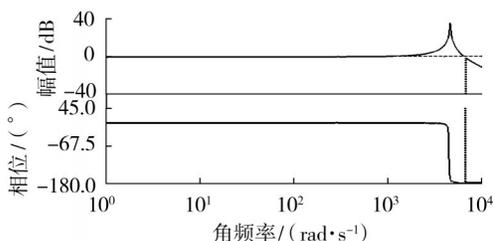


图 3 电流传递函数波特图

Fig.3 Bode diagram of current transfer function

## 5 电网故障运行时混合直流输电系统穿越策略

本文研究的混合直流输电系统整流侧采用了 LCC, 采用传统的定直流电流控制策略。直流电流的误差值经过 PI 调节器限幅输出后, 得到桥臂晶闸管的触发角。

根据前述分析, 逆变侧 PWM-CSC 采用定有功功率控制策略, 控制框图如图 4 所示。采用二阶积分器实现电网电压正负序的提取。积分器的表达式为:

$$\begin{cases} G_1(s) = 1.4 \omega s / (s^2 + 1.4 \omega s + \omega^2) \\ G_2(s) = 1.4 \omega^2 / (s^2 + 1.4 \omega s + \omega^2) \end{cases} \quad (18)$$

图 4 中的控制策略不仅适用于电网正常运行时 PWM-CSC 的控制, 同样可以实现电网故障运行时负

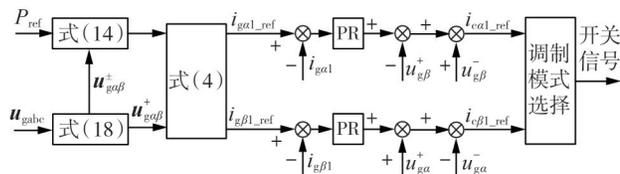


图 4 PWM-CSC<sub>1</sub> 控制框图

Fig.4 Block diagram of PWM-CSC<sub>1</sub> control

序电网电流的抑制和单位功率因数运行。电网正常运行时由调制度的幅值和相角经过 SHE 查表后生成 PWM-CSC<sub>1</sub> 的开关信号。调制度的幅值和相角计算表达式为:

$$\begin{cases} m = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{i_{\alpha 1\_ref}^2 + i_{\beta 1\_ref}^2}}{i_{dc}} \\ \theta = \arccos \frac{i_{\alpha 1\_ref} \sin(\omega t) - i_{\beta 1\_ref} \cos(\omega t)}{2\sqrt{i_{\alpha 1\_ref}^2 + i_{\beta 1\_ref}^2}} \end{cases} \quad (19)$$

电网发生故障时, 由于三相桥臂的参考波含有负序分量, 参考波并不是三相对称的正弦波, 采用 SHE 调制策略生成开关信号的过程复杂, 不易实现。此外, SHE 调制策略对电网故障的响应较慢。所以当检测到电网发生故障时, 调制策略切换为 SPWM; 电网故障消失后, 调制策略切换回 SHE。将 PWM-CSC<sub>1</sub> 的调制波滞后  $\pi/6$  得到 PWM-CSC<sub>2</sub> 的调制波。

## 6 仿真与实验分析

为了验证本文所提电网故障穿越策略的正确性和有效性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了图 1 所示的仿真电路模型。其中, 混合直流输电系统中的电路参数为: 额定功率为 1 250 MV·A; 额定直流电流为 3.125 kA; LCC 侧电网电压为 500 kV; LCC 侧变压器变比为 500 kV / 180 kV; LCC 直流侧电感为 0.6 H; PWM-CSC 侧电网电压为 500 kV; PWM-CSC 侧变压器变比为 500 kV / 150 kV; PWM-CSC 直流侧电感为 1.5 H; PWM-CSC 侧滤波电容为 40  $\mu$ F; PWM-CSC 侧滤波电感为 50 mH; 控制频率为 10 kHz; SHE 调制开关频率为 350 Hz; SPWM 开关频率为 550 Hz。

### 6.1 电网正常运行

电网正常运行情况下, 混合直流输电系统处于额定运行工况, LCC 侧电网向 PWM-CSC 侧电网输送 1 250 MW 的额定功率。仿真结果如图 5 所示 ( $P$ 、 $Q$  为标么值, 后同)。

LCC 侧通过滤波设备和无功补偿装置实现电网电流的谐波抑制和电网无功补偿, 电网电流波形谐波含量小, 见图 5(a)。电网正常运行时, 逆变侧 PWM-CSC 采用 SHE 调制, 器件的开关频率为 350 Hz。图 5(b) 为逆变侧电网电流波形, 由图可知, 电网电流的波形质量较好, 电流谐波畸变率 (THD) 为 0.8%。从图 5(c) 中可以看出, 混合直流输电系统向逆变侧电网输送的有功功率和无功功率分别为 0.98 p.u. 和 0, 逆

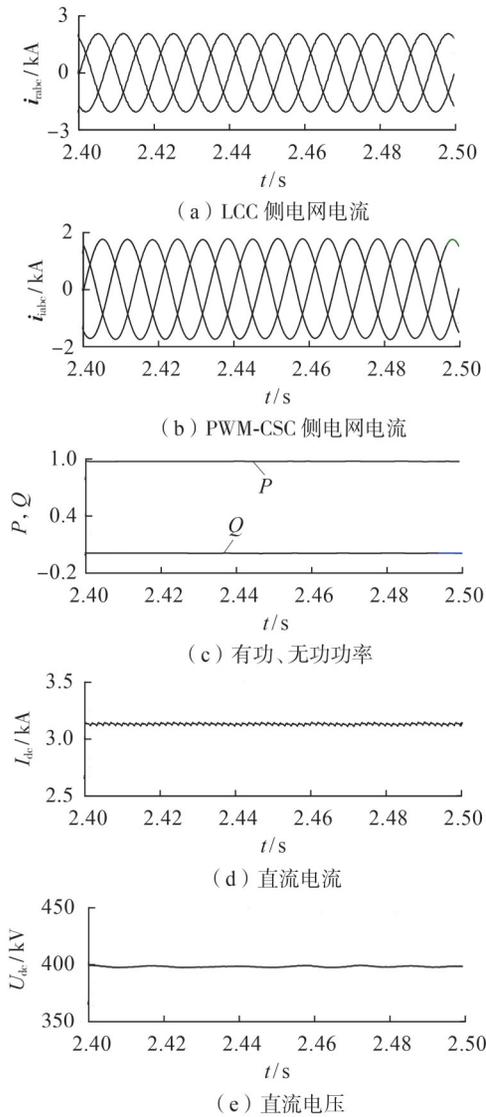


图5 电网正常运行情况下仿真结果

Fig.5 Simulative results of power grid under normal operation

变侧电网处于单位功率因数运行状态。混合直流输电系统直流电流和直流电压分别如图5(d)和图5(e)所示,从图中可以看出,直流电流维持在3.125 kA,直流电压维持在400 kV。仿真结果验证了本文所提控制策略在电网正常运行情况下的正确性和有效性。

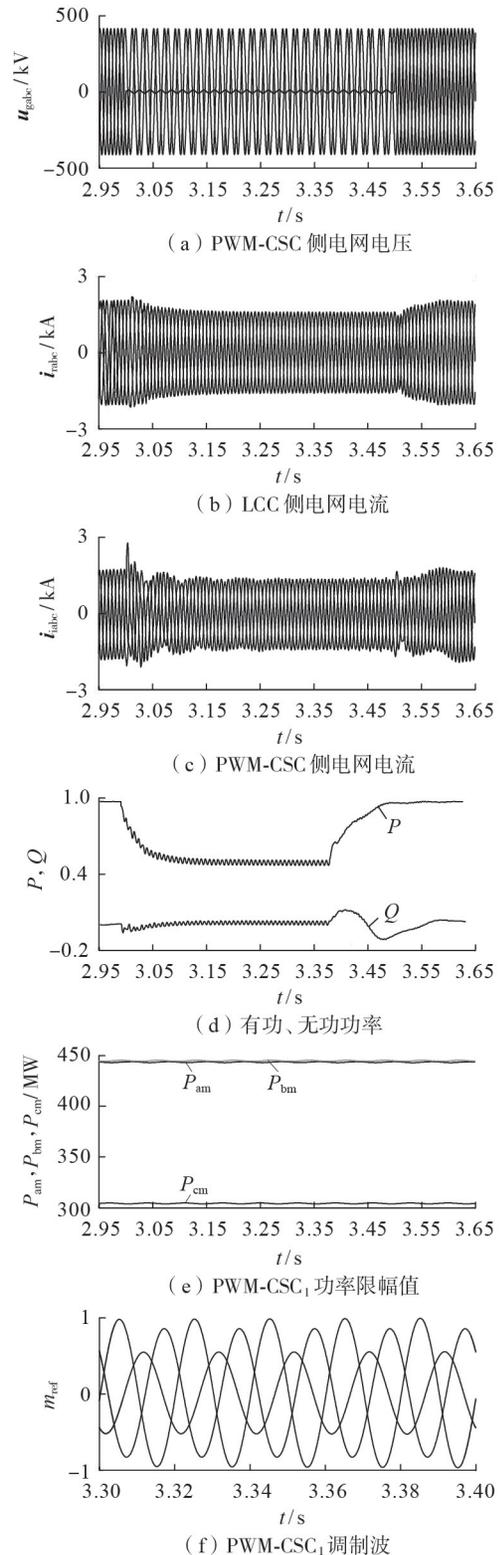
## 6.2 逆变侧电网单相对地短路故障运行

电网单相对地故障为输电系统中最常见的故障类型,所以本文对电网单相对地故障进行了仿真研究。仿真中混合直流输电系统在第3 s前处于额定运行工况,在第3 s时仿真中设置逆变侧电网发生单相对地故障,持续0.5 s后消失,故障期间逆变侧电网故障相对地电压降为0。由于采样、故障检测等延时,设置电网故障500  $\mu$ s后控制系统检测出故障并发生调制策略的切换。仿真结果如图6所示。

图6(a)为逆变侧电网相电压仿真波形图,由图可知电网发生单相对地故障后a相相电压幅值降为

0,b相和c相电网电压幅值相角维持不变。当控制系统检测到电网故障后,PWM-CSC的调制策略立即切换为SPWM,故障消失后重新切换回SHE调制。

LCC侧电网电流如图6(b)所示,由图可知逆变侧电网单相对地故障期间LCC侧电网电流波形质量较好,谐波含量低,电流幅值降低为1.6 kA,故障前后LCC侧电网电流无冲击。由图6(c)可看出电网



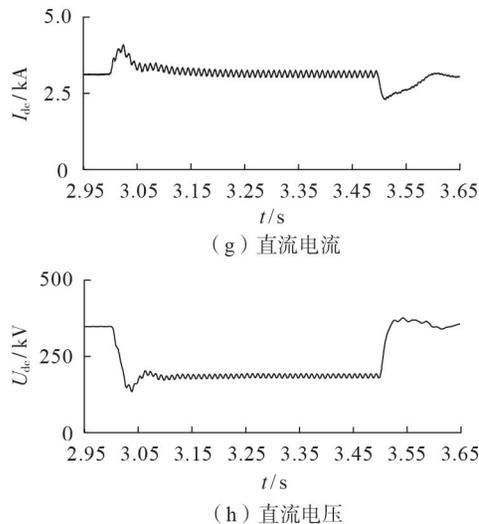


图 6 逆变侧电网单相对地仿真结果

Fig.6 Simulative results of inverter side grid under single-phase to ground fault

发生故障后电网电流经过 150 ms 到达稳态且最大冲击电流为 2.56 kA。故障期间 PWM-CSC 侧的电网电流维持三相对称,幅值降低为 1.4 kA,电流中不存在负序分量。由于载波频率为 550 Hz,电网电流谐波分量增加,THD 增加至 2.49%。故障消失后,电流在 100 ms 内迅速回到额定工况状态且无冲击。

逆变侧电网的有功功率和无功功率如图 6(d) 所示,从图中可以看出电网发生故障后系统传输的有功功率降低至 0.49 p.u. (612.5 MW),无功功率维持为 0,实现了故障期间逆变侧电网的单位功率因数运行。故障期间,有功功率和无功功率存在二倍频的波动。从图 6(e) 中可以看出,故障期间控制系统计算的 PWM-CSC<sub>1</sub> 3 个最大传输功率中最小的为 308 MW。双移相 PWM-CSC 总的理论传输功率为 616 MW。理论计算值与实际值相符。PWM-CSC<sub>1</sub> 的调制波如图 6(f) 所示,从图中可以看出,故障期间 a 相调制度的幅值近似为 1。

混合直流输电系统直流电流和直流电压分别如图 6(g) 和图 6(h) 所示。从图中可以看出,发生故障时直流电流的最大冲击电流为 4.1 kA,故障期间直流电流维持在额定值 3.125 kA。故障期间直流电压降低至 200 kV。逆变侧电网单相对地故障期间,直流电流和直流电压均存在二倍频分量。故障消失后,直流电压迅速恢复到额定值。

实验结果验证了本文提出的控制策略既可以抑制电网故障状态下逆变侧负序电网电流,又可以实现单位功率因数运行。故障消失后,系统能够迅速恢复到故障前状态。

## 7 结论

本文研究了一种整流侧采用 LCC、逆变侧采用

PWM-CSC 的混合直流输电系统。对电网故障状态下混合直流输电系统的数学模型进行了分析与研究,提出了一种基于两相静止坐标系下 PR 控制器的交流电网故障穿越策略并对控制器参数进行了设计。对电网故障状态下混合直流输电系统能够传输的最大功率进行了推导。在 PSCAD / EMTDC 中搭建了仿真模型。仿真结果表明所提控制策略不仅适用于电网正常运行状态,还适用于电网故障运行状态,实现了电网故障状态下负序电网电流抑制和单位功率因数运行。电网故障状态下最大传输功率与理论值基本一致。此外,本文提出的控制策略在较低的开关频率下具有较好的动态响应性能。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:36-48.
- [2] 张帆,徐鹏,贾秀芳,等. 混联式直流电网的协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):137-143. ZHANG Fan, XU Peng, JIA Xiufang, et al. Coordinated control strategy for hybrid HVDC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 137-143.
- [3] XUE Ying, ZHANG Xiaoping, YANG Conghuan. Elimination of commutation failures of LCC HVDC system with controllable capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 3289-3299.
- [4] 杨立敏,李耀华,李子欣,等. MMC 子模块故障下能量再平衡控制与安全运行域分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(4): 52-59. YANG Limin, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Energy rebalance control and safe operation region analysis of MMC with sub-module fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 52-59.
- [5] 武文,吴学智,荆龙,等. 基于虚拟电阻的 MMC 子模块故障容错环流抑制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(2): 161-168. WU Wen, WU Xuezhi, JING Long, et al. Circulating current suppressing strategy of modular multilevel converter in sub-module fault-tolerant control mode based on virtual resistor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 161-168.
- [6] 陈继开,孙川,李国庆,等. 双极 MMC-HVDC 系统直流故障特性研究[J]. 电工技术学报,2017,32(10): 53-60. CHEN Jikai, SUN Chuan, LI Guoqing, et al. Study on characteristics of DC fault in bipolar MMC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 53-60.
- [7] GIRALDO E, GARCES A. An adaptive control strategy for a wind energy conversion system based on PWM-CSC and PMSG[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 1446-1453.
- [8] 熊宇,李玉玲,廖鸿飞. 光伏并网电流源逆变器扰动电阻最大功率跟踪策略[J]. 电网技术,2014,38(12): 3300-3304. XIONG Yu, LI Yuling, LIAO Hongfei. A perturbing resistance maximum power point tracking strategy of current source inverter for grid-connected PV generation system[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3300-3304.
- [9] 郭强,刘和平,彭东林,等. 静止坐标系下电流型 PWM 整流器电流环控制策略研究及其参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2353-2361. GUO Qiang, LIU Heping, PENG Donglin, et al. A novel con-

- trol strategy and its parameter design of the current-loop in a stationary frame for current-source PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(15):2353-2361.
- [10] TORRES-OLGUIN R E,GARCES A,MOLINAS M,et al. Integration of offshore wind farm using a hybrid HVDC transmission composed by the PWM current-source converter and line-commutated converter[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai,China:IEEE,2012:978-981.
- [11] 薛英林,徐政,潘武略. 电流源型混合直流输电系统建模与仿真[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):98-103.  
XUE Yinglin,XU Zheng,PAN Wulue. Model and simulation of current source converter based HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(9):98-103.
- [12] 夏冰,李耀华,李子欣,等. 基于PWM-CSC的混合直流输电系统功率控制策略研究[J]. 电工电能新技术,2018,37(7):17-24.  
XIA Bing,LI Yaohua,LI Zixin,et al. Research on the control method of a PWM-CSC based hybrid HVDC transmission system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2018,37(7):17-24.
- [13] 常仲学,杨忠礼,宋国兵,等. 正负双序独立控制策略下的逆变型分布式电源不对称故障电流分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):44-51.  
CHANG Zhongxue,YANG Zhongli,SONG Guobing,et al. Analysis on asymmetric fault current characteristics of inverter interfaced distributed generator under positive-sequence and negative-sequence current respective control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1):44-51.
- [14] REYES M,RODRIGUEZ P,VAZQUEZ S,et al. Enhanced decoupled double synchronous reference frame current controller for unbalanced grid-voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(9):3934-3943.
- [15] MOHAMED Y A I. Mitigation of dynamic, unbalanced, and harmonic voltage disturbances using grid-connected inverters with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(9):3914-3924.
- [16] 郭小强,杨勇,张雪. 电网电压不平衡下电流源并网变换器控制[J]. 中国电机工程学报,2018,38(12):3671-3679.  
GUO Xiaoqiang,YANG Yong,ZHANG Xue. Control of grid-connected current source converter under unbalanced grid voltage[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(12):3671-3679.
- [17] XU Lie. Coordinated control of DFIG's rotor and grid side converters during network unbalance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(3):1041-1049.
- [18] WANG Zheng,WU Bin,XU Dewei,et al. DC-Link current ripple mitigation for current-source grid-connected converters under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(8):4967-4977.

#### 作者简介:



夏冰

夏冰(1991—),男,安徽宣城人,博士,主要研究方向为高压大功率换流器拓扑、电流源换流器以及混合直流输电技术(E-mail:xiabing91@yeah.net);

李耀华(1966—),男,河南正阳人,研究员,博士研究生导师,博士,主要研究方向为柔性直流输电技术、高速磁悬浮技术和直线电机牵引等(E-mail:yhli@mail.iee.ac.cn);

李子欣(1981—),男,河北保定人,研究员,博士研究生导师,博士,主要研究方向为柔性直流输电技术、电力电子变压器、高压大功率换流器等(E-mail:lzx@mail.iee.ac.cn)。

## Research of grid fault ride-through strategy for PWM-CSC based hybrid HVDC transmission system

XIA Bing<sup>1,2,3</sup>, LI Yaohua<sup>1,2,3</sup>, LI Zixin<sup>1,2,3</sup>, XU Fei<sup>1,2,3</sup>, GAO Fanqiang<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. College of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A hybrid HVDC (High Voltage Direct Current) transmission system adopting LCC (Line Commutated Converter) on rectifier side and PWM-CSC (Pulse Width Modulated-Current Source Converter) on inverter side is researched. To achieve low switching frequency and improve fault response performance, the SHE (Selective Harmonic Elimination) modulation strategy is adopted under normal state and the modulation method is switched to SPWM (Sinusoidal PWM) under grid fault state. The  $\alpha\beta$  stationary reference frame based mathematical model of the proposed system is deduced under grid fault state and a PR (Proportional Resonant) controller to eliminate the negative-sequence grid current and realize unity power factor operation is proposed. The PR parameters are designed. Besides, the calculation of the maximum transmission power under grid fault state is presented. Finally, a simulation model of 400 kV / 1 250 MW unipolar hybrid HVDC transmission system is built by PSCAD / EMTDC. The simulative results verify the correctness and effectiveness of the proposed control method.

**Key words:** hybrid HVDC power transmission; PWM-CSC; PWM; PR controller; maximum power transmission; negative-sequence grid current elimination; unity power factor operation