

DOI: 10.7667/PSPC160903

无换流变 MMC-HVDC 的零序电流影响机理分析与抑制

韩子娇¹, 高凯¹, 王朝斌², 董鹤楠¹, 田博文¹

(1. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006; 2. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 在交流电网发生不对称故障条件下, 存在零序大电流由无换流变 MMC-HVDC 系统在互联的交流电网之间流动, 对 MMC-HVDC 系统和交流电网都造成恶劣影响。根据 MMC 的平均值数学模型, 化简得到 MMC-HVDC 系统的零序等值网络, 推导出零序电压电流关系式, 从而解释了零序电流影响机理。采用基于 PR 环节的附加零序电流控制器, 能够有效抑制零序电流, 增强无换流变 MMC-HVDC 系统的故障穿越能力。PSCAD/EMTDC 仿真结果验证了上述理论分析的正确性和附加零序电流控制器的有效性。

关键词: MMC-HVDC; 无换流变; 零序电流; 影响机理

Zero sequence current effect mechanism analysis and suppression for the transformerless MMC-HVDC system

HAN Zijiao¹, GAO Kai¹, WANG Chaobin², DONG Henan¹, TIAN Bowen¹

(1. State Grid Liaoning Province Electric Power Company, Shenyang 110006, China;

2. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: There exists large zero sequence current flowing through interconnected AC grids by the path of transformerless MMC-HVDC system under AC grid unbalanced fault conditions, which has unfavorable influence in both the MMC-HVDC system and AC grids. Based on the MMC average model, the simplified zero sequence equivalent network of MMC-HVDC is derived in this paper, and the relation between the zero sequence voltage and current is deduced. The zero sequence current effect mechanism is consequently explained. An additional zero sequence current controller (ZSCC) based on the proportional-resonant module is adopted, which can effectively suppress zero sequence current and enhance the fault ride-through capability of the transformerless MMC-HVDC system. The accuracy of the above theoretical analysis and the effectiveness of ZSCC are validated by PSCAD/EMTDC simulation results.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Key Techniques Research and Demonstration Application of Flexible Loop-network Controller"(No. 2014GW-05).

Key words: MMC-HVDC; transformerless; zero sequence current; effect mechanism

0 引言

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 具有高度模块化结构, 易于扩展到任意电压等级, 实现冗余控制等优点, 并被广泛应用于柔性直流输电工程领域^[1]。

基于 MMC 的高压直流输电系统 (MMC-based High Voltage Direct Current Transmission, MMC-HVDC) 在交流电网发生不对称故障条件下的暂态响应特性

分析及其控制策略已有许多文献进行了研究与讨论^[2-8]。大多数文献中 MMC-HVDC 系统都采用 Y/Δ 接线的换流变压器与电网连接, 所以不考虑零序电流影响。文献[9-11]基于不对称故障条件下 MMC 桥臂瞬时功率分析, 指出了桥臂瞬时功率中 2 倍频正序、负序及零序波动项将引起 2 倍频正序、负序环流流动以及直流电压波动。为此, 文献[6]提出了基于子模块电容电压预估的最近电平调制和基于桥臂环流预估的直接环流控制的复合控制策略, 而文献[9]针对 2 倍频正序、负序环流及零序和直流电压波动各部分进行综合控制, 不论对称或不对称条件, 两种复合控制方法都能平稳消除环流与直流电压波

基金项目: 国家电网公司科技项目“柔性环网控制器关键技术研究及示范应用”(2014GW-05)

动,改善换流器暂态性能。为增强 MMC-HVDC 故障穿越能力,交流电流环主要采用两种形式: dq 坐标系下基于比例积分环节(Proportional-Integral controller, PI controller)和 $\alpha\beta$ 坐标系下基于比例谐振环节(Proportional-Resonant controller, PR controller)^[12-13]。

无换流变 MMC-HVDC 系统由于换流器拓扑提供了零序路径,使得零序电流在互联的交流系统间流动,并传递故障影响。因此,本文基于 MMC 的平均值数学模型和零序等值网络,推导出 MMC-HVDC 系统的零序电压电流关系式,着重解释零序电流影响机理。然后,采用基于 PR 环节的零序电流控制器(Zero Sequence Current Controller, ZSCC)进行零序电流抑制,通过 PSCAD 仿真验证了理论分析的正确性和附加 ZSCC 的有效性。

1 MMC 的平均值模型

MMC 一个桥臂由 N 个子模块组成,子模块采用半桥型拓扑。假设所有子模块电容电压均衡一致,子模块数量足够多,开关频率足够高,那么 MMC 的桥臂可以用可变电容,桥臂电抗 L 和等值电阻 R 来表示。MMC 的平均值模型如图 1 所示。

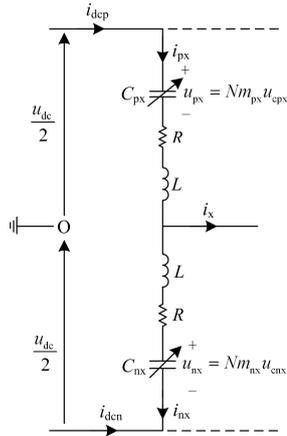


图 1 MMC 的平均值模型
Fig. 1 MMC average model

任意某 x 相上下桥臂中投入的子模块数量标么值 m_{px} 和 m_{nx} 可以用连续函数来表示为

$$\begin{cases} m_{px} = \frac{1}{2}(1 - v_x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}M \cos(\omega t) \\ m_{nx} = \frac{1}{2}(1 + v_x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}M \cos(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_x 为输出交流电动势基波标么值; M 为电压调制比; ω 为基波角频率。

上下桥臂电流 i_{px} 、 i_{nx} 分别为

$$\begin{cases} i_{px} = \frac{I_{dc}}{3} + \frac{i_x}{2} = \frac{I_{dc}}{3} + \frac{I_x}{2} \cos(\omega t + \varphi) \\ i_{nx} = \frac{I_{dc}}{3} - \frac{i_x}{2} = \frac{I_{dc}}{3} - \frac{I_x}{2} \cos(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{dc} 为直流电流平均值; i_x 为输出交流电流基波; I_x 、 φ 分别为 i_x 的幅值和初相位。

将式(1)与式(2)相乘,可得到流过上下桥臂子模块电容的平均电流 i_{cpx} 、 i_{cnx} , 即

$$\begin{cases} i_{cpx} = m_{px} i_{px} = \frac{1}{2} \left(\frac{I_{dc}}{3} + \frac{i_x}{2} - \frac{I_{dc}}{3} v_x - \frac{1}{2} v_x i_x \right) \\ i_{cnx} = m_{nx} i_{nx} = \frac{1}{2} \left(\frac{I_{dc}}{3} - \frac{i_x}{2} + \frac{I_{dc}}{3} v_x - \frac{1}{2} v_x i_x \right) \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)表示的桥臂电流基波项乘以子模块电容容抗,得到子模块电容电压波动基波项 $\Delta u_{cpx}^{(1)}$ 、

$\Delta u_{cnx}^{(1)}$ 分别为

$$\begin{cases} \Delta u_{cpx}^{(1)} = -jk \left(\frac{i_x}{4} - \frac{I_{dc}}{6} v_x \right) \\ \Delta u_{cnx}^{(1)} = -jk \left(-\frac{i_x}{4} + \frac{I_{dc}}{6} v_x \right) = -\Delta u_{cpx}^{(1)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $k = 1/\omega C$ 为子模块电容 C 的基波电抗; j 为 90° 旋转因子。

同理得到子模块电容电压波动 2 次谐波项 $\Delta u_{cpx}^{(2)}$ 、 $\Delta u_{cnx}^{(2)}$ 为

$$\Delta u_{cpx}^{(2)} = \Delta u_{cnx}^{(2)} = j \frac{kMI_x}{16} \cos(2\omega t + \varphi) \quad (5)$$

从而上下桥臂子模块电容电压 u_{cpx} 、 u_{cnx} 可以表示为

$$\begin{cases} u_{cpx} = u_{c0} + \Delta u_{cpx}^{(1)} + \Delta u_{cpx}^{(2)} \\ u_{cnx} = u_{c0} + \Delta u_{cnx}^{(1)} + \Delta u_{cnx}^{(2)} \end{cases} \quad (6)$$

式中, u_{c0} 为子模块电容电压平均值。

联立式(1)和式(6), 计算出上下桥臂输出电压 u_{px} 、 u_{nx} 分别为

$$\begin{cases} u_{px} = Nm_{px} u_{cpx} = Nm_{px} u_{c0} - \Delta u_{dm} + \Delta u_{com} \\ u_{nx} = Nm_{nx} u_{cnx} = Nm_{nx} u_{c0} + \Delta u_{dm} + \Delta u_{com} \end{cases} \quad (7)$$

式中, Δu_{dm} 、 Δu_{com} 分别为上下桥臂输出电压差模与共模的波动项, 且

$$\begin{cases} \Delta u_{dmx} = \frac{N}{2} \left(\Delta u_{cnx}^{(1)} + v_x \Delta u_{cnx}^{(2)} \right) \\ \Delta u_{comx} = \frac{N}{2} \left(\Delta u_{cnx}^{(2)} + v_x \Delta u_{cnx}^{(1)} \right) \end{cases} \quad (8)$$

将 Δu_{dmx} 展开得到

$$\Delta u_{dmx} = \frac{jkN}{2} \left[\left(\frac{1}{4} + \frac{M^2}{32} \right) i_x - \frac{I_{dc} v_x}{6} + \frac{M^2 I_x \cos(3\omega t + \varphi)}{32} \right] \quad (9)$$

将 Δu_{comx} 展开得到

$$\Delta u_{comx} = \frac{jNk}{2} \left[\frac{MI_x \cos \varphi}{8} - \frac{I_{dc} M^2}{12} + \frac{3MI_x \cos(2\omega t + \varphi)}{16} - \frac{I_{dc} M^2}{12} \cos(2\omega t) \right] \quad (10)$$

由式(9)可得零序差模电压波动项 Δu_{dm0} 为

$$\Delta u_{dm0} = \frac{jNk}{2} \left[\left(\frac{1}{4} + \frac{M^2}{32} \right) i_0 - \frac{I_{dc} v_0}{6} + \frac{M^2 I_x \cos(3\omega t + \varphi)}{32} \right] \quad (11)$$

式中, v_0, i_0 分别为 v_x, i_x 的零序分量。

式(11)表明 Δu_{dm0} 包含基波和 3 次谐波; 由于 3 次谐波系数较小, 故忽略 3 次谐波项, 则零序差模电压为

$$u_{dm0} = \frac{Nu_{c0}}{2} v_0 + \Delta u_{dm0} = j\gamma i_0 + \left(\frac{Nu_{c0}}{2} - \frac{jNkI_{dc}}{12} \right) v_0 \quad (12)$$

$$\text{式中, } \gamma = \frac{Nk}{2} \left(\frac{1}{4} + \frac{M^2}{32} \right).$$

2 零序电流分析

无换流变背靠背 MMC-HVDC 系统如图 2 所示, 设 MMC1 出口交流母线发生单相接地故障, 存在零序电流流通路径, 如图 3 所示。在故障点施加零序电压源 u_0 , 零序电流从故障点流出, 按红线和蓝线标注的路径穿过背靠背 MMC-HVDC 流入交流系统 2, 最后通过大地流回故障点。

作出零序单相等值电路如图 4 所示, 图中 R_{20}, L_{20} 分别为交流系统 2 的零序支路电阻电感; 虚线框标注的是 MMC-HVDC 的零序等值电路, 且零序等值电压 Δu_{d0} 为

$$\Delta u_{d0} = u_{dm02} - u_{dm01} = j2\gamma i_0 + \left(\frac{Nu_{c0}}{2} - \frac{jNkI_{dc}}{12} \right) v_{02} - \left(\frac{Nu_{c0}}{2} + \frac{jNkI_{dc}}{12} \right) v_{01} \quad (13)$$

式中, 下标 1、2 分别对应 MMC1 与 MMC2。

式(13)中零序电流衍生的零序电压项 $j2\gamma i_0$, 表示的物理含义是桥臂电容串的等值容抗为 2γ 。 Δu_{d0} 去除 $j2\gamma i_0$ 后, 余项实际与换流器的控制策略以及是

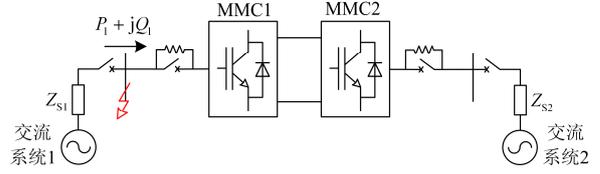


图 2 无换流变背靠背 MMC-HVDC 系统

Fig. 2 Back-to-back transformer-less MMC-HVDC system

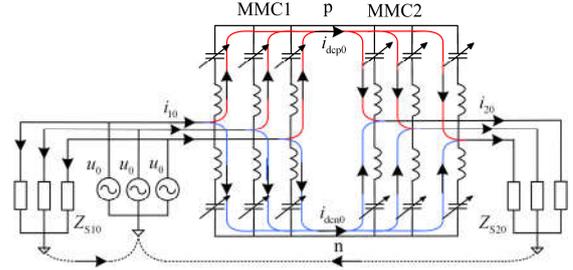


图 3 无换流变 MMC-HVDC 的零序电流流通路径

Fig. 3 Zero sequence current flow path through transformerless MMC-HVDC

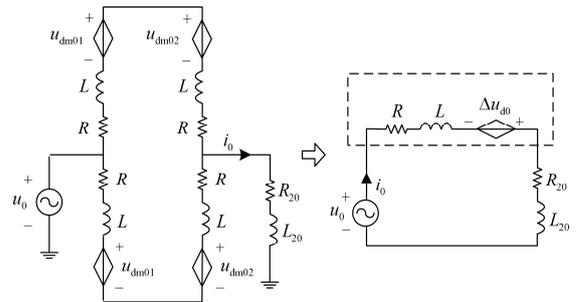


图 4 零序单相等值电路

Fig. 4 Zero sequence single-phase equivalent circuit

否出现过调制现象密切相关。当换流器采用正负双序电流控制, 未出现过调制时, 余项为零, 而如果出现过调制, 余项将不为零。

在图 4 所示等效电路中, 由 KVL 定律可得零序电压电流关系为

$$(L + L_{20}) \frac{di_0}{dt} + (R + R_{20}) i_0 = u_0 + \Delta u_{d0} \quad (14)$$

式(14)表明了零序电流 i_0 主要受交流系统零序等值阻抗、MMC 桥臂等值阻抗、MMC 桥臂输出零序电压以及电网零序电压影响。

为实现零序电流抑制, 可以采取两种手段: 一是增大交流系统零序等值阻抗, 如采用 Y/Δ 接线换流变压器, 零序回路阻抗变为无穷大; 二是通过控制 v_{01} 与 v_{02} 使得 Δu_{d0} 与零序电压 u_0 对消, 从而 i_0 减小为零。

3 零序电流抑制控制器

根据第 2 节的分析, 不对称故障情况下无换流变 MMC-HVDC 系统必须附加零序控制器来消除零序电流的影响。因此, 在正序电流控制器(Positive Sequence Current Controller, PSCC)、负序电流控制器(Negative Sequence Current Controller, NSCC)组合的基础上附加 ZSCC, 将三者输出各序电压参考波之和作为输出交流电压参考波, 构成正负零序电流控制器(Positive, Negative and Zero Sequence Current Controller, PN0 Current Controller), 其控制结构框图如图 5 所示。

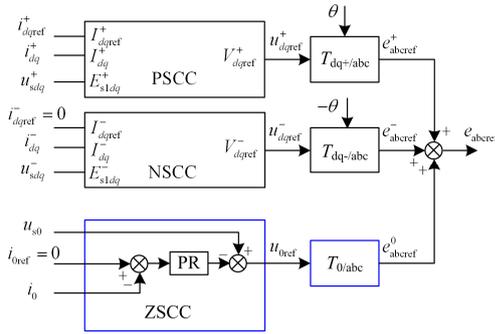


图 5 正负零序电流控制器

Fig. 5 PN0 sequence current controller

图 5 中, 附加 ZSCC 的输入误差为负的交流电流零序分量($-i_0$), 经过 PR 环节滤波后, 与电网电压零序分量前馈项 u_{s0} 相加输出 u_{0ref} , 随着桥臂输出 v_0 增大, Δu_{d0} 与 u_{s0} 发生对消, 使 i_0 减小, 便实现了零序电流快速抑制。其中, PR 环节的传递函数为

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_r^2} \quad (15)$$

式中: k_p , k_r 为比例系数; ω_c 为截止角频率; ω_r 为谐振角频率。

取 $k_p = 0.5$, $k_r = 5$, $\omega_c = 10 \text{ rad/s}$, $\omega_r = 314 \text{ rad/s}$, PR 环节的波特图如图 6 所示, 可以看出 PR 控制器

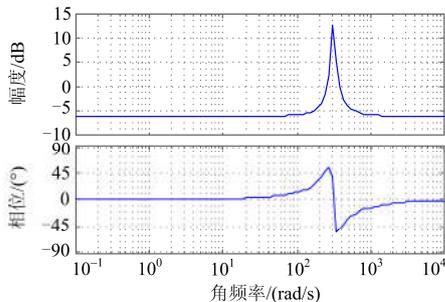


图 6 PR 环节传递函数的波特图

Fig. 6 Bode diagram of PR module transfer function

具有良好的选频能力, 通频带在 250 rad/s 至 400 rad/s , 在工频 50 Hz 处增益约为 12 dB 。

4 仿真分析

为验证上述理论分析的正确性和附加 ZSCC 的有效性, 在 PSCAD 中搭建了 31 电平无换流变背靠背 MMC-HVDC 仿真系统, 其主要参数见表 1。仿真系统中, MMC1 采用定有功功率与定无功功率控制, MMC2 采用定直流电压与定无功功率控制。电压电流参考方向见图 1 中标注。

表 1 仿真系统主要参数

Table 1 Main parameters of simulation system

项目	取值
额定功率/MW	600
电网电压/kV	220
直流电压/kV	400
各桥臂子模块数量/个	30
子模块电容额定电压/kV	13.33
桥臂电抗/mH	53
子模块电容/ μF	1000
桥臂等值电阻/ Ω	0.02
交流系统 1 等值阻抗/ Ω	$0.1+j4.7$
交流系统 2 等值阻抗/ Ω	$0.1+j4.7$

情况一: 采用正负序(PN)电流内环控制, MMC1 的有功、无功指令值 P_{ref} 、 Q_{ref} 都为 0。在 1.8 s 时刻, MMC1 出口交流母线发生单相接地故障, 持续时间 0.2 s 。

情况二: 采用正负零序(PN0)电流内环控制; MMC1 的 P_{ref} 在 1.5 s 从 0 变为 -0.5 p.u. 、 Q_{ref} 为 0。在 1.8 s 时刻, MMC1 出口交流母线发生单相接地故障, 持续时间 0.2 s 。

情况一仿真得到换流器出口交流电压电流, 桥臂差模电压, 桥臂电流和直流电压电流响应曲线, 如图 7 所示。从波形上看故障期间图 7(e)~图 7(k)所示的各电流曲线含有非常高的零序电流, 数值达到数 kA, 以及图 7(l)所示的直流电压最大值接近 500 kV , 远超出了换流器安全承受极限。各电流曲线反映出 MMC-HVDC 系统零序电流的分布规律见图 3 标注的红线和蓝线, 零序电流从交流系统 1 流入, 均匀流过各桥臂, 流向交流系统 2, 从而对 MMC-HVDC 系统和互联的交流电网造成恶劣影响。

分离出图 7(a)、图 7(c)和图 7(d)所示电网电压 u_{s1} 与桥臂差模电压 u_{dm1} 、 u_{dm2} 的零序分量分别为 $3u_0$ 、 $3u_{dm01}$ 与 $3u_{dm02}$, 如图 8(a)~图 8(c)所示, 三者合成得到零序电压 $3(u_0 + \Delta u_0)$, 如图 8(d)所示。根据式(14), 代入表 1 数据计算出零序阻抗为 $0.12+$

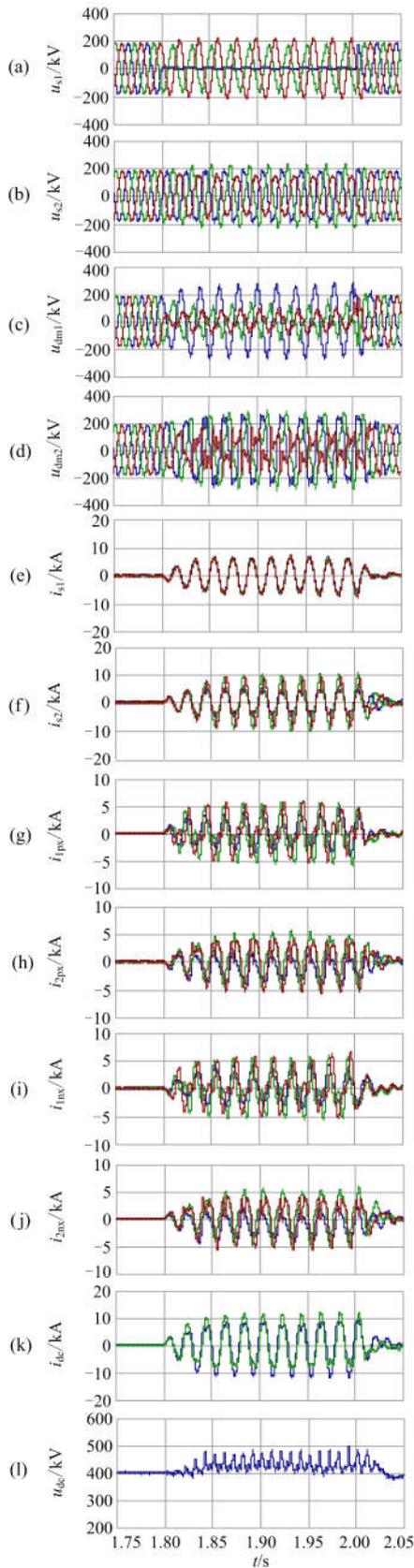


图 7 情况一的仿真结果

Fig. 7 Simulation results under the scenario I

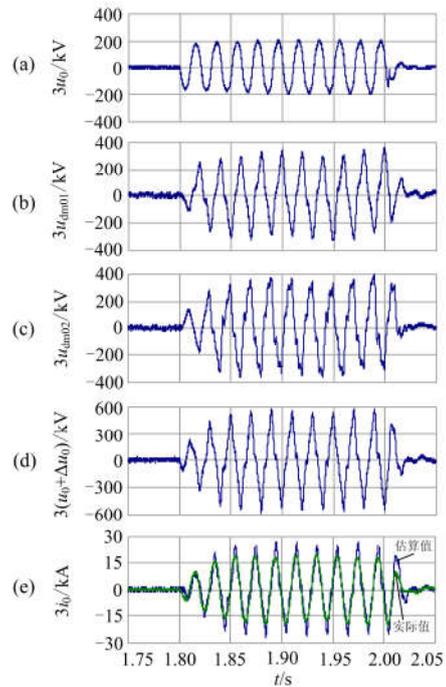


图 8 分离出的零序电压电流

Fig. 8 Separated zero sequence voltage and current

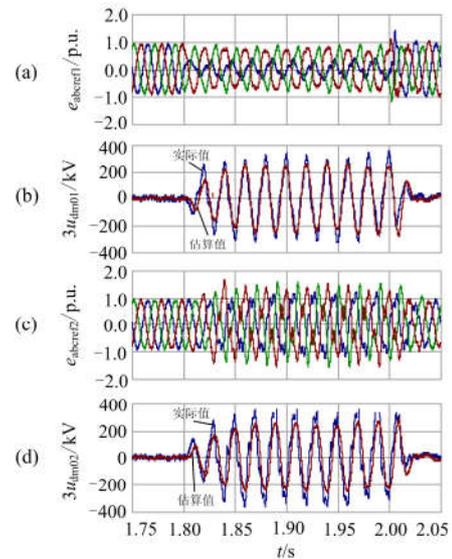


图 9 交流电压参考波及桥臂零序差模电压

Fig. 9 AC voltage reference wave and zero sequence arm differential mode voltage

$j21.35 \Omega$, 将 $3(u_0 + \Delta u_0)$ 除以 $j21.35$ 得到零序电流估算值, 如图 8(e)蓝线所示。分离出图 7(e)所示电网电流的零序分量如图 8(e)绿线所示。从图 8(e)可看出两条曲线基本重合, 由此证实了式(14)的正确性。

情况一中 MMC1 与 MMC2 的交流电压参考波及桥臂零序差模电压如图 9 所示。由图 9(a)、图(c)可知, 故障期间 MMC1 没有过调制, MMC2 处于过

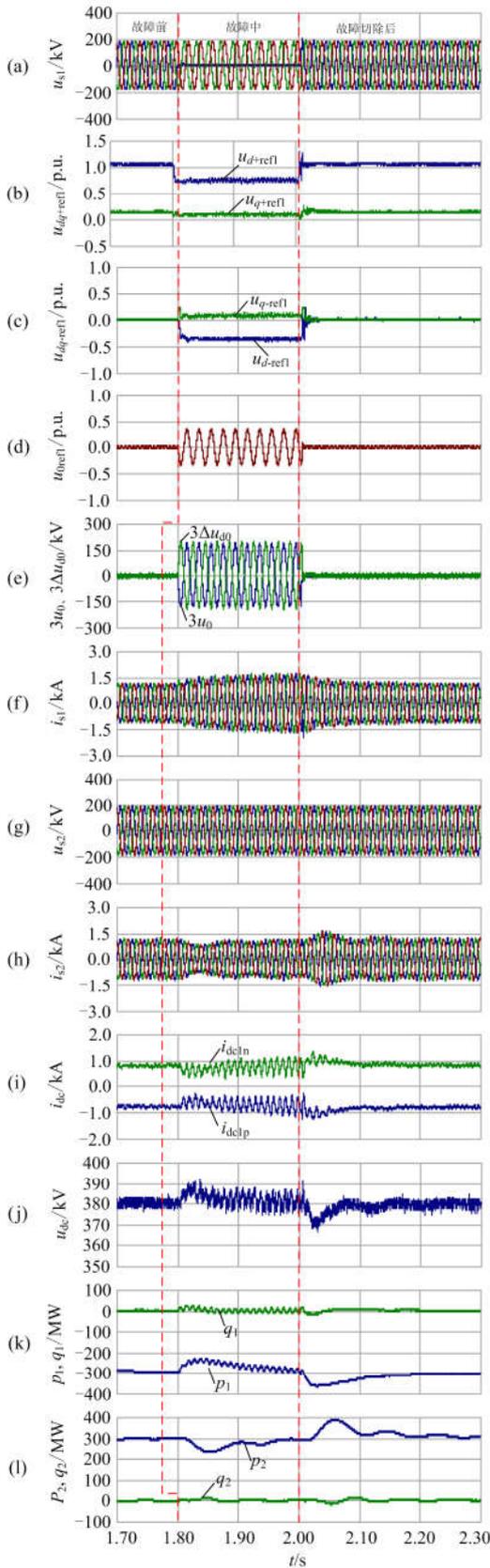


图 10 情况二的仿真结果

Fig. 10 Simulation results under the scenario II

调制状态。根据式(12), MMC1 桥臂零序差模电压估算值取 $-j\gamma i_0$, MMC2 桥臂零序差模电压估算值取 $j\gamma i_0$, 代入表 1 数据计算出 γ 为 13.145Ω , 然后作出图 9(b)、图 9(d)中的红色曲线。从图 9(b)可以看出实际值与估算值基本重合, 由此表明 MMC1 桥臂零序差模电压主要由零序电流衍生。从图 9(d)可以看出实际值与估算值的幅值及相位存在较大偏差, 偏差来源于 MMC2 过调制产生的零序电压。

情况二仿真得到 PN0 电流控制器的动作响应特性如图 10(b)~图 10(d)所示, 从图 10(d)可以看出 ZSCC 在故障期间快速输出零序参考电压波, 使得换流器桥臂输出零序电压 Δu_{d0} 与电网零序电压 u_0 对消。如图 10(e)所示, $3\Delta u_{d0}$ 与 $3u_0$ 镜像对称, 零序电压激励为 0, 所以从图 10(f)~图 10(i)中看到故障期间交直流电压电流曲线中的基波零序分量被有效抑制掉, 恢复到正常水平。同理在 NSCC 作用下, 负序电流被有效抑制掉, 使得换流器输出交流电流对称。

由于传输有功功率指令不变, 根据瞬时有功功率 $p = u_{sd}^+ i_{sd}^+$, u_{sd}^+ 与 i_{sd}^+ 呈反比例关系, 例如在故障期间, MMC1 侧 u_{sd}^+ 下降, 则 i_{sd}^+ 上升, 所以故障扰动会引起传输功率升降, 但快速回到稳态水平, 见图 10(k)、图 10(l)所示 MMC1 与 MMC2 与交流系统交换的功率。因此, 与采用 PN 电流控制比较, 采用 PN0 电流控制器, 无换流变 MMC-HVDC 系统能够平稳地实现故障穿越, 保证互联电网之间有功功率维持正常传输。

5 结论

本文揭示了无换流变 MMC-HVDC 系统在不对称故障条件下零序电流的影响机理, 得到结论如下。

1) 流过 MMC-HVDC 系统的零序电流由零序等值激励和零序等值阻抗决定: 零序等值激励包括交流电网零序电压和 MMC 桥臂输出零序电压, 后者与 MMC 控制策略是否过调制相关; 零序等值阻抗由 MMC 桥臂等值阻抗和交流系统等值阻抗组成。

2) 基于 PR 环节的附加 ZSCC, 能够快速跟踪交流零序电流, 使得换流器桥臂输出零序电压与电网零序电压对消, 零序电流被抑制为零, 并与 PN 电流控制协调, 保证无换流变 MMC-HVDC 系统平稳运行, 增强故障穿越能力。

参考文献

[1] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.

- Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [2] 李国庆, 谭龙, 王振浩, 等. 单相接地故障对换流器内部环流影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 1-7.
LI Guoqing, TAN Long, WANG Zhenhao, et al. Research of the influence on the circulation for AC system single-phase ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 1-7.
- [3] 王春义, 郝全睿, 高峰, 等. 三相串联 MMC 直流换流站在交流故障下的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 16-25.
WANG Chunyi, HAO Quanrui, GAO Feng, et al. Control of three-phase series-connected MMC based HVDC station under unbalanced grid conditions[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 16-25.
- [4] SAEEDIFARD M, IRAVANI R. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903-2912.
- [5] TU Qingrui, XU Zheng, CHANG Yong, et al. Suppressing DC voltage ripples of MMC-HVDC under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1332-1338.
- [6] 孔明, 汤广福, 贺之渊, 等. 不对称交流电网下 MMC-HVDC 输电系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 41-49.
KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. A control strategy for modular multilevel converter based HVDC of unbalanced ac systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 41-49.
- [7] 管敏渊, 徐政, 潘武略, 等. 电网故障时模块化多电平换流器型高压直流输电系统的分析与控制[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1238-1245.
GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Wulue, et al. Analysis and control of modular multilevel converter based HVDC transmission systems during grid faults[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1238-1245.
- [8] 胡兆庆, 田杰, 董云龙, 等. 模块化多电平柔性直流输电系统网侧故障控制策略及验证[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 71-75.
HU Zhaoqing, TIAN Jie, DONG Yunlong, et al. A control strategy for modular multilevel converter based flexible HVDC systems under system faults and its verification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 71-75.
- [9] MOON J, KIM C, PARK J, et al. Circulating current control in MMC under the unbalanced voltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1952-1959.
- [10] ZHOU Yuebin, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. Analysis and control of modular multilevel converters under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 1986-1995.
- [11] SHI Xiaojie, WANG Zhiqiang, LIU Bo, et al. Characteristic investigation and control of modular multilevel converter based HVDC system under single-line-to-ground fault conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 408-421.
- [12] 张浩, 吴金龙, 杨美娟, 等. 模块化多电平换流器新型桥臂环流抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 73-80.
ZHANG Hao, WU Jinlong, YANG Meijuan, et al. A novel bridge arm circulating current restraint strategy for modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 73-80.
- [13] 张建坡, 赵成勇, 敬华兵. 比例谐振控制器在 MMC-HVDC 控制中的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 53-62.
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, JING Huabing. Simulating research of proportional resonant controllers in MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 53-62.

收稿日期: 2016-06-18; 修回日期: 2016-09-08

作者简介:

韩子娇(1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电网规划与电力系统分析;

高凯(1972—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网规划与电力系统分析;

王朝斌(1990—), 男, 硕士, 研究方向为柔性直流输电技术。E-mail: 15948699059@163.com

(编辑 葛艳娜)