

DOI: 10.7667/PSPC150554

单相接地故障对换流器内部环流影响的研究

李国庆¹, 谭龙¹, 王振浩¹, 陈洪涛²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 松原供电公司, 吉林 松原 138000)

摘要: 模块化多电平换流器直流输电系统(Modular Multilevel Converter HVDC, MMC-HVDC)由于各相上下桥臂电压之和彼此不一致, 产生换流器内部环流。环流会造成换流器各相桥臂电流发生畸变, 所以抑制环流尤为重要。通常的环流抑制方法是在系统正常的运行情况下对换流器内部环流进行抑制。首先分析了正常情况下的环流抑制方法, 然后通过对交流系统单相接地故障进行分析。重点研究了故障条件下不平衡电流对内部环流及直流电流的影响, 设计了附加控制器对故障条件下环流抑制策略进行改进。通过 PSCAD/EMTDC 仿真实验, 验证了理论分析及改进措施的可行性。

关键词: 模块化多电平换流器直流输电系统; 单相接地故障; 内部环流; 抑制方法

Research of the influence on the circulation for AC system single-phase ground fault

LI Guoqing¹, TAN Long¹, WANG Zhenhao¹, CHEN Hongtao²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Songyuan Power Supply Company, Songyuan 138000, China)

Abstract: Because the upper and under bridge arm voltage of each phases are inconformity with each other based on MMC-HVDC, resulting in the internal circulation of converter. Circulation will cause each phase converter arm current distortion, so it is important to suppress the circulation. The usual method for inhibition circulation inhibits the internal circulation of converter under the normal operation condition. Firstly, it analyzes the method of inhibiting circulation under normal circumstances. Then, it focuses on the effects of unbalanced current under fault condition on the internal circulation and DC current through the AC system single-phase ground fault analysis and designs the additional controller to improve the traditional inhibition circulation strategy under fault conditions. Finally, it verifies the feasibility of theoretical analysis and improvement measures through the PSCAD/EMTDC simulation experiments.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377016).

Key words: modular multilevel converter HVDC (MMC-HVDC); single-phase ground fault; internal circulation; method of inhibiting

0 引言

近些年, 国内各大科研院所对直流输电系统开展了大量研究。随着研究的深入, 常规直流及柔性直流是解决未来能源变化和智能电网构成的有效技术手段, 并且具有良好的发展前景^[1-3]。基于模块化多电平电压源型换流器高压直流输电系统(MMC-HVDC) 相比于传统直流具有开关频率小、谐波含量小的优点, 因而得到了众多学者的广泛

认可^[4-5]。目前, 世界上已经投运的背靠背 MMC 工程有位于美国旧金山的 Tran Bay Cable 工程和位于中国上海的南汇风电场柔性直流输电示范工程, 投运的多端 MMC-HVDC 工程有南澳三端直流输电系统和舟山五段柔性直流输电系统^[6-8]。

许多学者和科研机构针对 MMC-HVDC 的控制策略、调制方法、均压策略等稳态运行控制策略进行了大量的研究^[9-18]。文献[9-10]介绍了一种电网故障条件下模块化多电平换流器通用动态模型, 设计了针对这种数学模型的解耦控制器以及外环控制器, 实现了在电网正常以及故障状态下对系统的有

效控制，但是并没有介绍故障对内部环流的影响。文献[11]介绍了换流器内部环流的产生原因以及一种抑制方法，但是并没有分析故障情况下不平衡电流对内部环流及其抑制方法的影响。文献[12]介绍了一种 2 倍频波动抑制方法。文献[13]介绍了柔性直流系统在网侧出现不平衡运行状态下的故障控制策略，对比了各种控制方式的优劣。文献[14]介绍了 MMC-HVDC 稳态运行控制策略。文献[15]介绍了子模块电容电压均衡策略。文献[16]分析了 MMC 中子模块电容器的充电特点，提出了子模块电容器的预充电策略。文献[17]研究了一种直流侧充电启动方法，并成功应用于南澳柔性直流输电工程。文献[18]介绍了一种带相内电流抑制控制器的均压控制方法，但是没有分析故障状态下其控制策略的有效性。对于 MMC-HVDC 来说，交流系统故障产生的过电流、过电压及三相不对称电流、电压都会影响到 MMC-HVDC 的控制策略、直流电压稳定、控制保护策略等各个方面。本文在现有研究的基础上，通过对称分量法对 MMC-HVDC 交流系统故障进行理论分析。着重研究了在交流系统单相接地故障条件下，三相不平衡电流对换流器内部环流以及直流电流的影响。提出改进的附加控制器，并通过 PSCAD/EMTDC 实时仿真对分析结果和抑制效果进行了验证。

1 系统正常情况下的环流产生和抑制方法

1.1 环流的产生

如图 1 所示， u_{vj} 和 $i_{vj}(j=a, b, c)$ 分别为系统交流侧相电压和线电流。 L_0 表示桥臂串联电抗的电感值， R_0 表示整个桥臂的损耗。 U_{dc} 表示直流电压， i_{dep} 、 i_{den} 表示正、负直流母线电流， $I_{dc} = (i_{dep} + i_{den})/2$ 。

u_{pj} 、 $u_{nj}(j=a, b, c)$ 表示各桥臂上、下电压，p 代表上桥臂，n 代表下桥臂，对应的桥臂电流分别为 i_{pj} 和 $i_{nj}(j=a, b, c)$ 。

根据参考文献[6]，以 a 相为例得出上、下桥臂电压、电流可以表示为

$$\begin{cases} u_{pa} = \frac{U_{dc}}{2} - e_a - u_{diffa} = \frac{U_{dc}}{2} (1 - k \sin \omega_0 t) - u_{diffa} \\ u_{na} = \frac{U_{dc}}{2} + e_a - u_{diffa} = \frac{U_{dc}}{2} (1 + k \sin \omega_0 t) - u_{diffa} \\ i_{pa} = i_{diffa} + \frac{i_{va}}{2} = \frac{I_{dc}}{3} [1 + m \sin(\omega_0 t + \psi)] + I_{2f} \sin(\omega_0 t + \psi_0) \\ i_{na} = i_{diffa} - \frac{i_{va}}{2} = \frac{I_{dc}}{3} [1 - m \sin(\omega_0 t + \psi)] + I_{2f} \sin(\omega_0 t + \psi_0) \end{cases} \quad (1)$$

u_{diffa} 称为 a 相内部不平衡电压降， i_{diffa} 称为 a 相内部电流。经过进一步推导可以得出流过上、下

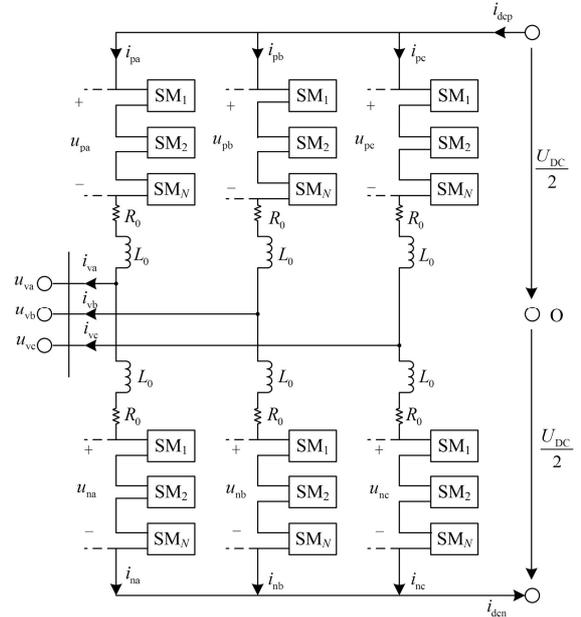


图 1 MMC 的等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of the MMC

桥臂的瞬时功率为

$$\begin{cases} P_{pa}(t) = \frac{U_{dc} I_{dc}}{6} [1 + m \sin(\omega_0 t + \psi)] (1 - k \sin \omega_0 t) + \\ \frac{U_{dc} I_{2f}}{2} \sin(\omega_0 t + \psi_0) (1 - k \sin \omega_0 t) \\ P_{na}(t) = \frac{U_{dc} I_{dc}}{6} [1 - m \sin(\omega_0 t + \psi)] (1 + k \sin \omega_0 t) + \\ \frac{U_{dc} I_{2f}}{2} \sin(\omega_0 t + \psi_0) (1 + k \sin \omega_0 t) \end{cases} \quad (2)$$

经积分得出相单元能量的交流分量为

$$\begin{aligned} W_{PM_AC}(t) = & \frac{P_s}{6\omega_0} \sin(2\omega_0 t + \psi) + \\ & \frac{U_{dc} I_{2f}}{2\omega_0} [k \cos \omega_0 t - \cos(\omega_0 t + \psi) + \\ & \frac{k}{4} \sin(2\omega_0 t + \psi)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中， P_s 为换流器的视在功率， $P_s = U_{dc} I_{dc} / \cos \psi$ 。而相单元中稳态能量为

$$W_{PM_DC} = 2N \cdot \frac{1}{2} C_0 U_C^2 \quad (4)$$

又由于相单元的总能量最终存储在各子模块的电容中，所以有

$$W_{PM}(t) = W_{PM_DC} + W_{PM_AC}(t) = \frac{1}{2} C_0 \sum_{i=0}^{2N} u_{Ci}^2(t) \quad (5)$$

因此，将上、下桥臂看成一个整体后，相单元总电压中必定含有两倍基波频率的分量，可以表示

为(a相)

$$u_{PM}(t) = U_{PM_DC} + U_{2f} \sin(2\omega_0 t + \psi) \quad (6)$$

式中: u_{PM} 为等效的相单元总电压, U_{PM_DC} 为其直流分量; U_{2f} 为激发环流的两倍频电压峰值。可见, 相单元电压可以由两个串联电压源进行等效, 一个代表相单元总电压中的直流分量, 另一个代表两倍频交流分量。图 2 是考虑环流后的 MMC 等效电路。

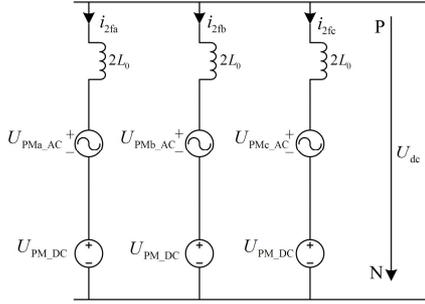


图 2 内部环流等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of internal circulation

$i_{2f}(j=a, b, c)$ 表示各相单元中的环流, 它是由于各相上、下桥臂电压之和和彼此不一致引起的, 且彼此滞后 120° , 在三相间按负序关系对称分配。它在 MMC 三相桥臂间流动, 对外部交流系统不产生任何影响。由于环流的存在, 会使换流器各相的桥臂电流发生畸变, 不仅仅是直流和基波电流的叠加, 还包含了以两倍频为主的环流分量。所以抑制环流尤为重要。

1.2 抑制环流的方法

根据图 1 得到式(7)。

$$\begin{cases} i_{pj} = i_{diffj} + \frac{i_{vj}}{2} \\ i_{nj} = i_{diffj} - \frac{i_{vj}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

利用旋转坐标变换, 可以将按 a-c-b 方向相互流动的内环流分离成两个直流量。依靠此原理设计环流抑制控制器, 结构框图如图 3 所示。首先将三相的桥臂电流 i_{pj} 和 $i_{nj}(j=a, b, c)$ 相加后除以 2, 得到三相内部电流 i_{diffj} , 经过两倍频负序坐标变换 $T_{acb/dq}$, 得到 MMC 内部环流的 dq 轴分量 i_{2fd} 和 i_{2fq} , 将它们与环流 dq 轴分量的参考值 i_{2fd_ref} 和 i_{2fq_ref} (取 $i_{2fd_ref}=i_{2fq_ref}=0$) 做差比较后, 经过比例积分调节器, 再引入电压前馈量 $2\omega_0 L_0 i_{2fd}$ 、 $2\omega_0 L_0 i_{2fq}$ 以消除 dq 轴耦合部分后, 可得到内部不平衡电压降的 dq 轴参考值 u_{diffd_ref} 和 u_{diffq_ref} 。最后经过逆变换 $T_{dq/acb}$ 得到负序三相的内部不平衡电压降参考值 $u_{diffj_ref}(j=a, b, c)$ 。其中:

$$T_{acb/dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix};$$

$$T_{dq/acb} = T_{acb/dq}^T。$$

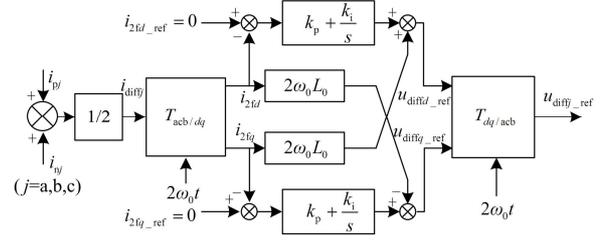


图 3 环流抑制控制器结构框图

Fig. 3 Block diagram of circulation suppression controller

2 单相接地故障对环流及直流电流的影响

2.1 交流系统单相接地故障分析

以交流系统发生 a 相接地短路故障为例, 根据图 4, 利用对称分量法得到式(8)。

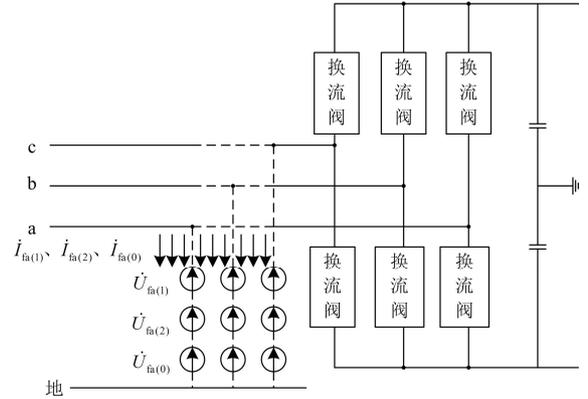


图 4 短路点电压、电流各序分量等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of short circuit voltage and current of each sequence component

$$\begin{cases} u_{vfa} = 0 \\ u_{vfb} = a^2 E_a - a^2 Z_{(1)} \dot{I}_{fa(1)} - a Z_{(2)} \dot{I}_{fa(2)} - Z_{(0)} \dot{I}_{fa(0)} \\ u_{vfc} = a E_a - a Z_{(1)} \dot{I}_{fa(1)} - a^2 Z_{(2)} \dot{I}_{fa(2)} - Z_{(0)} \dot{I}_{fa(0)} \end{cases} \quad (8)$$

式中, u_{vfa} 、 u_{vfb} 、 u_{vfc} 分别表示图 1 中 u_{va} 、 u_{vb} 、 u_{vc} 在故障情况下的值。 $\dot{U}_{fa(1)}$ 、 $\dot{U}_{fa(2)}$ 、 $\dot{U}_{fa(0)}$ 分别为 a 相对地的正、负、零序相电压。 $\dot{I}_{fa(1)}$ 、 $\dot{I}_{fa(2)}$ 、 $\dot{I}_{fa(0)}$ 分别为 a 相接地地点的正、负、零序电流。

由式(7)和图 1 得到

$$\begin{cases} i_{\text{dcp}} = i_{\text{pa}} + i_{\text{pb}} + i_{\text{pc}} = \\ i_{\text{diffa}} + i_{\text{diffb}} + i_{\text{diffc}} + \frac{i_{\text{va}}}{2} + \frac{i_{\text{vb}}}{2} + \frac{i_{\text{vc}}}{2} \\ i_{\text{dcn}} = i_{\text{na}} + i_{\text{nb}} + i_{\text{nc}} = \\ i_{\text{diffa}} + i_{\text{diffb}} + i_{\text{diffc}} - \left(\frac{i_{\text{va}}}{2} + \frac{i_{\text{vb}}}{2} + \frac{i_{\text{vc}}}{2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

在正常情况下三相线电流对称, $i_{\text{va}} + i_{\text{vb}} + i_{\text{vc}} = 0$ 。在 a 相接地短路时, 有 $i_{\text{va}} = 0$ 、 $i_{\text{va}} + i_{\text{vb}} + i_{\text{vc}} \neq 0$ 。

2.2 对环流的影响

两端 MMC-HVDC 系统外环控制器整流站一端为定直流电压控制和定无功功率控制。则根据直流电压参考值和无功功率参考值得到正序 d 、 q 轴电流参考值:

$$\begin{cases} i_d^* = k_{\text{pl}}(U_{\text{dc}}^* - U_{\text{dc}}) + k_{\text{il}} \int (U_{\text{dc}}^* - U_{\text{dc}}) dt \\ i_q^* = -Q^* / (1.5u_d) \end{cases} \quad (10)$$

逆变站一端为定有功功率控制和定无功功率控制。则根据有功功率和无功功率参考值得到正序 d 、 q 轴参考值。

$$\begin{cases} i_d^* = P^* / (1.5u_d) \\ i_q^* = -Q^* / (1.5u_d) \end{cases} \quad (11)$$

稳态条件下系统传输的有功功率为

$$P = U_{\text{dc}} i_{\text{dc}} = \frac{3}{2} u_d i_d \quad (12)$$

有 $i_{\text{dcp}} = i_{\text{dcn}} = i_{\text{dc}}$ 。

然而暂态情况下有

$$\begin{cases} P = P_0 + P_{s2} \sin(2\omega t) + P_{c2} \cos(2\omega t) \\ Q = Q_0 + Q_{s2} \sin(2\omega t) + Q_{c2} \cos(2\omega t) \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_{s2} \\ P_{c2} \\ Q_{s2} \\ Q_{c2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_d^+ & u_q^+ & u_d^- & u_q^- \\ u_q^+ & -u_d^+ & u_q^- & -u_d^- \\ u_q^- & -u_d^- & -u_q^+ & u_d^+ \\ u_d^- & u_q^- & u_d^+ & u_q^+ \\ -u_d^- & -u_q^- & u_d^+ & u_q^+ \\ u_q^- & -u_d^- & u_q^+ & -u_d^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} \quad (14)$$

则: $P = P_0 + P_{s2} \sin(2\omega t) + P_{c2} \cos(2\omega t) = U_{\text{dc}} i_{\text{dc}}$ 。

故发生单相接地故障后, 由于 2 倍工频有功功率的存在, 造成系统传输的有功功率增加。此时整流侧的定直流电压控制器仍维持直流电压不变。造成 i_{dc} 增大。

而从能量角度上来考虑, 不对称故障含有的两倍工频波动分量增加了以 2 倍工频为主的环流分量。

根据文献[6], 得到

$$\begin{cases} i_{\text{diffa}} = \frac{I_{\text{dc}}}{3} + I_{2f} \sin(2\omega_0 t + \psi_0) \\ i_{\text{diffb}} = \frac{I_{\text{dc}}}{3} + I_{2f} \sin(2\omega_0 t + \psi_0 + \frac{2\pi}{3}) \\ i_{\text{diffc}} = \frac{I_{\text{dc}}}{3} + I_{2f} \sin(2\omega_0 t + \psi_0 - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (15)$$

造成 i_{diffj} ($j=a, b, c$) 增大。

2.3 改进措施

故障分为永久故障和瞬时故障。永久故障只能切断线路、闭锁换流器, 防止破坏系统稳定性, 损坏设备。故在此处不进行讨论。对于瞬时故障, 其持续时间短(根据我国电力系统运行经验, 一般小于 0.4 s), 在其持续的时间内合理的控制方式可以增加系统故障穿越能力。

首先抑制二倍工频功率波动。根据前文所论:

$$\begin{cases} P_{s2} \sin(2\omega t) = \frac{3}{2} (-u_d^- i_q^+ + u_d^+ i_q^-) \sin(2\omega t) \\ P_{c2} \cos(2\omega t) = \frac{3}{2} (u_d^- i_d^+ + u_d^+ i_d^-) \cos(2\omega t) \end{cases} \quad (16)$$

由于为了防止子模块故障, 系统都会有冗余设计。故可将这部分多余的能量存在冗余部分。 $nP_c = P_s \cdot 2\sin(2\omega t) + P_c \cdot 2\cos(2\omega t)$, n 为冗余子模块数。根据功率预测设定的系统功率上下限, 以判断是否启用冗余模块抑制功率波动。

由式(9)相加可以得到

$$I_{\text{dc}}^* = \frac{i_{\text{dcp}} + i_{\text{dcn}}}{2} = i_{\text{diffa}} + i_{\text{diffb}} + i_{\text{diffc}} \quad (17)$$

再结合式(15)得到

$$\begin{cases} i_{\text{diffa}} - \frac{I_{\text{dc}}^*}{3} = I_{2f} \sin(2\omega_0 t + \psi_0) \\ i_{\text{diffb}} - \frac{I_{\text{dc}}^*}{3} = I_{2f} \sin(2\omega_0 t + \psi_0 + \frac{2\pi}{3}) \\ i_{\text{diffc}} - \frac{I_{\text{dc}}^*}{3} = I_{2f} \sin(2\omega_0 t + \psi_0 - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (18)$$

再进行坐标变换得到 i'_{2fd} 和 i'_{2fq} , 经过 PID 控制使 $i'_{2fd} = 0$ 、 $i'_{2fq} = 0$ 。改进的环流控制器结构框图如图 5 所示。

3 单相接地故障对环流影响仿真实验

本文在 PSCAD 实时仿真软件中利用平均值模型搭建 50 电平(设计冗余电平数为 5)双端 MMC-HVDC 系统模型。联接变压器一次侧绕组采用星型接线, 二次侧绕组采用三角型接线。子模块电容大小为 120 μF 、桥臂电抗为 0.053 H、交流电源为 35

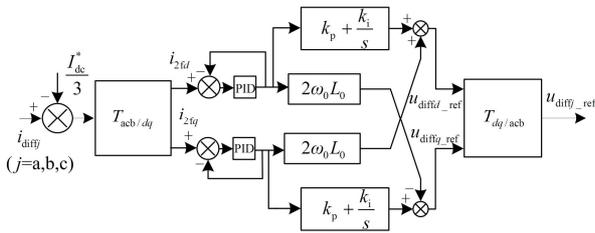
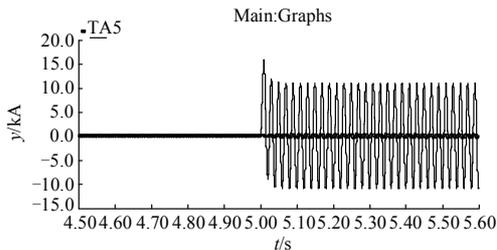


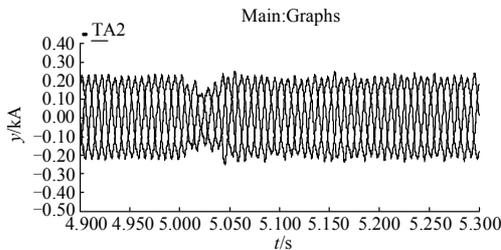
图 5 改进的环流抑制控制器结构框图

Fig. 5 Block diagram of circulation suppression controller of improvement

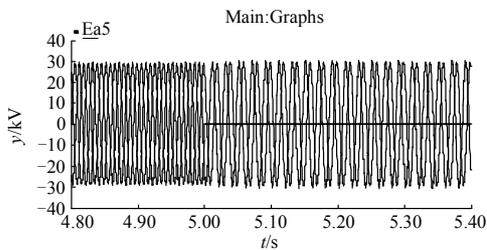
kV、变压器变比为 35 kV/30 kV。本模型采用最近电平逼近法的调制策略, 根据文献[6-7]对子模块均压策略及双闭环控制策略等对系统进行控制。仿真模型模拟运行情况: 整流站外环控制器采用定直流电压、定无功功率控制方式; 逆变站外环控制器采用定有功功率、定无功功率控制方式。传输有功功率为 9 MW, 传输无功功率为 0 Mvar, 直流电压参考值为 6 kV。故障设置在逆变侧交流线路 a 相接地故障。在系统开启 1 s 后系统稳定运行, 5 s 时刻故障发生, 为了直观观测故障发生时的参数特性, 本文设置故障持续时间为 3 s, 本文只截取时间轴的一部分 MMC-HVDC 系统的波形, 如图 6 所示。



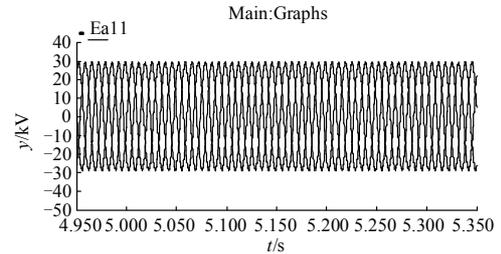
(a) 故障侧线电流



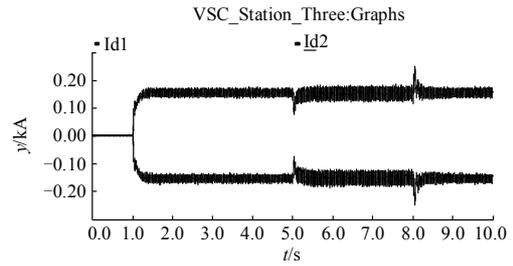
(b) 非故障侧线电流



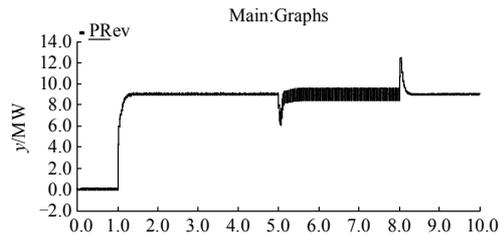
(c) 故障侧相电压



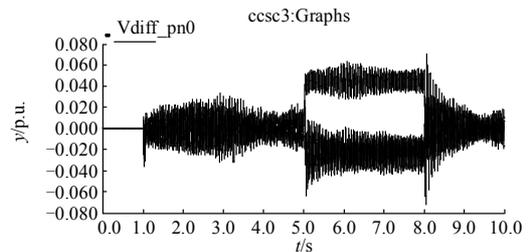
(d) 非故障侧相电压



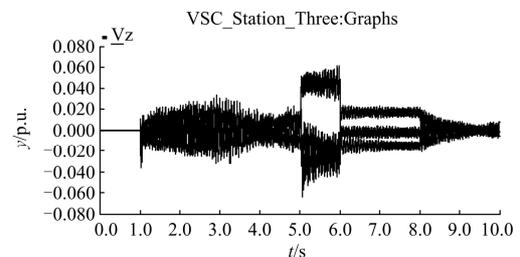
(e) 直流电流



(f) 系统有功功率



(g) 传统环流抑制后的环流



(h) 加入改进措施后的环流

图 6 逆变侧单相接地故障波形图

Fig. 6 Waveform diagram of rectifier single-phase ground fault

由图 6(a)和图 6(b)可以得出: 故障侧 a 相线电流急剧升高, 同时非故障侧线电流没有明显的变化。由图 6(c)和图 6(d)得到: 故障侧 a 相相电压减为零,

同时非故障侧没有明显的变化, 并且证明 MMC-HVDC 有一定的故障穿越能力。由图 6(e)得出: 故障发生后直流两极电流增大, 且幅值波动增大。由图 6(f)得出: 故障发生时, 起初由于发生单相接地短路, 有功功率明显下降, 后负序控制环节发生作用使故障情况下功率恢复。但是直流线路上传输的有功功率有明显的波动。图 6(g)显示出: 传统的换流器内部环流抑制方法在系统发生故障时, 会造成环流增大。图 6(h)显示出: 从 5 s 故障开始, 先经过传统抑制方法, 6 s 以后加入改进措施以后的环流抑制情况。由图可以明显看出, 改进措施减少了在系统发生故障时不平衡电流对换流器内部环流所造成的影响。

4 结论

本文对双端 MMC-HVDC 系统交流侧发生单相接地故障进行了重点分析, 通过 PSCAD 仿真实验对故障进行了仿真。研究故障前和故障后直流母线电流变化及环流的变化, 得出了以下结论:

(1) 当系统发生交流系统单相接地短路故障时, 由于不平衡电流及电压的存在, 造成换流站各相桥臂电压差值增大, 使得换流站内部环流增大, 同时造成直流母线电流波动增大。

(2) 提出了利用冗余子模块抑制瞬时故障下二倍工频能量。该方法设定系统有功功率参考值, 用多余有功功率为冗余子模块充电, 减少二倍工频能量。对环流的抑制起到了一定的作用。

(3) 提出了故障情况下的环流抑制方法。通过将上下两级直流电流相加, 确定直流电流参考量, 再进行环流抑制。此方法可以去除不平衡电流对环流抑制的影响。

参考文献

- [1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [2] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [3] 于洋, 孙学峰, 高鹏, 等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 148-154.
- [4] YU Yang, SUN Xuefeng, GAO Peng, et al. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 148-154.
- [5] TU Q R, XU Z, XU L. Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 2009-2017.
- [6] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 1-8.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Modeling of modular multi-level voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 1-8.
- [7] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [8] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [9] WESTERWELLER T, FRIEDRICH K, ARMONIES U, et al. Trans bay cable world's first HVDC system using multilevel voltage sourced converter[C] // Proceedings of CIGRE, Paris, France: CIGRE, 2010.
- [10] 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.
- [11] LI Yaping, YANG Shengchun. Research on PI controller tuning for VSC-HVDC system[C] // 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011, 16(1): 261-264.
- [12] 高航, 苏建徽, 汪晶晶, 等. 模块化多电平型换流器电容电压二倍频波动抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 116-122.
GAO Hang, SU Jianhui, WANG Jingjing, et al. Study on control strategy for suppressing double fundamental frequency fluctuation of capacitor voltage modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 116-122.
- [13] 高建, 苏建徽, 高航, 等. 模块化多电平换流器电容电压与环流的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 56-62.

- GAO Jian, SU Jianhui, GAO Hang, et al. Capacitor voltage and circulation current control strategy in multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 56-62.
- [13] 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 HVDC flexible systems under system faults and its verification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 71-75.
- [14] 赵岩, 胡学浩, 汤广福, 等. 模块化多电平变流器 HVDC 输电系统控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 35-42.
- ZHAO Yan, HU Xuehao, TANG Guangfu, et al. Control strategy of modular multilevel converters based HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 35-42.
- [15] 管敏渊, 徐政. MMC 型 VSC-HVDC 系统电容电压的优化平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 9-14.
- GUAN Minyuan, XU Zheng. Optimized capacitor voltage balancing control for modular multilevel converter based VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 9-14.
- [16] 任涛, 张杰, 唐剑钊, 等. MMC-HVDC 模块电容器预充电策略及仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 144-148.
- REN Tao, ZHANG Jie, TANG Jianzhao, et al. MMC-HVDC charging strategy research and simulation analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(5): 144-148.
- [17] 岳伟, 易荣, 张海涛, 等. 模块化多电平柔性直流输电系统的直流侧启动方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(10): 8-12.
- YUE Wei, YI Rong, ZHANG Haitao, et al. Research on DC starting method in the MMC-HVDC system[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(10): 8-12.
- [18] 梁寰宇, 苏建徽, 秦喆, 等. 基于 MMC 模块化多电平 STATCOM 的环流抑制均压控制策略研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 60-65.
- LIANG Huanyu, SU Jianhui, QIN Zhe, et al. Circulating current suppression and capacitance voltage balancing strategy for modular multilevel converter based STATCOM[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 60-65.

收稿日期: 2015-04-06; 修回日期: 2015-09-02

作者简介:

李国庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全性分析与控制, 电力系统继电保护和配电系统自动化等领域的理论与应用;

谭龙(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电; E-mail: 418337933@qq.com

王振浩(1964-), 男, 教授, 硕士生导师, 长期从事电力系统自动化科技研发及教学工作。E-mail: zhenhaowang@126.com

(编辑 魏小丽)