

文章编号:1005-0523(2018)01-0082-09

MMC-HVDC 系统阀侧故障特性分析

袁义生, 唐 喆

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对 MMC-HVDC 系统典型的阀侧单相对地短路故障进行建模和分析。忽略暂态过程中子模块投切时数量的不对称, 分别建立了阀侧母线单相接地短路时的交流侧等效电路和直流侧等效电路, 进而推导了故障状态的阀侧母线电压和电流、直流侧电压和电流的暂态公式, 分析了故障前后的这些电量变化以及对中性点电流、输入和输出、有功和无功功率的影响。以 ± 20 kV/43.2 MW 的上海柔性输电工程为例, 通过 Matlab/Simulink 仿真试验与建立的解析公式模型进行对比, 证明了暂态分析公式与电路仿真模型的分析结果一致, 最后清晰地阐明了 MMC-HVDC 系统单相对地短路的故障特性。

关键词: MMC-HVDC; 短路故障; 数学模型; 暂态过程; Matlab/Simulink

中图分类号: TP311

文献标志码: A

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)是 2002 年由德国国防军大学的 R Marquardt 提出的。由于近年电力电子技术和柔性直流输电技术的飞速发展, 基于 MMC 的柔性交流输电(MMC-HVDC)得到了研究和应用。我国于 2011 年在上海南汇风场投入运营了 MMC 结构的柔性直流输电试验工程。

现有文献对 MMC 柔性直流输电进行了详细的研究, 文献[1]利用均压策略消除 MMC 死区影响, 文献[2]通过提出一种新型控制策略来抑制 MMC 高压直流输电的环流, 文献[3]介绍了通过在控制端加上环流控制器来抑制 MMC-HVDC 正常运行时的环流。文献[4]通过调节 PI 控制器来使高压直流输电系统更好的运行。国内外学者在均压、环流、控制等方面取得了较多成果。由于现代电网应用的相当广泛, 且电力系统又非常庞大, 因此难免会发生故障, 而短路故障又是最常见的一种。故障发生的原因有很多, 比如: 元件损坏、气候条件恶劣、违规操作等等, 短路故障分为单相接地短路故障、两相短路故障、两相接地短路故障和三相短路故障^[5]。文献[6]指出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, 文献[7]指出交流系统故障对直流输电系统的影响及改进建议。文献[8]指出 MMC-HVDC 直流母线单极接地短路和双极短路故障后进行机理的分析, 并通过仿真来验证。文献 [9] 指出了 MMC-HVDC 在子模块发生故障后, 系统通过控制带故障运行。文献[10]阐述了通过固态变压器来保护高压输电电网的正常运行。

而现有文献[11-12]对 MMC-HVDC 交流线路故障的研究集中在简单的仿真分析, 对其故障前后的暂态特性定量分析的研究相对较少。本文在已有文献的基础上, 提出了可以忽略暂态过程中子模块投切时数量不对称的电路模型分析方法, 对阀侧母线的单相接地故障进行着重分析, 与直流侧发生故障不同, 交流侧发生故障不管是对输电端和电网还是对换流器和用户端造成的损害往往比直流侧造成的损害更大更直接, 对系统故障机理进行分析, 应用 Matlab/Simulink 仿真模型对理论分析的结果进行验证, 使得对阀侧母线故障有更加全面的认识, 对以后进行电网控制和保护提供重要参考。

1 MMC 基本原理和结构

MMC 的主回路结构如图 1 所示, 其中 O 为零点位参考点。图 1 中 SM 为子模块, 子模块中 T_1, T_2 为开关

收稿日期: 2017-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(51467005); 江西省重点研发计划(20171BBE50018)

作者简介: 袁义生(1974—), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力电子及电力传动。

管, D_1, D_2 为二极管, C_z 为电容。 U_{sa}, U_{sb}, U_{sc} 分别为阀侧 A、B、C 三相相电压; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 分别为阀侧 A、B、C 三相相电源; i_{pa}, i_{pb}, i_{pc} 分别为三相上桥臂电流; i_{na}, i_{nb}, i_{nc} 分别为三相下桥臂电流。 Y 为星型接法; D 为三角形接法。 N 个子模块级联并和一个电抗器串联成一个换流桥臂, 而六组换流桥臂构成一个三相换流器, 通常子模块是半桥子模块与一个电抗器 L_z 串联构成, 上下两个桥臂构成一个相单元。

MMC 可以以较低的开关频率得到品质较高的输出电压波形, 降低了换流器开关损耗及滤波器容量, 提高了换流器的效率和经济性, 通过调整子模块的串联个数便于实现所需的电压及功率等级, 这是 MMC 最大的优点。

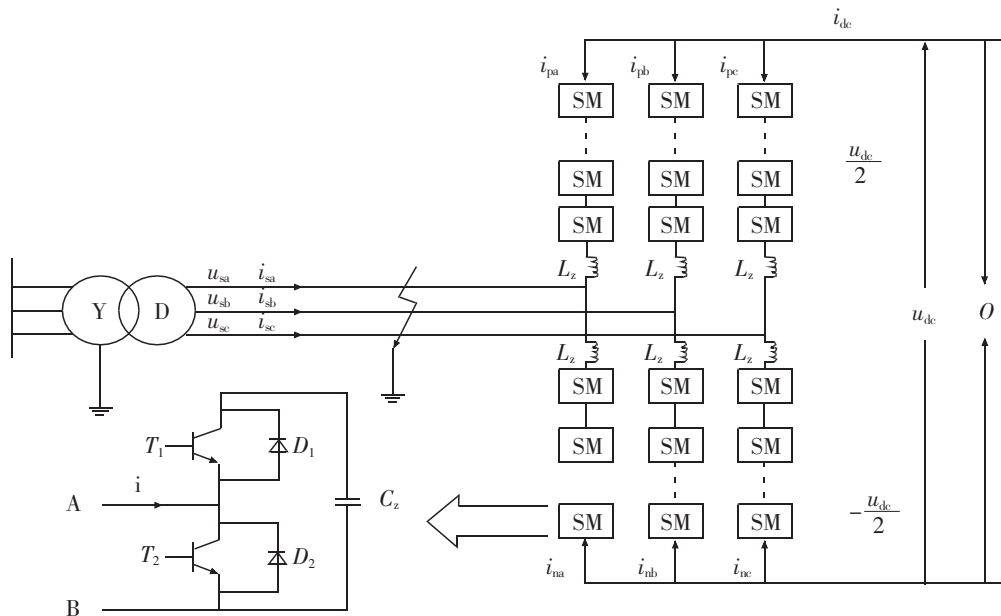


图 1 三相 MMC 拓扑图结构
Fig.1 Three-phase topology of MMC

2 单相接地故障分析

MMC-HVDC 在一次侧, 即阀侧发生短路故障对整个电力系统都是有很大影响的, 本文重点对常见的单相接地短路故障进行阐述, 不分析其他故障。

假设故障前电网运行状态为 $\dot{V}_A = U \angle 0^\circ$; $\dot{V}_B = U \angle -120^\circ$; $\dot{V}_C = U \angle 120^\circ$; 式中 $\dot{V}_A, \dot{V}_B, \dot{V}_C$ 分别为故障前三相阀侧相电压, U 表示阀侧交流母线电压的有效值^[13], 中性点电压 $\dot{V}_{N0} = 0$ 。

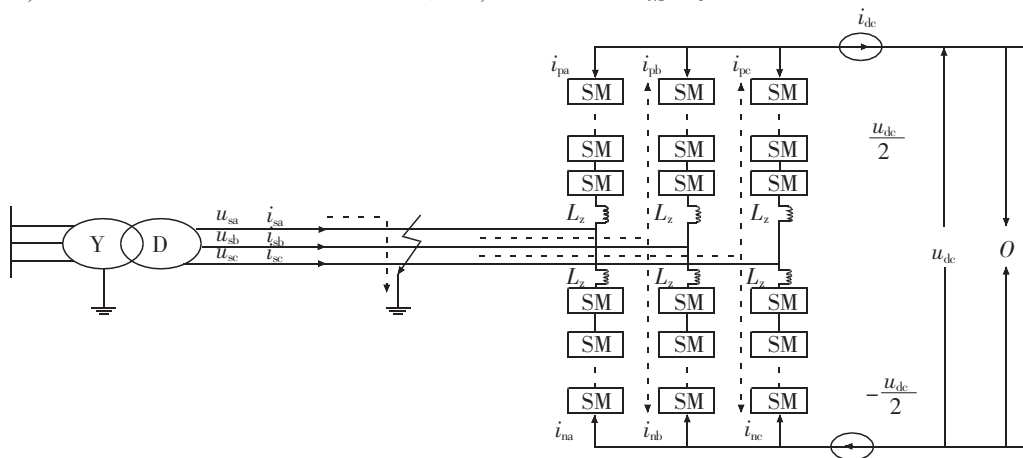


图 2 阀侧母线单相接地故障电流流通路径
Fig.2 Internal side bus single-phase ground fault current flow path

如图2所示,当阀侧发生单相接地短路,线路首端A相接地短路时,因而各相对地电压发生了变化,即 $\dot{V}_{A0} \neq 0$,各相电压变化情况如下:

故障相:A相对地电压为零,即

$$\dot{V}_{\dot{a}}=0 \quad (1)$$

因为 $\dot{V}_{\dot{a}}=\dot{V}_A=\dot{V}_{A0}$,所以 $-\dot{V}_a=\dot{V}_{A0}$

非故障相:B相 \dot{V}_B 变成 $\dot{V}_{\dot{b}}$,同理,C相 \dot{V}_C 变成 $\dot{V}_{\dot{c}}$,即

$$\dot{V}_{\dot{b}}=\sqrt{3} \dot{V}_A e^{-j150} \quad (2)$$

$$\dot{V}_{\dot{c}}=\sqrt{3} \dot{V}_A e^{j150} \quad (3)$$

式中: $\dot{V}_{\dot{a}}$ 为故障后A相相电压; $\dot{V}_{\dot{b}}$ 为故障后B相相电压; $\dot{V}_{\dot{c}}$ 为故障后C相相电压。

在中性点不接地的三相系统中,当单相接地后,虽然中性点电压不为零,但由于中性点发生了位移,相电压发生不对称(接地电压为0,未接地的B、C两相对地电压升高到相电压的 $\sqrt{3}$ 倍)。三相线电压之间仍然是对称的。

3 MMC-HVDC 交流侧等效数学模型

3.1 交流侧电路模型的建立

在对阀侧单相接地故障的交流侧电压进行分析后,需要建立换流器交流侧的等效电路及数学模型。分析交流侧信号时,直流侧作为直流电流源可以置零,可以得到交流侧等效电路^[14]如图3所示图3中 k 均为a、b、c; R_s, L_s 分别为阀侧电阻和电感。

由于MMC主要应用于高压大功率场合中,特别是柔性直流输电领域,此时 N (即子模块数)一般大于28个,交流电流总畸变率不到2%,因此可以忽略桥臂开关函数的高次谐波分量。不考虑环流抑制等附加调制的作用时,开关周期平均值可近似表示为

$$d_{kp} \approx \frac{1}{2} h_{kp} (1 - d_{k1}) = \frac{1}{2} h_{kp} [1 - D_1 \sin(\omega_0 t + \theta + \lambda_k)]$$

$$d_{kn} \approx \frac{1}{2} h_{kn} (1 - d_{k1}) = \frac{1}{2} h_{kn} [1 + D_1 \sin(\omega_0 t + \theta + \lambda_k)] \quad (4)$$

式中: d_{kp} 表示上桥臂开关周期的平均值; d_{kn} 表示下桥臂开关周期的平均值; d_{k1} 表示各子模块开关函数的平均值;同时, D_1 为基频电压系数, θ 为其初相角, λ_k 用于区分相单元, h_{kp} 和 h_{kn} 分别为直流电压与 k 相上(下)桥臂子模块电容电压之和的直流分量(基值)的比例系数。因为本文只考虑子模块完全对称的情况下,所以 h_{kp} 和 h_{kn} 相等,即

$$h_{kp} = h_{kn} = h \quad (5)$$

$$\lambda_k = \begin{cases} 0^\circ & k=a \\ -120^\circ & k=b \\ +120^\circ & k=c \end{cases} \quad (6)$$

在MMC-HVDC正常工作时子模块电容通常包括基频和二倍频波动分量。其中同相上下桥臂基频波动方向彼此相反,二倍频波动方向相同。因此,子模块电容电压可以表示为

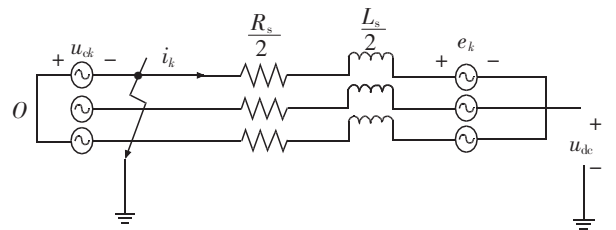


图3 交流侧等效电路
Fig.3 Equivalent circuit of AC side

$$\begin{cases} \overline{\sum} u_{kp} \approx \overline{\sum} u_{kp} [1-\alpha(\omega_0 t)+\beta(2\omega_0 t)] \\ \overline{\sum} u_{kn} \approx \overline{\sum} u_{kn} [1+\alpha(\omega_0 t)+\beta(2\omega_0 t)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\overline{\sum} u_{kp}$ 为桥臂电压之和的平均值; α 和 β 分别对应基频和二倍频波动,可分别表示为

$$\begin{cases} \alpha(\omega_0 t)=A \sin(\omega_0 t+\theta_\alpha+\lambda_k) \\ \beta(2\omega_0 t)=B \sin(2\omega_0 t+\theta_\beta+\lambda_k) \end{cases} \quad (8)$$

式中: A 、 B 分别对应基频和二倍频分量对应的幅值系数; θ_α 、 θ_β 则分别为二者的初相角。则 k 相交流输出电压可表示为

$$\begin{aligned} e_k = & \frac{1}{2} u_{dk} h [D_1 \sin(\omega_0 t+\theta+\lambda_k)+A \sin(\omega_0 t+\theta_\alpha+\lambda_k)] - \frac{1}{2} D_1 B \sin(\omega_0 t+\theta_\alpha+\lambda_k-90^\circ) - \frac{1}{2} D_1 B \cos(3\omega_0 t+\theta_\beta+\theta) = \\ & \frac{1}{2} u_{dk} M_1 \sin(\omega_0 t+\lambda_k+\theta^*) - \frac{1}{4} u_{dk} h D_1 B \cos(3\omega_0 t+\theta_\beta+\theta) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: M_1 为基频电压调制比; θ^* 为初相角。

3.2 阀侧交流母线电流的计算

尽管采用了抑制谐波环流的控制策略时,二倍频分量幅值远小于基频分量幅值。但由于子模块电容电压二倍频分量的存在,换流器输出电压将出现三倍频零序分量。该三倍频分量的存在会引起正负极直流电压的三倍频共模波动。

图 4 中 R_g 为接地电阻,接地电阻一般很小,可以忽略不计,由基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律可知。

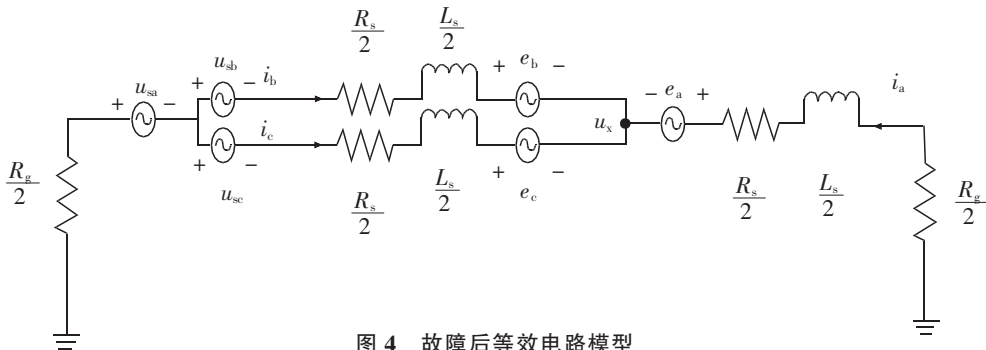


图 4 故障后等效电路模型
Fig.4 Equivalent circuit model after fault

故障前交流侧三相相电流为

$$\dot{i}_k = \frac{\dot{u}_{sk} - \dot{e}_k}{Z_L} \quad k=a, b, c \quad (10)$$

式中: $Z_L=0.5(R_s+j\omega_0 L_s)$, Z_L 为阀侧线路阻抗。

故障后,可根据节点电压法列方程组

$$\frac{\dot{u}_{sb} - \dot{u}_{sa} - \dot{e}_b - \dot{u}_x}{Z_L} + \frac{\dot{u}_{sc} - \dot{u}_{sa} - \dot{e}_c - \dot{u}_x}{Z_L} = -\frac{\dot{e}_a - \dot{u}_x}{Z_L} \quad (11)$$

化简得之

$$\dot{u}_x = -\sqrt{2} U \sin(\omega_0 t) \quad (12)$$

则故障相相电流为

$$\dot{i}_{a1} = \frac{\dot{u}_x - \dot{e}_a}{Z_L} = \frac{\dot{u}_{sa} - \dot{e}_a}{Z_L} = \dot{i}_a \quad (13)$$

非故障相相电流为

$$\dot{i}_{bl} = \frac{\dot{u}_{sb} - \dot{u}_{sa} - \dot{u}_x - \dot{e}_b}{Z_L} = \frac{\dot{u}_{sb} - \dot{e}_b}{Z_L} = \dot{i}_b \quad (14)$$

$$\dot{i}_{cl} = \frac{\dot{u}_{sc} - \dot{u}_{sa} - \dot{u}_x - \dot{e}_c}{Z_L} = \frac{\dot{u}_{sc} - \dot{e}_c}{Z_L} = \dot{i}_c \quad (15)$$

式中: $\dot{i}_a, \dot{i}_b, \dot{i}_c$ 分别表示各相故障前交流侧电流; $\dot{i}_{a1}, \dot{i}_{b1}, \dot{i}_{c1}$ 分别表示各相故障后交流侧电流。

由上式可以得出交流侧电流故障后与故障前一致。但实际上故障相电流还是有些许下降,而非故障相电流会有些许上升,这是因为子模块电容中包含了二倍频分量波动对交流侧相电流产生影响,但由于谐波环流的抑制策略下,对其的影响很小,在这里不详细讨论。

3.3 直流侧电压与电流的计算

在发生 A 相接地时 A 相电压 u_a 对地电压变为 0, 因此, 故障发生后的正负极对假想中性点的电压变为

$$\begin{cases} u_{po} = u_{pa} - u_a = \frac{u_{dc}}{2} - \sqrt{2} u \sin \omega t \\ u_{no} = u_{na} - u_a = -\frac{u_{dc}}{2} - \sqrt{2} u \sin \omega t \end{cases} \quad (16)$$

式中: u_{po} 为直流侧正母线电压; u_{no} 表示直流侧负母线电压; u_{dc} 表示直流侧电压, 由于阀侧发生故障是引起交流量发生变化, 对直流分量并无影响。

同理可知, 直流侧的正负母线电流也可以求出, 式中 i_{dcl} 表示直流侧电流的直流分量, i_{dca} 表示直流侧电流的交流分量即

$$i_{dc} = i_{dcl} + i_{dca} \quad (17)$$

根据文献[15-16]中的 MMC 平均值模型可知直流系统的等值电路如图 5 所示。

在 MMC-HVDC 中整流侧直流额定电压一般略大于逆变侧直流额定电压, 为了便于计算, 在这里看作是相等的, 如图 5 所示。由基尔霍夫电压定律得知

$$\begin{cases} i_{po} = \frac{u_{po}}{R_d + j(\omega_0 L_{dr} - \frac{1}{2\omega_0 C_d})} \\ i_{no} = \frac{u_{no}}{R_d + j(\omega_0 L_{di} - \frac{1}{2\omega_0 C_d})} \end{cases} \quad (18)$$

式中: i_{po} 为直流侧正母线电流; i_{no} 为直流侧负母线电流; R_d 为直流侧线路电阻和接地电阻; L_{dr} 和 C_d 分别为为直流侧线路电感和电容。

在电力系统中中性点电流是一个重要的参考指标, 中性点电流是指由于系统故障所引发的电流, 如果电流过大, 会危及对地绝缘, 所以计算出直流侧的中性点电流至关重要。因此可以得出

$$i_o = \frac{u_{dc}}{2} \times \frac{2}{R_g} = \frac{u_{dc}}{R_g} \quad (19)$$

式中: R_g 为中性点电阻。

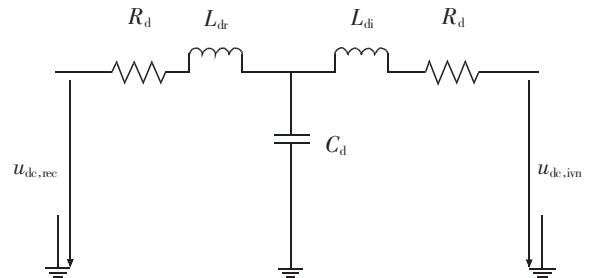


图 5 直流侧等效电路模型

Fig.5 Equivalent circuit model of DC-side

注: 图中 U_{rec} 为整流侧直流额定电压, U_{inv} 为逆变侧直流额定电压, L_{dr} 为整流侧平波电抗器的电抗, L_{di} 为逆变侧平波电抗器的电抗, R_d 为直流系统等值电阻; C_d 为直流输电线路的等值电容。

4 单相接地故障仿真及计算

4.1 仿真模型参数

本文依托上海柔性交流输电工程,在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建 MMC-HVDC 仿真系统模型。联结变压器、交流系统、MMC、直流系统等参数如表所示。联结变压器网侧绕组采用星型接法,阀侧绕组采用三角型接法。MMC 采用基于最近电平逼近控制的正弦脉宽调制策略对子模块电容电压、桥臂环流以及阀侧负序电压进行控制。而现有文献中大多采用载波移相正弦脉宽调制,本文以此比较这两种控制方法下单相接地故障得出的波形。

4.2 单相接地故障仿真的计算过程

根据式(1)~式(3)可知,故障后阀侧交流母线电压中 A 相电压为 0 V,而 B 相电压为 $20\ 000\sqrt{3}\sin(\omega_0 t-150^\circ)$ V,C 相电压为 $20\ 000\sqrt{3}\sin(\omega_0 t+150^\circ)$ V;根据式(13)~式(15)可知,故障后阀侧交流母线电流几乎变,会有些许变化;根据式(12),式(16)可知,故障后直流侧正母线电压为 $20\ 000+20\ 000\sin(\omega_0 t-180^\circ)$ V,负母线电压为 $-20\ 000+20\ 000\sin(\omega_0 t-180^\circ)$ V;根据式(17),式(18)可知,故障后直流侧正母线电流为 $200+200\sin(\omega_0 t-180^\circ)$ V,负母线电流为 $-200+200\sin(\omega_0 t-180^\circ)$ V;根据式(19)可知,故障后中性点电流为 $20\ 000\sin(\omega_0 t-180^\circ)=400\sin(\omega_0 t-180^\circ)$ A。

4.3 单相接地故障仿真模型

仿真模型运行工况为:MMC 采用定有功功率和定无功功率控制。直流电压参考值为 ± 20 kV,无功功率为 0 Mvar,直流电流参考值为 ± 200 A,有功功率为 43.2 MW。故障设置为 MMC 阀侧交流母线 A 相接地故障,如图 6 所示。在系统稳定运行后,0.2 s 时刻触发故障,0.4 s 时刻恢复正常。MMC-HVDC 系统的电压、电流波形如图 6 所示。

图 6 中,实线为本文采用的最近电平逼近控制,而虚线为采用载波移相正弦脉宽调制控制方法,将两种方法得出的结果进行比较。输入电压与电流并无不同,但在故障发生后直流侧的电压与电流有少许出入,接地电流也有出入,而有功功率与无功功率也完全相同。

4.4 仿真与理论值的对比

阀侧 A 相接地故障发生后,引起阀侧和直流侧对地参考电位变化。如图 6(a)所示,交流侧三相电压峰值为 20 kV,故障后,A 相电压为 0,而 B、C 两相电压的峰值为 34.6 kV,大概是原来的倍,相位分别为 -150° 和 150° ,由图 6(a)可以看出两种控制方法得到的结果与以上得出的结论相同;如图 6(b)所示,交流侧电流在故障前后几乎不变,而故障相的电流会因子模块的电容电压中的二倍频分量波动而有些许的减小,同时非故障相也会因此有些许增大,由图 6(b)可以看出两种控制方法得到的结果与以上得出的结论相同;如图 6(c)所示,采用最近电平逼近控制法故障后送端出口直流侧电压出现了基频分量其波动幅度约为 19.8 kV,而采用载波移相正弦脉宽调制法得到的结果为 18.9 kV,且相位都为 -180° ,与理论计算的稳态直流电压波动幅值 20 kV,相位也为 -180° 基本符合;如图 6(d)所示,采用最近电平逼近控制法故障后送端直流输电线路电流也出现了基频分量其波动幅值约为 194 A,而采用载波移相正弦脉宽调制法得到的结果为 185 A,且相位都为 -180° ,与理论计算的直流侧电流幅值 200 A 基本符合,相位也为 -180° 基本符合;如图 6 中(e)所

表 1 MMC-HVDC 模型参数设置
Tab.1 Model parameter of the MMC-HVDC

模型区域	模型名称	模型参数
交流系统	模型名称交流电压/kV	20
	有功功率/MW	43.2
变压器	联结组别	YN/D
	变比/(kV/kV)	30/20
MMC	桥臂电感/mH	10
	子模块电容/mF	100
	子模块电容电压/kV	1.3
	子模块数	30
直流系统	直流电压/kV	40
	直流线路等值电阻/ Ω	1
	电感/mH	20
	电容/ μ F	15
	中性点电阻/ Ω	100

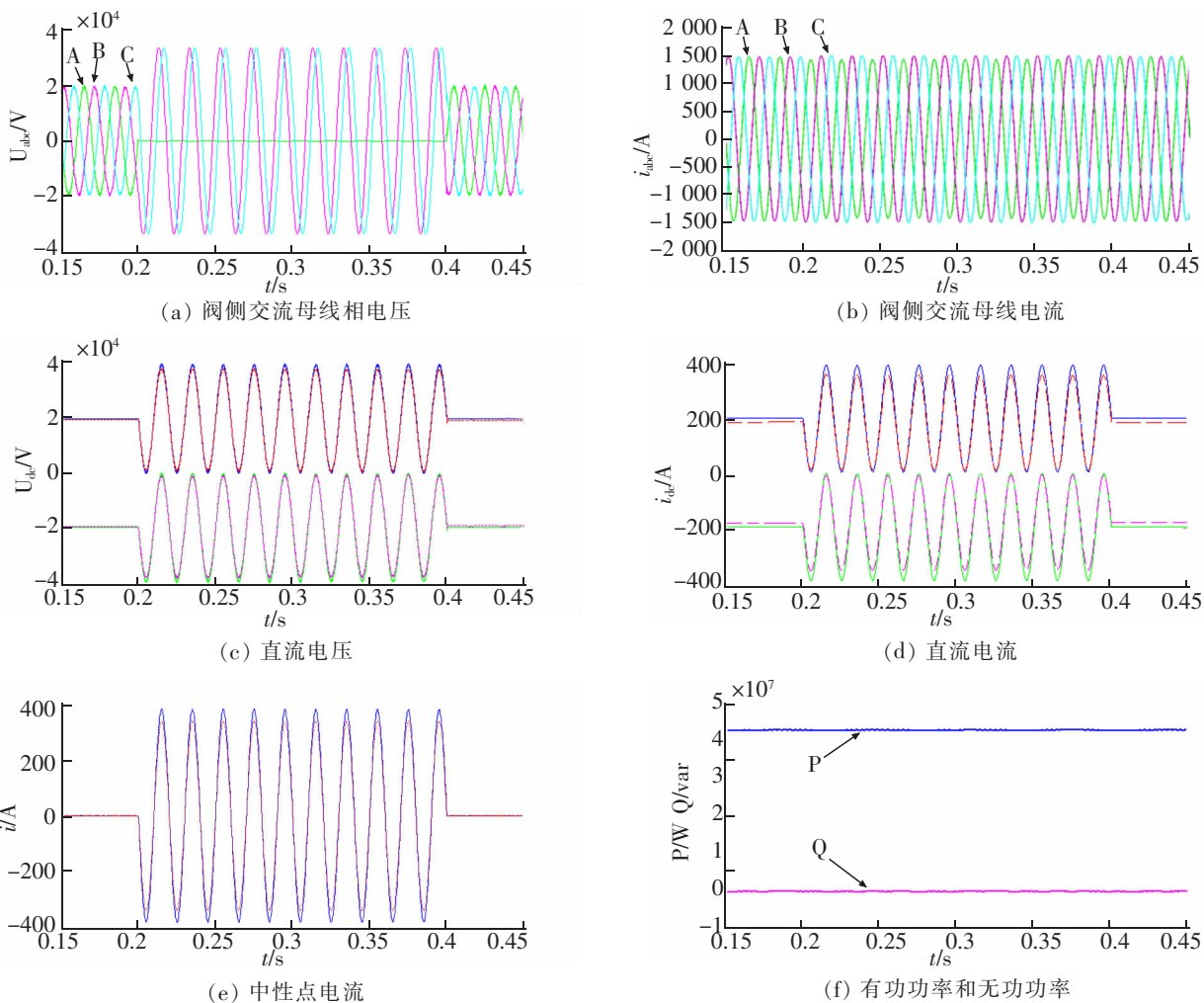


图6 单相接地故障电压、电流波形图

Fig.6 Waveforms for single-phase to ground fault

示,故障前和故障恢复后中性点电流几乎都为零,但故障发生后到故障恢复前之间出现了正弦波动,采用最近电平逼近控制法时接地电流波动的幅值大约为 395 A,而采用载波移相正弦脉宽调制法得到的结果为 386 A,且相位都为 -180° ,而理论值为 400 A,相位为 -180° 两者幅值和相位基本一致。

综上所述可见,理论计算出来的结果更加符合采用最近电平逼近控制所得出的仿真结果,而与采用载波移相正弦脉宽调制控制所得的仿真结果误差更大,这证明了所建立模型是精确的。

5 结论

本文从理论上对 MMC-HVD 系统的阀侧交流母线单相接地故障的故障特性进行了深入研究分析,并对其进行了具体的量化,利用 MATLAB/Simulink 仿真装置对阀侧交流母线单相接地故障进行了仿真,并进行了计算,得出以下结论:

1) 阀侧交流母线单相接地故障发生后,由于 MMC-HVDC 系统的对地参考点的变化,使得阀侧交流母线非故障相电压上升为原阀侧电压的 1.732 倍,由于系统电位参考点发生偏移,引起直流正负极母线电压出现正弦波动,波动幅度较大,对直流侧线路抗压要求较高,但直流极间电压保持不变。

2) 同样由于中性点偏移,直流侧电流也出现了以基频的形式正弦波动,对直流侧线路的抗过流能力要求较高,但阀侧交流母线电流基本保持稳定,直流侧电流波动也很有限,交直流线路不承受任何过电流的影响。

3) 由于并联变压器中性点偏移,造成中性点电流产生波动,所以对对地绝缘有一定影响,但过流程度

低,不影响系统的正常工作。整流侧的直流功率在故障前后维持在 43.2 MW 左右,波动幅度几乎为 0,无功功率也维持在 0 MVar 左右,因此在电力系统中发生阀侧交流母线单相接地故障后,在短时间内功率还可以正常输送,但必须在一定时间内清理故障。

参考文献:

- [1] 周月宾,江道灼. 利用均压策略消除 MMC 死区影响的方法[J]. 浙江大学学报:工学版,2014,48(4):561-568.
- [2] 杨晓峰,郑琼林. 基于 MMC 环流模型的通用环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(18):59-66.
- [3] QINGRUI T,ZHENG X,JING Z. Circulating current suppressing controller in modular multilevel converter[C]//36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society(IECON) Phoenix,USA,2010:3198-3202.
- [4] YAPING L,SHENGCHUN Y. 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.
- [5] ZIXIA S,CHENGXIONG M,JIMING L,et al. Analysis and simulation of fault characteristics of power switch failures in distribution electronic power transformers[J]. Energies,2013,6(8):4246-4268.
- [6] 朱韬析,武诚,王超,等. 交流系统故障对直流输电系统的影响及改进建议[J]. 电力系统自动化,2009,33(1):93-98.
- [7] 杨海倩,王玮,荆龙,等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术,2016,40(1):40-46.
- [8] 杜晓舟,梅军. 模块化多电平子模块冗余与带故障运行策略[J]. 电网技术,2016,40(1):19-26.
- [9] 裘鹏,章姝俊,黄晓明,等. MMC-HVDC 系统中阀侧交流母线故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(19):150-154.
- [10] GUILLOD T,KRISMER F,FARBER R,et al. Protection of MV/LV solid-state transformers in the distribution grid[C]//41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2015, Yokohama, Japan, 2015:3531-3538.
- [11] 孙晓云,高鑫,刘延华,柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(2):75-84.
- [12] 郑涛,吴丹,宋洁莹,等. 基于 MMC 的统一潮流控制器交流侧故障特性及保护方案[J]. 电网技术,2015,39(12):3570-3577.
- [13] 何仰赞,温增银. 电力系统分析[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002:51-78.
- [14] 孔明. 模块化多电平换流器的优化控制研究[D]. 北京:中国电力科学院,2014.
- [15] 赵成勇,许建中,李探,等. 模块化多电平换流器直流输电建模技术[M]. 北京:中国电力出版社,2017:12-31.
- [16] 曾耿晖,朱峥. 高压直流输电系统不对称故障下注入交流侧电流计算方法[J]. 广东电力,2015,28(11):58-61.

Analysis of Internal Side Fault Characteristics Based on MMC – HVDC

Yuan Yisheng, Tang Zhe

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: A typical single-phase short-circuit fault was designed and analyzed for the typical valve-side of the MMC-HVDC system. Without considering the asymmetry of the number of sub-module switching in the transient process, this paper established the AC-side equivalent circuit and DC-side equivalent circuit respectively when there is single-phase ground short circuit in the valve side bus bar. Then the transient formulas of the valve side bus voltage, current, DC-side voltage and current were obtained under the fault condition. Besides, power change before and after the failure and its influence on neutral current, input and output, active and reactive power were analyzed. Taking the flexible transmission project of $\pm 20\text{KV}/43.2\text{MW}$ in Shanghai as an example, the comparison between MATLAB/Simulink simulation test and the established analytical formula model shows that the transient analysis formula was consistent with the analysis result of circuit simulation model. Finally, fault characteristics of single-phase short-circuit of HVDC system were verified.

Key words: MMC-HVDC; ground fault; mathematical model; transient process; MATLAB / Simulink