

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181359

基于 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统故障分析

戴志辉, 刘雪燕, 何永兴, 苏怀波

(河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 作为模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的一种, 钳位双子模块(Clamp Double Sub-module, CDSM)型 MMC 具有直流故障自清除能力。但基于 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统, 在直流故障特性等方面与其他类型 MMC 构成的直流系统存在较大差异。为此, 首先分析了联接变压器不同接地方式下的电容放电回路, 阐述了直流故障对交流侧的影响。其次, 在 CDSM 故障闭锁情况下, 划分了 MMC 换流器端单极接地和极间短路时的故障阶段, 建立各阶段的等值模型并求解。阐述了 DC/DC 换流器及光伏电源对极间短路故障回路的影响, 并对 DC/DC 换流器侧的暂态过程进行了分析。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中建立基于 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统模型, 验证了分析结果的正确性。

关键词: 模块化多电平换流器; 钳位双子模块; 直流侧故障; 故障阶段; 光伏

DC-fault analysis on CDSM-MMC based PV integration system

DAI Zhihui, LIU Xueyan, HE Yongxing, SU Huaibo

(Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province
(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: As one type of Modular Multilevel Converters (MMC), the Clamp Double Sub Module (CDSM) based MMC has the self-clearing capability of DC-side faults. However, PV integration system based on CDSM-MMC has significant differences from the DC system based on other MMC converters in terms of fault characteristics and so on. For the above reasons, capacitor discharge circuits under different grounding modes of the converter transformer are analyzed, and the impact of DC faults on the AC side is illustrated firstly. Secondly, when CDSM is blocked, the stages of the unipolar grounded fault and the bipolar short-circuit on the MMC converter side are divided, and equivalent models of each stage are built and solved. The influence of DC/DC converters and PV plants on the fault loop of bipolar faults is expounded, and the transient process on the DC/DC converter side is analyzed. Finally, the CDSM-MMC-based PV integration system model is established in PSCAD/EMTDC, and the simulation results verify the correctness of the analysis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877084), National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900203), and Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502063), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2017MS096).

Key words: modular multilevel converter; clamp double submodule; DC side faults; fault stages; PV source

0 引言

传统光伏电站多采用交流并网方式, 存在接入点容量紧张、双向潮流、电能质量与供电效率低等

问题^[1-2]。采用直流接入方式有利于缓解上述问题, 提高可再生能源的利用效率。在并网逆变器的选择上, 模块化多电平换流器以拓扑结构易扩展、集成化程度高、输出谐波少而得到广泛应用^[3-4]。其子模块中全桥子模块(FBSM)和钳位双子模块(CDSM)能依靠自身控制清除直流侧故障, 但 CDSM 使用器件数少、损耗更小, 且具有更高的暂态稳定性^[5]。因此, 基于 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统在电能质量和直流故障隔离等方面具有一定的优势, 但其

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084); 国家重点研发计划专项课题资助(2016YFB0900203); 河北省自然科学基金项目资助(E2018502063); 中央高校基本科研业务费项目资助(2017MS096)

直流侧故障特性尚未被广泛关注, 故有必要进行分析, 以便为光伏直流接入系统的研究应用提供参考。

文献[6-8]对并网逆变器控制策略及分布式电源的故障特性进行分析, 提出了含分布式电源的电网故障分析方法, 但不适用于直流故障的分析。文献[9-11]给出 VSC-HVDC 的直流故障特性, 对 MMC 故障分析具有借鉴意义; 文献[12-16]对 HBSM-MMC 的直流故障特性进行了分析, 但 HBSM 闭锁后的故障特性与 CDSM-MMC 存在差异。文献[17]分析了双极 MMC-HVDC 系统的直流故障特性, 但双极系统与伪双极系统的故障特性存在较大差异。文献[18-21]介绍了几种具有直流故障清除能力的 MMC, 并将其隔离性能和稳定性进行对比。文献[22-25]提出了 CDSM-MMC 的故障隔离原理和闭锁前后的等值电路, 对基于 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统的直流故障分析具有参考价值, 但两者拓扑结构不同, 故障特性存在差异, 需具体分析。

整体上, 目前对于光伏接入系统的研究主要在并网逆变器控制和对交流电网故障的影响方面, 而对直流故障分析鲜见报道。由于光伏直流接入方式中直流通路起主要的功率传输作用, 因而有必要对其故障进行分析。在 CDSM-MMC 的研究方面, 对单极接地故障的分析相对更少, 且缺乏从变压器联结组别的角度对直流故障的影响进行分析, 对 YNd11 接法下的故障特性缺乏定量推导。同时, 故障阶段的划分也不清晰。光伏接入系统伪双极运行时, 对含光伏电源及 DC/DC 换流器的不同直流故障回路方程及求解仍需进一步研究。

为此, 首先建立了基于 9 电平 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统模型, 分析了 MMC 换流器不闭锁和闭锁两种情况下的直流故障特性。其次, 就变压器接地方式对 MMC 直流故障回路的影响进行阐述, 建立了相关方程并求解, 同时分析了光伏电源及 DC/DC 换流器对故障特性的影响。根据 MMC 模块电容充放电过程将故障划分为 3 个不同的时段; 由 DC/DC 换流器侧输出端电容特性, 将极间短路划分为 2 个阶段, 分别进行了详细分析, 并在 PSCAD/EMTDC 进行了仿真验证。

1 光伏直流接入模型的建立

1.1 光伏直流接入模型的建立

光伏直流接入系统模型如图 1 所示。其光伏能量汇集、升压、功率输送等环节均采用直流方式, 且并网逆变器与 DC/DC 换流器不在同一个换流站内, 而由直流电缆或架空线连接, 无需在线路末端进行无功补偿。由于直流接入方式降低了大量无功

传输, 在相同电压等级下, 功率传送能力更强、损耗更小。而且其可以非同步并网, 不存在频率匹配问题; 采用电压源换流器作为并网逆变器, 电能质量更高; 有功和无功独立解耦, 控制灵活性更强。为降低直流故障对交流系统的扰动, 采用 CDSM-MMC 作为并网换流器, 由换流站子模块闭锁实现直流故障自清除。

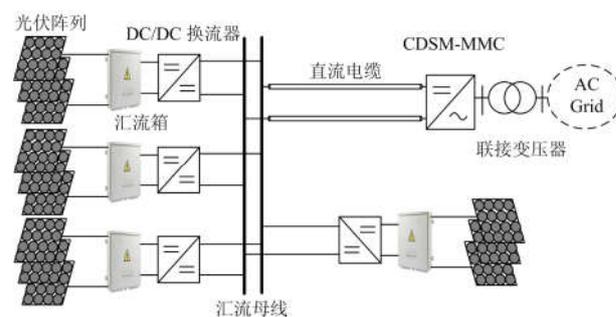


图 1 光伏直流接入方式

Fig. 1 PV DC access method

1.2 相关模块介绍

1.2.1 光伏电站

光伏直流接入系统中, 逆变器不在光伏电站内, 发生直流故障时, 不能根据文献[7]对光伏电源进行等效。但由光伏电池伏安特性可知, 在最大功率点和短路点之间, 可将其等效为受输出电压控制的电流源, 但短路电流相较于正常电流变化不大。

1.2.2 DC/DC 换流器

图 2(a)为 Boost 全桥隔离型 DC/DC 换流器拓扑, 采用输入并联、输出串联结构提高输出电压等级。图中, L_{boost} 为升压电感, S_c 、 C_c 分别为有源钳位开关、钳位电容, S_1 — S_4 为全桥电路开关元件, L_r 为变压器等效漏感, n 为变比, D_1 — D_4 为全桥整流二极管, C_o 为滤波电容, R_o 为接地电阻, V_{in} 、 V_o 分别为 DC/DC 换流器输入、输出电压。

为降低扰动情况下光伏电源侧正、负极电压的波动, 除在 MMC 换流器侧采用合适的接地方式外, 也应在 DC/DC 换流器中心设置电位参考点(图 2(a)O 点), 经电阻 R_o 接地以避免单极接地时直接短路放电。为描述方便, 定义 DC/DC 换流器接地点上侧电容为正极电容, 接地点下侧电容为负极电容, 且均为等效电容。

1.2.3 CDSM-MMC 换流器

图 2(b)为 CDSM-MMC 的拓扑结构图, U_x 、 i_x ($x=a, b, c$) 分别为交流电源的三相电压和电流, U_{ux} 、 U_{lx} 分别为 MMC 上、下桥臂子模块的电压, i_{ux} 、 i_{lx} 分别为上、下桥臂电流, L_0 为桥臂电感, U_{dc} 为直流

极间电压, I_{dc} 为直流电流。换流站采用定直流电压和定无功功率控制, 模块电容按照均压原则进行投切, 调制方式为最小电平逼近方式。

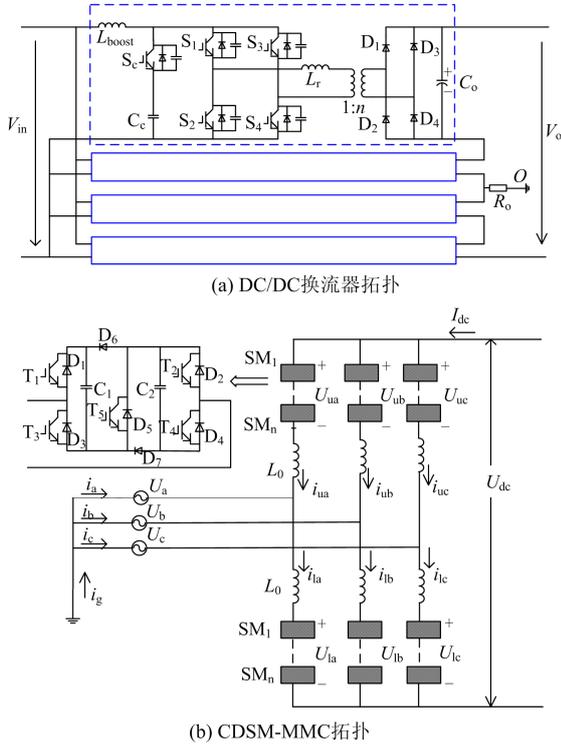


图2 换流器拓扑

Fig. 2 Topology of converters

2 直流故障分析

光伏直流接入系统功率依靠直流线路传输, 其故障对整个系统影响较大, 故需要进行分析。在不影响故障暂态过程的前提下, 为提高仿真速度, 每相采用 10 个子模块, 参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of the simulation model

系统参数	参数取值
光伏电站输出功率/MW	5
DC/DC 换流器滤波电容/ μF	200
直流电缆长度/km	10
桥臂电容/ μF	8 000
桥臂电感/H	0.01
直流电压等级/kV	± 30
额定直流电流/kA	0.083 3
变压器变比/kV	35/30
交流系统额定频率/Hz	50
交流电网电压等级/kV	35

2.1 单极接地故障(正极接地)分析

2.1.1 变压器采用 YNd11 接法

变压器阀侧三角接法时有两条放电回路, ①

DC/DC 换流器正极电容放电回路、②MMC 桥臂对 DC/DC 负极电容的充电回路, 如图 3(a)所示。

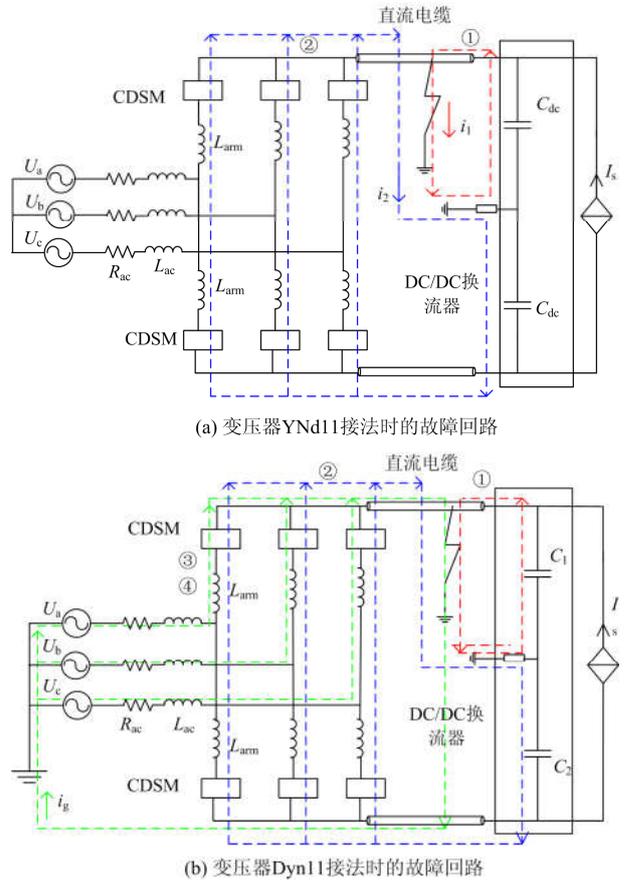


图3 变压器不同联结组别时的故障回路

Fig. 3 Fault circuit when the transformer with different connection groups

可知, 接地点的故障电流由两部分组成, 可用叠加原理进行求解。

1) DC/DC 换流器正极电容放电电流。等效电路如图 4(a)所示。 R 和 L 分别为直流线路电阻和电感的一半(线路中点故障), 并令 $R_e = R + R_0$ 。 C_1 为 DC/DC 换流器正极电容值, 且 $C_1 = 2C_0/m$, m 为 DC/DC 换流器串联个数。

由于故障瞬间电容电压和电感电流不能突变, 故障回路是一个初始电容电压之和 U_{C1} 为 $0.5U_{dc}$ 、初始电感电流 i_{C1} 为 I_{dc} 的二阶欠阻尼振荡放电回路。可进一步分解为对 $U_{C11}(0_+) = U_{C11}(0_-) = 0.5U_{dc}$, $i_{11}(0_+) = i_{11}(0_-) = 0$ 和 $U_{C12}(0_+) = U_{C12}(0_-) = 0$, $i_{12}(0_+) = i_{12}(0_-) = I_{dc}$ 的求解。其中, U_{C11} 、 U_{C12} 、 i_{11} 、 i_{12} 分别为 U_{C1} 和 i_1 的分解值。

$$LC_1 \frac{d^2 U_{C1}}{dt^2} + R_e C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} + U_{C1} = 0 \quad (1)$$

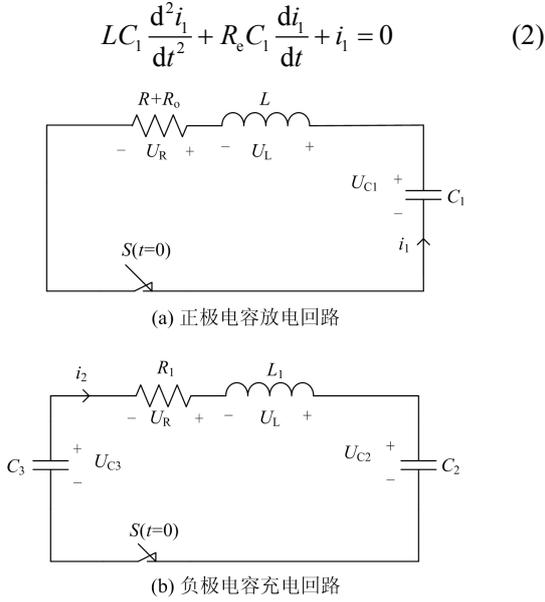


图 4 DC/DC 换流器电容的充放电回路

Fig. 4 Capacitor charging and discharging circuits in DC/DC converters

解得

$$U_{C1} = e^{-\alpha t} \left[\frac{\omega_0}{2\omega} U_{dc} \sin(\omega t + \theta) - \frac{I_{dc}}{C_1 \omega} \sin(\omega t) \right] \quad (3)$$

$$i_1(t) = e^{-\alpha t} \left[\frac{C_1 \omega_0^2}{2\omega} U_{dc} \sin(\omega t) - \frac{\omega_0 I_{dc}}{2\omega} \sin(\omega t - \theta) \right] \quad (4)$$

式中,

$$\alpha = R_e / 2L \quad (5)$$

$$\omega_0 = \sqrt{1/(LC_1)} \quad (6)$$

$$\omega = \sqrt{1/(LC_1) - [R_e/(2L)]^2} \quad (7)$$

$$\theta = \arctan(\omega / \alpha) \quad (8)$$

2) MMC 对 DC/DC 换流器负极电容充电电流。等效电路如图 4(b)所示。其中: C_2 为 DC/DC 换流器负极电容, 且 $C_2 = C_1$; C_3 为 MMC 三相桥臂等值电容, 且 $C_3 = 6C/n$; $L_1 = 2(L_{arm}/3 + L)$; $R_1 = 2(R_{arm}/3 + R + R_0)$ 。将 C_2 、 C_3 等效为 C_4 , $C_4 = C_2/C_3$, $U_{C4} = 0.5U_{dc}$, 从而电路初始电压为 $0.5U_{dc}$, 初始电流为 $-I_{dc}$ 。等效电路的电容电压和回路电流计算分别如式(9)、式(10)所示。

$$U_{C4} = e^{-\alpha' t} \left[\frac{\omega_0'}{2\omega'} U_{dc} \sin(\omega' t + \theta) + \frac{I_{dc}}{C_4 \omega'} \sin(\omega' t) \right] \quad (9)$$

$$i_2(t) = e^{-\alpha' t} \left[\frac{C_4 (\omega_0')^2}{2\omega'} U_{dc} \sin(\omega' t) + \frac{\omega_0' I_{dc}}{\omega'} \sin(\omega' t - \theta) \right] \quad (10)$$

式中, α' 、 ω_0' 、 ω' 及 θ' 求法同式(5)~式(8)。

其中, CDSM 模块电容放电回路与故障前的投入状态有关, 如图 5 所示。以图 5(a)为例, 若故障前 T_1 、 T_4 闭合, 则模块电容 C_1 、 C_2 都处于“投入”状态, 故障后而换流器闭锁前, 电容 C_1 、 C_2 均会通过 IGBT 或并联二极管进行放电。

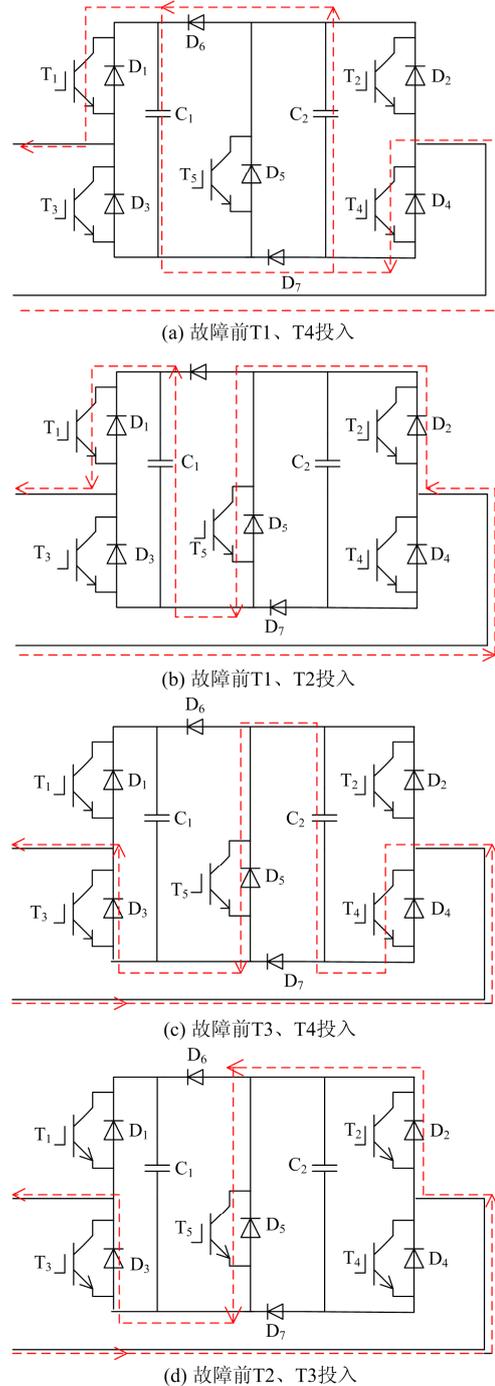


图 5 CDSM 不同状态下电容放电回路

Fig. 5 Capacitor discharging circuits of CDSM in different states

由于 DC/DC 换流器端接地电阻的作用, 正极电容放电电流与 MMC 桥臂电容放电电流均较小, 故障后仅是直流零电位参考点发生变化, 控制系统正常工作。在定直流电压的控制下, 负极电压变为 $-U_{dc}$ (如图 6(a)所示)。交流侧出口电压出现 $0.5U_{dc}$ 的直流偏置, 但幅值不变。

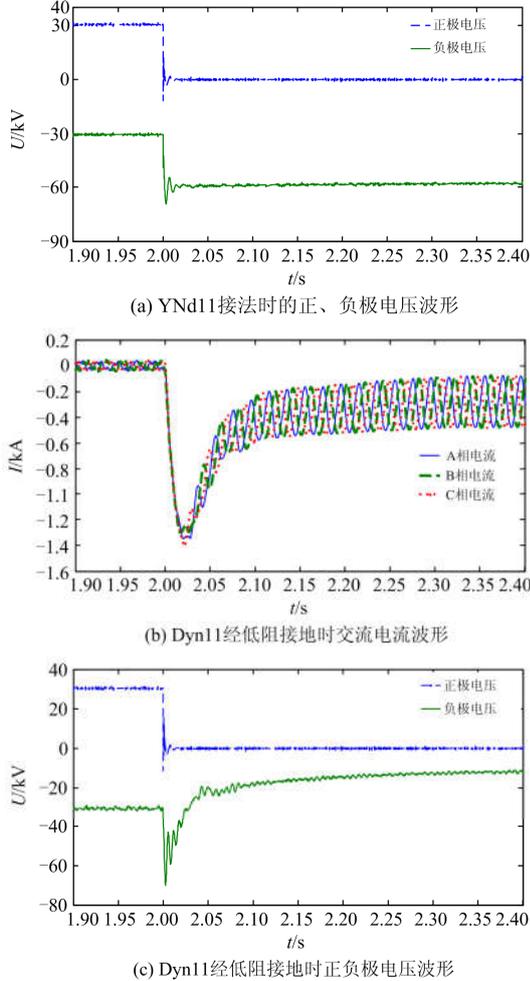


图 6 单极接地故障波形图

Fig. 6 Waveform under unipolar grounded fault

2.1.2 变压器采用 Dyn11 接法

此时, 相当于在变压器 YNd11 接法的两条故障回路基础上, 增加 MMC 上桥臂电容对故障点的放电回路、交流电源对故障点的馈入回路。而交流系统馈入回路已有较多文献分析, 故主要分析 MMC 上桥臂电容对故障点的放电回路, 回路方程如式(11)、式(12)所示。

$$U_{ux} + L_{arm} \frac{di_{ux}}{dt} = (R + \frac{R_T}{3} + \frac{R_{ac}}{3} + R_g) i_g + (L + \frac{L_T}{3} + \frac{L_{ac}}{3}) \frac{di_g}{dt} \quad (11)$$

$$i_g = \sum_{x=a,b,c} (C \frac{dU_c}{dt} + i_x) = 3C \frac{dU_c}{dt} \quad (12)$$

式中: U_{ux} 、 i_{ux} 分别为 MMC 上桥臂的电压和电流; R_T 、 L_T 分别为变压器电阻和电感; R_{ac} 、 L_{ac} 分别为 MMC 交流出口电阻和电感; R_g 为过渡电阻; i_g 为从变压器接地点流入 MMC 的电流。

由最小电平逼近可得 CDSM-MMC 上桥臂导通数 n_{ux} , 其中, a 相上桥臂导通数如式(13)所示, U_{ux} 为上桥臂所有导通模块电压之和, 如式(14)所示。

$$n_{ua} = n/4 - \text{round}[U_m \sin(\omega t)/U_c]/2 \quad (13)$$

$$U_{ux} = n_{ux} U_c \quad (14)$$

式中: n 为每相的 CDSM 模块数; $\text{round}(y)$ 为接近 y 的整数; U_m 为交流相电压峰值。对式(11)进行三相求和, 整理得式(15), 可见其为一个二阶 RLC 放电电路, 具体求解可参照式(1)、式(2)。

$$\left(L + \frac{L_T + L_{ac} - L_{arm}}{3} \right) C \frac{d^2 U_c}{dt^2} + \left(R + \frac{R_T + R_{ac}}{3} + R_g \right) C \frac{dU_c}{dt} - nU_c/4 = 0 \quad (15)$$

变压器阀侧经低阻接地时, MMC 上桥臂电容迅速放电, MMC 交流电流出现很大的直流分量, 如图 6(b)所示, 超出了内环控制的限值, 控制器失去对电流的控制。直流电压发生畸变, 如图 6(c)所示, 功率传输受到严重影响, 应及时闭锁换流器。

2.1.3 MMC 换流站闭锁

由于 CDSM-MMC 具有直流故障自清除能力, 可阻止交流系统向直流故障点提供短路电流。

根据 MMC 闭锁前后模块电容充、放电特征, 故障过程可分为以下三个阶段:

1) 电容放电阶段: 该阶段的故障特征即为换流器闭锁前的故障特征, 已在 2.1.1—2.1.2 节给出。

2) 电感续流阶段: MMC 闭锁后, 由于二极管的单向导电性, 桥臂电容无放电回路, 故障电流减小。桥臂电感释放能量进行续流, 放电公式如式(16)所示。电感电流通过二极管向桥臂电容充电, 反极性的电容电压上升, 为故障隔离提供条件。

$$L_{arm} C_{e2} \frac{d^2 i}{dt^2} + R_{arm} C_{e2} \frac{di}{dt} + i = 0 \quad (16)$$

式中, C_{e2} 为上桥臂等值电容。电路初始电压和电流为电容放电后的电压和电流。

变压器采用 YNd11 接法或 Dyn11 经高阻接地时, 由于桥臂电容放电小, 故障后模块电容电压 $U_c > MU_{cN}$ (M 为调制比, U_{cN} 为模块电容额定电压), 换流器闭锁后交流电流无法馈入; 而当变压器采用 Dyn11 经小电阻或直接接地时, 桥臂电容电压急剧

下降, 若换流器闭锁不及时则 CDSM-MMC 不能完全阻断交流电流的馈入, 此时交流电流和桥臂电感电流共同为桥臂电容充电, 至电容电压大于 MU_{cN} 时, CDSM-MMC 恢复故障隔离能力。图 7(a)为 CDSM-MMC 及时闭锁后的交流电流图。

3) 深度隔离阶段: 该阶段交流电流被彻底隔离, 当桥臂电感中的能量全部转化到电容中时, 电感电流变为 0, 直流电流也变为 0, 此时进入深度隔离阶段, 电容既不放电也不充电。

此外, MMC 闭锁后, 子模块的导通不再受控, 极间电压不能维持稳定, 如图 7(b)所示。

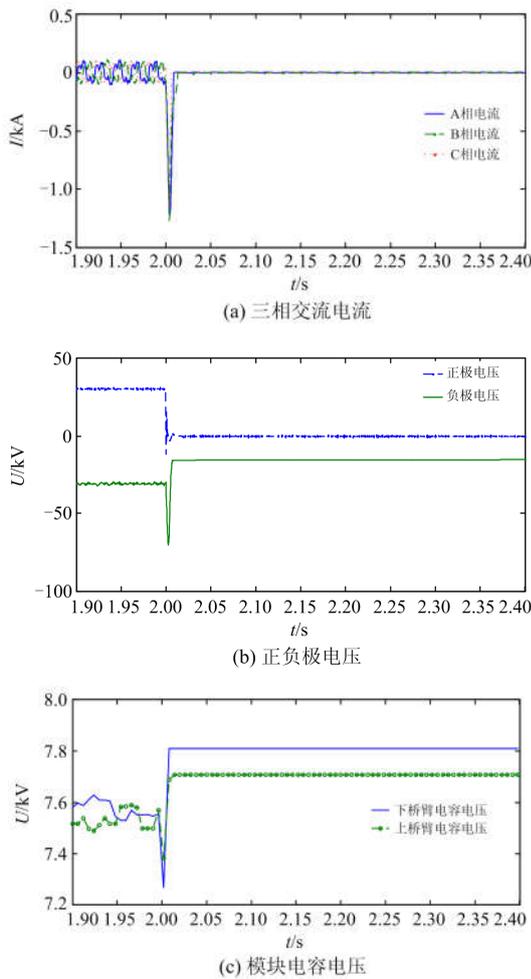


图 7 MMC 及时闭锁后电流和电压变化图

Fig. 7 Current and voltage waveform after MMC timely blocked

综合 2.1 节分析可知, 当换流变压器采用 Dyn11 经小电阻接地时, 单极接地故障电流很大, 需及时闭锁换流器。而采用 Dyn11 经高阻接地时, 故障特性与变压器 YNd11 接法时相似, 可维持极间电压稳定。但考虑直流故障穿越能力和装置成本, 建议其采用 YNd11 联结方式。

2.2 极间短路故障分析

2.2.1 换流站闭锁前故障分析

极间短路危害大且多为永久性故障, 此时 DC/DC 换流器输出端电容和 MMC 桥臂子模块电容均快速放电。由于 DC/DC 换流器与光伏电源被短路, 光伏功率无法送出, MMC 交流侧相当于发生三相短路(如图 8(a)所示)。

图 8(b)为极间短路时交流侧三相电流波形。可见, 交流电流在极间短路后会出现偏移, 这是由衰减直流分量造成的。设故障前电路处于稳态(以 a 相为例), 其故障前电流如式(17)所示。

$$i_a = I_{m|0|} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{|0|}) \quad (17)$$

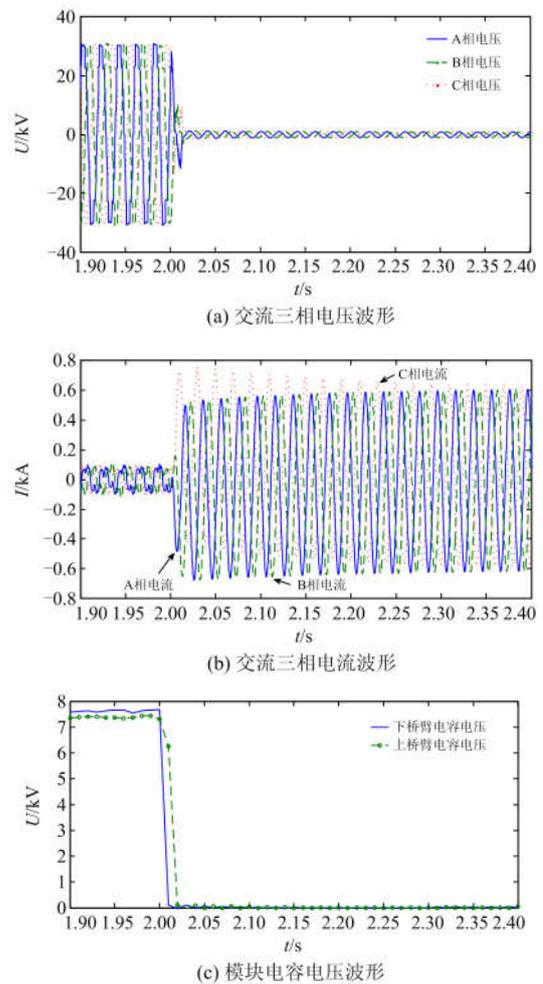


图 8 极间短路换流器闭锁前电压和电流变化波形

Fig. 8 Voltage and current waveform of pole-to-pole fault before inverter is blocked

式中,

$$I_{m|0|} = \frac{U_m}{\sqrt{(R_s + R'_s)^2 + \omega^2(L_s + L'_s)^2}} \quad (18)$$

$$\varphi_{|0|} = \arctan \frac{\omega(L_s + L'_s)}{R_s + R'_s} \quad (19)$$

式中： L_s 和 R_s 为交流电源侧的电感和电阻； L'_s 和 R'_s 为 MMC、DC/DC 换流器及光伏电源整体的等效电感和等效电阻。

根据故障回路方程，可求出 a 相故障电流如式 (20) 所示。

$$i_a = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + [I_{m|0|} \sin(\alpha - \varphi_{|0|}) - I_m \sin(\alpha - \varphi)] e^{-t/T_a} \quad (20)$$

式中： I_m 为故障后的电流幅值； $T_a = L_s / R_s$ 。

2.2.2 DC/DC 换流器极间短路故障分析

极间短路时，DC/DC 换流器输出端存在对故障点的放电回路，如图 9 所示。

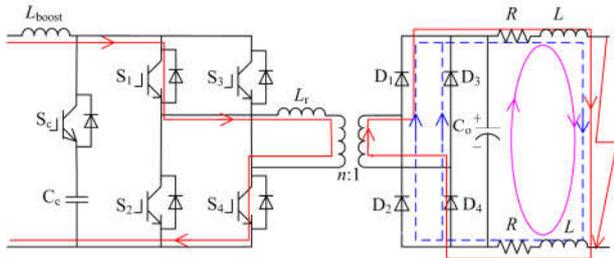


图 9 极间短路时 DC/DC 换流器故障回路

Fig. 9 Discharging circuits of DC/DC converter

根据故障后的短路特征，可将故障暂态过程划分为以下两个阶段，如图 10 所示。

1) 输出端电容放电阶段：该阶段主要为 DC/DC 换流器输出端电容 C_o 的放电过程以及光伏电源对故障点的电流馈入过程。故障初期，DC/DC 换流器输出端电容首先放电，导致换流器输出电压降低，进而使得光伏受控电流源电流增大，向故障点馈入短路电流。

2) 电感续流阶段：当 DC/DC 换流器输出电容放电完全时，光伏电源被短路，无法进行电能的输送。线路电感进行续流，此时续流二极管上下直通，即 D_1 与 D_2 、 D_3 与 D_4 同时导通(如图 9 蓝色虚线所示)。

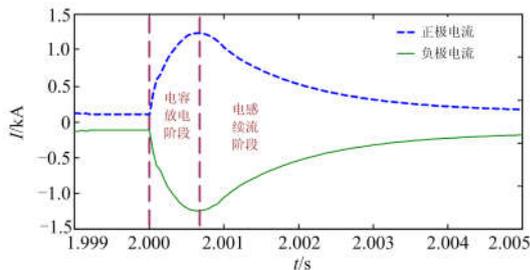


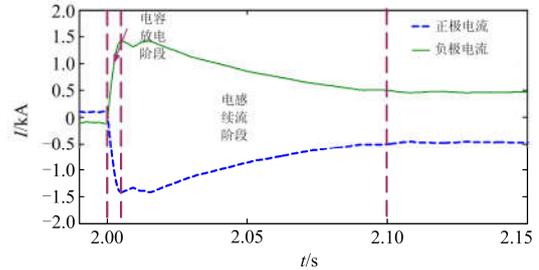
图 10 DC/DC 换流器侧暂态过程

Fig. 10 Transient process of DC/DC converter side

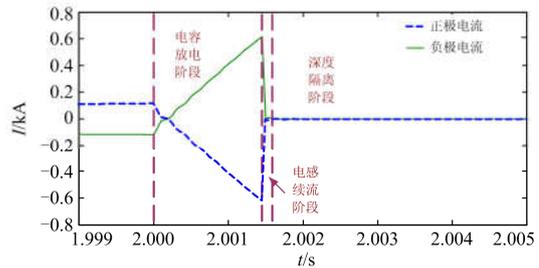
由 DC/DC 换流器拓扑可知，当其闭锁后光伏功率无法送出，但并不能减小短路电流。极间短路时仍将经历上述两个阶段，仅是在电容放电阶段失去光伏电源电流的馈入过程。

2.2.3 MMC 换流器极间短路故障分析

与单极接地故障类似，极间短路后 MMC 侧暂态过程也可划分为电容放电阶段、电感续流阶段、深度隔离阶段，如图 11 所示。



(a) MMC 不闭锁



(b) MMC 闭锁

图 11 MMC 侧暂态过程

Fig. 11 Transient process of DC/DC converter side

前两阶段中，CDSM-MMC 换流器的等值模型和放电回路在文献[24]已有分析，不再赘述。若 CDSM-MMC 换流器闭锁及时，其能隔离直流侧故障；若换流器不能及时闭锁，桥臂电容大量放电，其提供的反极性电压可能小于交流侧出口电压，导致隔离条件不再适用。文献[21]提出：当 $U_c < \sqrt{3}MU_{cN}/2$ 时，交流系统会向 MMC 换流器内注入交流电流。由于二极管的单向导电性，注入的交流电流与桥臂电感电流共同作用，使模块电容电压上升，直到电容电压恢复到 $\sqrt{3}MU_{cN}/2$ ，交流电流停止馈入。在故障深度隔离阶段，桥臂电感续流结束，回路电流为 0，彻底切断了与交流系统的联系。此时，电容既不充电也不放电，而由于电容电压不为 0，有利于故障切除后系统的重新恢复。

3 结论

本文以基于 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统为研究对象，重点分析了直流线路单极接地与极间短路故障特征。其中，光伏电站对外主要表现为

DC/DC 输出侧电容的充、放电特性; 而 MMC 并网逆变器的故障特性与换流变压器接地方式直接相关, 故对其进行了具体分析。综合单极接地故障穿越能力与装置成本, 建议变压器采用 YNd11 接法。

其次, 与现有成果不同, 本文根据 MMC 换流器电容在闭锁前后的充、放电特性, 将故障过程划分为三个具备不同特征的阶段, 并特别考虑了 MMC 换流器闭锁不及时的情况。此外, 分析了单极接地与极间短路时 DC/DC 换流器侧的故障特性, 并将 DC/DC 换流器侧极间短路的故障阶段进行了划分。

本文对基于 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统直流故障特征及故障阶段的分析, 可为后续保护方案的设计提供理论依据。

参考文献

- [1] 李响, 范建业, 曹丽璐, 等. 大型光伏电站并网适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 164-169.
LI Xiang, FAN Jianye, CAO Lili, et al. Analysis on the adaptability of large-scale grid-connected PV station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 164-169.
- [2] 王岩, 魏林君, 高峰, 等. 光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 70-78.
WANG Yan, WEI Linjun, GAO Feng, et al. Coordinated control strategy between large-scale photovoltaic power station and VSC-HVDC for low voltage ride-through operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 70-78.
- [3] 萧展辉, 蔡微, 黄剑文, 等. MMC 型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 103-110.
XIAO Zhanhui, CAI Wei, HUANG Jianwen, et al. Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 103-110.
- [4] 徐东旭, 刘崇茹, 王洁聪, 等. 钳位双子模块型 MMC 的电磁暂态等效模型[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3176-3183.
XU Dongxu, LIU Chongru, WANG Jiecong, et al. Equivalent electromagnetic transient model of CDSM-MMC[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3176-3183.
- [5] 戴志辉, 朱惠君, 严思齐, 等. 钳位双子模块型模块化多电平换流器交流侧故障对直流侧的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3568-3577, 16.
DAI Zhihui, ZHU Huijun, YAN Siqi, et al. Influence of clamp double submodule-modular multilevel converter AC-side faults on DC-side quantities[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3568-3577, 16.
- [6] 梁晖, 罗浩, 聂志强, 等. 高频隔离型光伏并网逆变器拓扑及其控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2302-2308.
LIANG Hui, LUO Hao, NIE Zhiqiang, et al. Topology and control strategy of high frequency isolated PV grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2302-2308.
- [7] 崔志雄. 并网光伏电站及其配电网短路故障分析与影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
CUI Zhixiong. The short circuit characteristics and influence of grid-connected photovoltaic power supply within distribution network[D]. Zhengjiang: Jiangsu University, 2016.
- [8] 焦彦军, 梁宵, 蒋晨阳. 计及 LVRT 控制策略的光伏电站并网配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 92-99.
JIAO Yanjun, LIANG Xiao, JIANG Chenyang. Fault analysis method for grid-connected distribution network of PV power station considering LVRT control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 92-99.
- [9] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于暂态电流 Pearson 相关性的两电平 VSC-HVDC 直流电路判断故障[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 74-85.
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A fault identification method for two-level VSC-HVDC DC line based on pearson correlation of transient current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 74-85.
- [10] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2308-2318.
- [11] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [12] 罗永捷, 徐罗那, 熊小伏, 等. MMC-MTDC 系统直流单极对地短路故障保护策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 98-106.
LUO Yongjie, XU Luona, XIONG Xiaofu, et al. Pole-to-ground DC fault protection of MMC-MTDC systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 98-106.
- [13] 赵成勇, 李探, 俞露杰, 等. MMC-HVDC 直流单极接

- 地故障分析与换流站故障恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3518-3526.
- ZHAO Chengyong, LI Tan, YU Lujie, et al. DC Pole-to-ground fault characteristic analysis and converter fault recovery strategy of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3518-3526.
- [14] 郭晓茜, 崔翔, 齐磊. 架空线双极 MMC-HVDC 系统直流短路故障分析和保护[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2177-2185.
- GUO Xiaoqian, CUI Xiang, QI Lei. DC short-circuit fault analysis and protection for the overhead line bipolar MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2177-2185.
- [15] 祁欢欢, 陆振纲, 陈静, 等. 基于模块化多电平的统一潮流控制器换流器和直流侧故障特征分析及保护配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 59-68.
- QI Huanhuan, LU Zhengang, CHEN Jing, et al. Converter and DC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 59-68.
- [16] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
- DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [17] 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.
- [18] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.
- LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [19] ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. The research of SM topology with DC fault tolerance in MMC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1561-1568.
- [20] 李斌, 李晔, 何佳伟. 具有直流故障清除能力的 MMC 子模块关键性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2114-2122.
- LI Bin, LI Ye, HE Jiawei. Research on the key properties of MMC sub-modules with DC fault eliminating capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2114-2122.
- [21] 周煜智, 徐政, 唐庚. 三种 MMC-HVDC 直流故障处理方法下电力系统暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1621-1627.
- ZHOU Yuzhi, XU Zheng, TANG Geng. Analysis of power system transient stability characteristics under three different DC line fault clearance solutions of MMC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1621-1627.
- [22] 丁云芝, 苏建徽, 周建. 基于钳位双子模块的 MMC 故障清除和重启能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 97-103.
- DING Yunzhi, SU Jianhui, ZHOU Jian. Analysis of MMC fault clearance and reboot capability based on clamped gemini module[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 97-103.
- [23] XUE Yinglin, XU Zheng. On the bipolar MMC-HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission: configuration, control, and DC fault analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2420-2429.
- [24] 薛英林, 徐政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 63-70.
- XUE Yinglin, XU Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70.
- [25] 张建坡, 田新成, 颜湘武. 适用于架空线路的双极混合 MMC-HVDC 拓扑[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 93-98.
- ZHANG Jianpo, TIAN Xincheng, YAN Xiangwu. Bipolar hybrid MMC-HVDC topology for overhead lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 93-98.

收稿日期: 2018-11-01; 修回日期: 2019-01-02

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: daihuadian@163.com

刘雪燕(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制;

何永兴(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 葛艳娜)