

DOI: 10.7667/PSPC151123

基于功率解耦控制的电流注入式 HVDC 换流器 运行特性的研究

赵建阳¹, 张福民¹, 刘福贵¹, 刘永和^{2,3}

(1. 河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 天津 300130; 2. 内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010080; 3. 坎特伯雷大学电气与计算机系, 新西兰 克利斯切奇 8140)

摘要: 研究基于 MLCR-CSC 的 HVDC 换流器在电网不同工况下的功率控制特性。从实际工程角度出发, 设计了两组 MLCR-CSC(DMLCR-CSC)协调工作的方案, 提出了双组多电平电流重注入换流器(DMLCR-CSC)作为 HVDC 换流器。分析了 DMLCR-CSC 在功率解耦控制的可行性, 提出了有功功率和无功功率解耦控制思想。采用的 9 电平 DMLCR-CSC 主电路晶闸管器件具备零电流关断(ZCS)特点。在输电网正常工况下, 网侧单相接地故障、两相短路故障和直流侧短路故障时, 换流器可以在 1/6 个周期内把电流降到零, 并且 THD 含量与触发角度无关。仿真验证了 DMLCR-CSC 构成的 HVDC 换流器是高压大功率电能传输的一种可靠的选择。

关键词: DMLCR-CSC; 功率解耦控制; ZCS; THD; 运行特性; 故障响应

Research on operating characteristics of current reinjection HVDC converter based on power decoupling controls

ZHAO Jianyang¹, ZHANG Fumin¹, LIU Fugui¹, LIU Yonghe^{2,3}

(1. Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Faculty of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China; 3. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Canterbury, Christchurch 8140, New Zealand)

Abstract: This paper researches the power control features of HVDC converter under different working conditions of power grid, and HVDC converter based on MLCR-CSC. From the perspective of practical engineering, it designs a coordination operating scheme with two groups of MLCR-CSC (DMLCR-CSC), and makes the double set of multilevel current reinjection converter (DMLCR-CSC) as an HVDC converter. It analyzes the feasibility of DMLCR-CSC power decoupling control, and proposes the active power and reactive power decoupling control method. Thyristors of nine-level DMLCR-CSC main circuit enable zero current turn off ZCS characteristics. Under normal working condition, single-phase ground fault on AC-side, two phase short circuit fault on AC-side and short-circuit faults on DC-side can shut down current to zero within 1/6 of a cycle. THD content is not relevant with trigger angle. Simulations verify that HVDC converter based on DMLCR-CSC is a reliable choice for high-voltage and high-power power transmission.

Key words: DMLCR-CSC; power decoupling control; ZCS; THD; operating characteristics; fault response

0 引言

高压直流(HVDC)输电系统具有传送效率高、建设成本低和运行稳定等优点, 已经成为现代电能传输领域的重要选择方式^[1-2]。HVDC 换流器主要包括电压型换流器(VSC)、电网换相换流器(LCC)和 LCC-VSC 混合直流输电换流器。

VSC 具有功角和直流电压两个控制自由度, 功率控制灵活, 同时兼顾电网电能质量, 但是对换流器控制与保护和电网故障响应要求更高^[3-5]。LCC 的特点是传送功率大, 损耗低和全性能高以及故障响应时间短, 但是容易出现换相失败, 产生谐波, 消耗大量无功功率^[6-8]。有学者提出 VSC-LCC 混合 HVDC 拓扑结构, 优点是只需少量或者不需无功功

率补偿, 可以作为独立电源向电网提供稳态和暂态支撑, 对电网故障响应迅速^[9-11], 但控制器设计较为复杂。

电流注入式换流器借助于直流纹波注入技术, 在传统 12 脉波换流器增加了电流重注入回路, 构成多电平电流重注入换流器 (MLCR-CSC)。MLCR-CSC 控制方式与 LCC 相同, 并且重注入电路时序与主电路触发角度同步, 可以实现晶闸管电流过零关断、谐波消除和单位功率因数运行, 因此 MLCR-CSC 作为 HVDC 换流器有一定的优势。然而, 单组 MLCR-CSC 的唯一控制变量只有功率角, 有功功率和无功功率独立控制受到限制^[12-13]。

为了研究基于 MLCR-CSC 的 HVDC 换流器在电网不同工况下的功率控制特性, 从实际工程角度出发, 设计了两组 MLCR-CSC (DMLCR-CSC) 协调工作的方案, 在一个相对较宽的范围内, 对发送端的有功功率和无功功率进行解耦线性化, 设计精度较高、响应迅速的经典 PI 控制器, 实现功率灵活控制的同时完成功率倍增^[14-16]。仿真验证主要包括换流器设备运行特性, 电网正常工况、网侧单相故障、两相相间短路故障和直流侧故障时的电压电流功率特性。

1 结构拓扑与变开关角控制

1.1 拓扑结构

图 1 是新型换流器拓扑结构, 交流侧采用两组 MLCR-CSC 串联拓扑结构, 它可以实现改变相角来控制电流幅值; DMLCR-CSC 可以适应更高的电压等级。DMLCR-CSC 协调控制, 在基波频率下可以实现交流侧电流相位、幅值及其电能质量的控制, 摆脱了换流器对滤波器和固定电容组无功补偿设备, 简化了换流器并网设计。

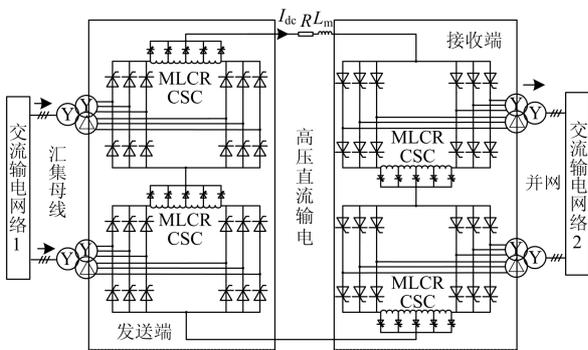


图 1 DMLCR-CSC 构成 HVDC 换流器

Fig. 1 HVDC converter based on DMLCR-CSC

1.2 变开关角控制

图 2 为 DMLCR-CSC 系统相角分析图。网侧交

流电压 U_s , 网侧交流电流 I_1 可以分解为 I_{A1} 和 I_{A2} , 矢量关系为 $I_1 = I_{A1} + I_{A2}$ 。 I_{A1} 和 I_{A2} 的幅值基本一致, 相位不同; I_{A1} 和 I_{A2} 的幅值大小由直流侧电流决定。 α_1 和 α_2 为两个换流器触发角。

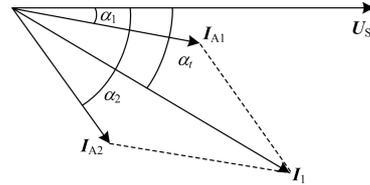


图 2 DMLCR-CSC 系统相角图

Fig. 2 Phasor diagram of two groups MLCR-CSR system

换流器交流侧电流 I_1 的幅值和相位如式(1)、式(2)。

$$|I_1| = |I_{A1} + I_{A2}| = 2|I_{A1}| \cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right) \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (2)$$

从式(1)、式(2)可以看出, 换流器交流侧电流 I_1 的幅值由 $\cos[(\alpha_1 - \alpha_2)/2]$ 决定, I_1 的相位由 $(\alpha_1 + \alpha_2)/2$ 决定。因此, DMLCR-CSC 网侧电流的幅值通过改变 PWM 调制系数达到参考值, 相角通过控制两组换流器电流导通时刻实现控制目标。

1.3 功率独立控制

从 MLCR-CSC 功率控制特性分析, 设计了经典 PI 控制策略, 如图 3。它主要包括功率运行的四个状态, 高有功功率、高无功功率控制方式, 低有功功率、高无功功率控制方式, 高有功功率、低无功功率控制方式, 高有功功率、零无功功率控制方式。图 3 表明在一个较宽的范围内, 通过改变两个换流器开关角 α_1 和 α_2 , 可以控制换流器网侧有功功率和无功功率, 实现功率解耦控制^[17-20]。

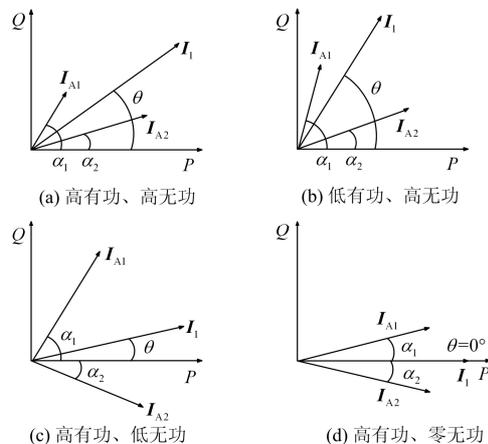


图 3 DMLCR-CSC 功率开关角控制策略

Fig. 3 DMLCR-CSC power switch angle control strategy

2 功率解耦控制器设计

HVDC 换流器发送端控制有功功率和无功功率, 接收端控制直流侧电压恒定和无功功率。为了便于分析换流器稳态特性, 接收端采用通常的开关角控制两组换流器, 即两组换流器的控制一致; 发送端采用变开关角控制, 接下来主要讨论发送端功率控制模型。传统控制器设计只是满足了在较小的范围内实现线性调节, 并不能满足变开关角控制方法, 因此, 控制器设计需要构建有功功率和无功功率到 DMLCR-CSC 主电路触发信号 α_1 和 α_2 的精确传递函数^[21-28]。

发送端有功功率 P_1 、无功功率 Q_1 表示为

$$\begin{cases} P_1 = U_S I_{A1} [\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2)] \\ Q_1 = U_S I_{A1} [\sin(\alpha_1) + \sin(\alpha_2)] \end{cases} \quad (3)$$

对有功功率为 P_1 、无功功率为 Q_1 求得:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial \alpha_1} = -3U_S I_{A1} \sin(\alpha_1) & \frac{\partial P}{\partial \alpha_2} = -3U_S I_{A1} \sin(\alpha_2) \\ \frac{\partial Q}{\partial \alpha_1} = -3U_S I_{A1} \cos(\alpha_1) & \frac{\partial Q}{\partial \alpha_2} = -3U_S I_{A1} \cos(\alpha_2) \end{cases} \quad (4)$$

发送端换流器网侧功率变化率为 ΔP 和 ΔQ , 与之相对应的换流器触发角度的变化率 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\alpha_2$ 满足下式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial P}{\partial \alpha_2} \\ \frac{\partial Q}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial Q}{\partial \alpha_2} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \Delta\alpha_1 \\ \Delta\alpha_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

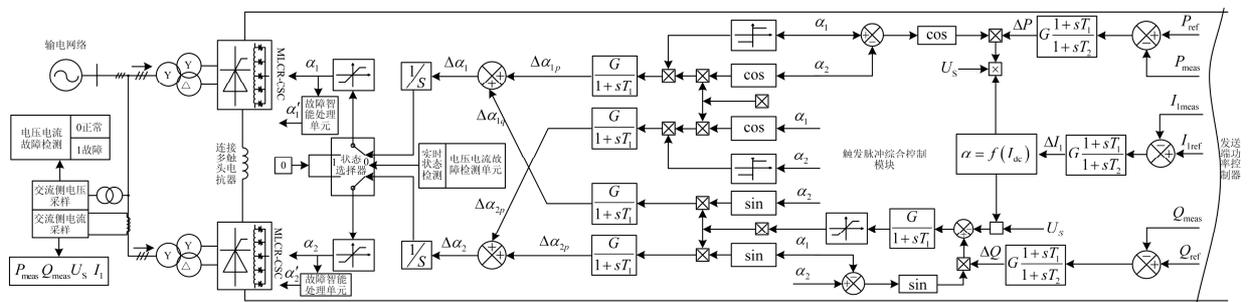


图 4 DMLCR-CSC 输电系统控制图

Fig. 4 DMLCR-CSC power transmission system control block

3 系统仿真

仿真验证主要对 DMLCR-CSC 功能及其 HVDC 换流器运行特性进行验证, 重注入电流的电平数为 9。

3.1 DMLCR-CSC 过零关断与谐波消除

图 5 中, 在 0.05 s, I_{j1} 幅值到达最大, 换流器

如果矩阵 A 是非奇异的, 那么它的逆矩阵使换流器具有线性化控制特性, A^{-1} 为

$$A^{-1} = \frac{1}{3U_S I_{A1} \sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \begin{bmatrix} -\cos(\alpha_2) & -\sin(\alpha_2) \\ \cos(\alpha_1) & \sin(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

设计了 DMLCR-CSC 逻辑控制框图, 如图 4。主要分为信号采集部分和信号处理部分。信号采集部分包括网侧和直流侧电压电流信号的采样, 计算得到实时功率。信号处理方式包括有功功率和无功功率两个控制方式相同的通道, 以及二级功率调整回路。 P_{ref} 和 Q_{ref} 为有功功率和无功功率指令, P_{meas} 和 Q_{meas} 为电网实时的有功功率和无功功率, $G(s)$ 是 PID 传递函数。输电系统参数经过采样和设定值比较, 得到误差增量 ΔP 和 ΔQ 。同时, 直流电流反馈信号来实时监测控制器的精度, 其中 I_{1mean} 为监测实时信号, I_{1ref} 为参考信号, 经过 PID 传递函数, 得到直流电流误差 ΔI_1 , 与有功功率和无功功率转化触发角作用得到 ΔP 和 ΔQ 。 ΔP 和 ΔQ 经过 PID 控制器得到对应有功功率增量的每组换流器触发角度分量 $\Delta\alpha_{1p}$ 和 $\Delta\alpha_{2p}$, 对应无功功率增量触发角度分量 $\Delta\alpha_{1q}$ 和 $\Delta\alpha_{2q}$; 经过解耦计算得到 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\alpha_2$ 。经过积分过程, 得到触发角度 α_1 和触发时序脉冲 α_2 , 实现了非线性换流器线性化控制的功能。故障或者非正常状态下, 智能故障检测装置得到故障信号, 自动调整重注入电路触发脉冲序列的宽度, 使得换流器在每个基波周期内有 6 个电流过零点, 从而使主电路晶闸管器件在 3.3 ms 左右控制网侧电流, 迅速保持在安全运行状态。

$I_{B\Delta}$ 的幅值为零, 为 Δ 桥换相提供了零电流关断 (ZCS) 条件; 在 0.055 s 时, I_{j2} 幅值最大, 上部换流器 I_{BY} 的幅值为零, 为 Y 桥换相提供了零电流关断 (ZCS) 条件。重注入电流的频率为电网基波频率的 6 倍, 在每个基波周期提供 6 个电流过零点。

9 电平电流重注入换流器的主变压器 Y 接换流

器的直流电流 I_{BY} 输出呈现 9 电平，主变压器 Δ 接换流器的直流电流 $I_{B\Delta}$ 输出呈现 9 电平。主变压器二次侧 Y 接换流器 A 相交流输出电流 I_{aY} 导通 120° ，二次侧 Δ 接换流器 A 相交流输出电流 $I_{a\Delta}$ 导通 120° 。二次侧 Y 接和 Δ 接经过主变压器耦合，得到变压器一次侧 A 相近似于正弦波交流电流。

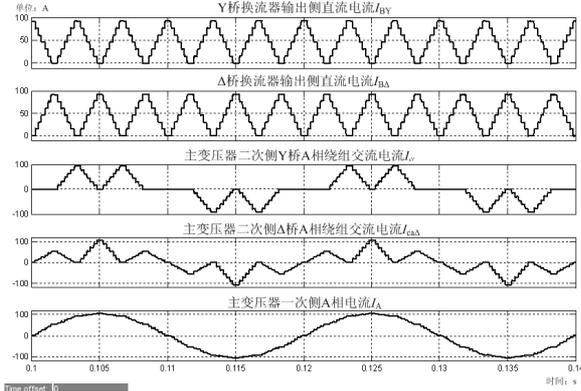


图 5 NLCR-CSC 网侧直流侧电流波形

Fig. 5 Current waveform of NLCR-CSC on AC/DC side

3.2 不同零电流脉宽对网侧电流的影响

重注入电流波形采用一个线性上升和下降的三角波进行调制，重注入电路门极可控器件的开关脉冲宽度以均分为基准。脉冲宽度定义为每个周期 20 ms ，有 6 个电流过零点，所以零脉冲宽度基准为 $20/12n$ ，其中 n 为重注入电路电平数。在不同触发角度，9 电平分别设置了零电流脉冲宽度为基准值的 $0.85\sim 1.225$ 倍，等间距 0.25 ，得到了谐波含量、电流幅值与零电流脉宽基准倍数和主电路触发角度的数据，如图 6 所示。

3.3 HVDC 正常运行特性

图 7 是正常运行状况下，发送端和接收端换流器电压电流和功率波形图。从 0 s 开始，参考电流以特定的斜率线性增大到 0.1 p.u. ；直到直流侧电压上升到 1 p.u. ， 0.4 s 时，直流侧母线电压达到稳定状态。电流建立的过程与电压建立过程一致，在 0.6 s 达到正常稳定运行状态。稳定运行过程中，发送端发送的有功功率约为 0.99 GW ，无功功率为 0.3 Gvar ；发送端吸收的有功功率约为 0.99 GW ，无功功率为 0.78 Gvar 。在 1.4 s ，输电系统停止运行，与正常启动的过程中变量变化相反。

3.4 HVDC 直流侧短路故障

图 8 是输电系统直流侧故障时，HVDC 换流器电压电流功率的波形。设置 $0.8\sim 1.0\text{ s}$ 直流侧短路故障。 0.8 s 时，直流侧参考电流迅速减小到为 0 ，实际的直流电流也立刻减小。由于 DMLCR-CSC 有过

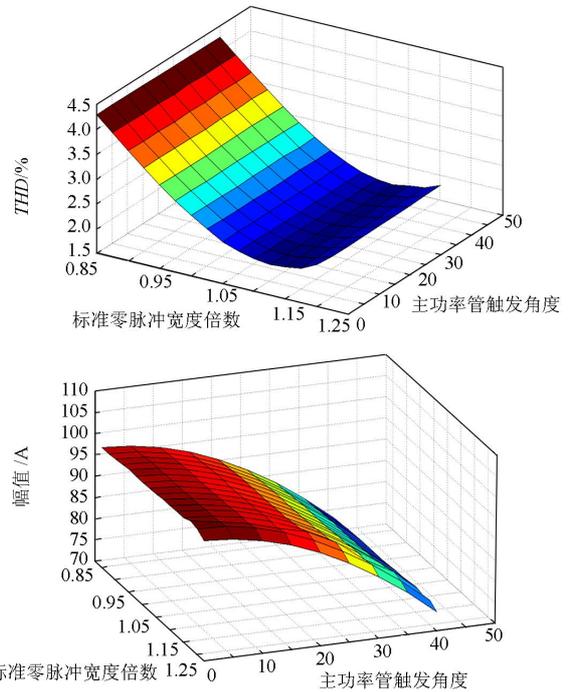


图 6 不同触发时刻，网侧电流幅值 THD 与零脉宽关系

Fig. 6 Relationship between current amplitude and THD on the AC-side at different firing time

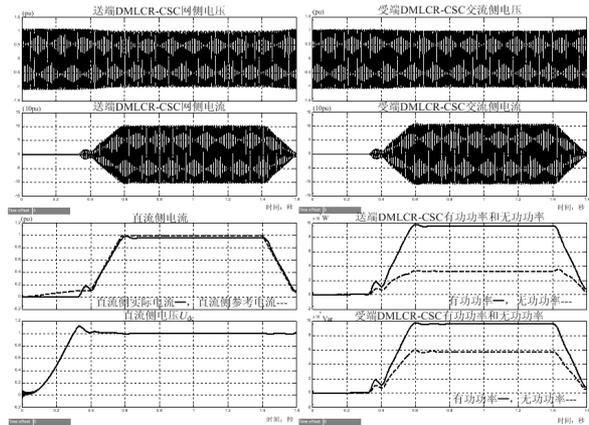


图 7 正常工况，HVDC 换流器电压电流功率波形

Fig. 7 Current and power waves of HVDC converter at normal condition

零关断的功能，在 3.3 ms 内检测到直流侧故障并且无延时地实现换流器电流为 0 ，发送端交流侧电流也迅速为 0 。直流侧短路电压最大 1.5 p.u. ，发送端交流侧电流在短路时最大为 2.5 p.u. ，完全在安全裕度范围内。发送端换流器在故障之后，迅速停机，防止短路故障影响其连接的电网。发送端输送的功率在故障之后，也变为 0 。 1.0 s ，故障切除，整个输电系统进行开机检测。

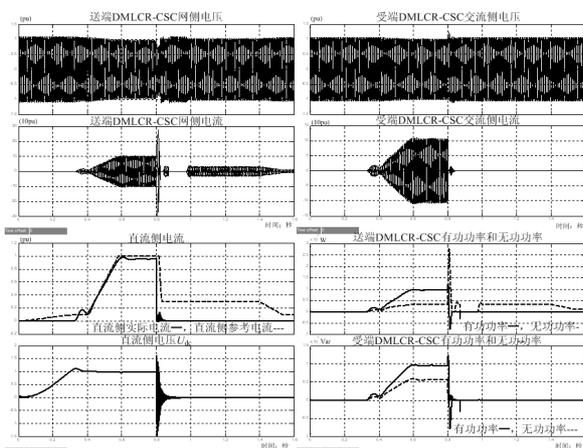


图 8 直流侧短路故障, HVDC 换流器仿真波形
Fig. 8 Current and power waves of HVDC converter during DC short-circuit faults

3.5 HVDC 送端单相短路故障

图 9 是送端电网出现单相接地短路故障时, 输电系统电压电流功率的仿真波形。设置 0.8~1.0 s 接收端单相接地短路故障。短路故障出现, A 相电压为 0, 交流侧电流迅速减小到 0.3 p.u.。直流侧电压下降, 直流侧电流稳定在 0.85 p.u.。接收端交流侧电流受到发送端电压故障, 电流有短暂下降过程, 但电压和电流很快进入一个的稳定状态。

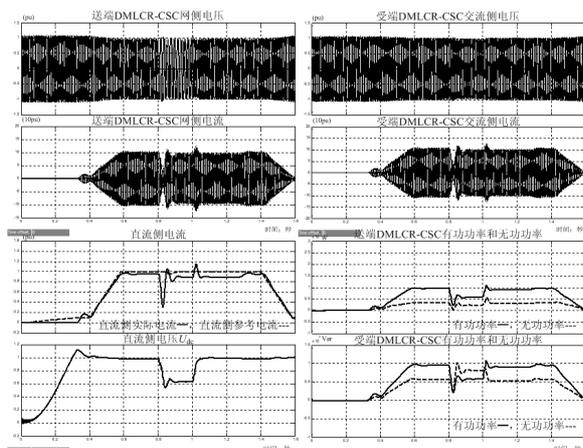


图 9 送端单相短路故障, HVDC 换流器交流侧仿真波形
Fig. 9 Current and power waves of HVDC converter during single phase short circuit fault on sending-side

故障期间, 发送端的有功功率和无功率均下降到原来的一半; 接收端的有功功率维持在原来的一半, 无功功率增大到原来的一倍, 来维持接收端电压和电流的正常运行。1.0 s, 故障解除, 发送端交流侧电压电流功率均恢复正常, 直流侧电压恢复到 1.0 p.u., 直流侧电流恢复到 0.9 p.u.; 接收端交流侧电压电流均恢复正常, 有功功率恢复到故障前的

状态, 无功功率下降一半。

3.6 HVDC 送端两相短路故障

图 10 是送端电网出现两相短路故障时, 输电系统电压电流功率的仿真波形。设置 0.8~1.0 s 接收端发生 AB 相相间短路故障。发送端短路故障出现, A 相电压为 0, B 相电压为 0.5 p.u., 交流侧电流出现迅速下降到 0.2 p.u.后, 直流侧电压下降, 直流侧电流稳定在 0.6 p.u.。接收端交流侧电流受到发送端电压故障影响, 电流有个短暂下降过程, 但电压和电流很快进入一个的稳定状态。

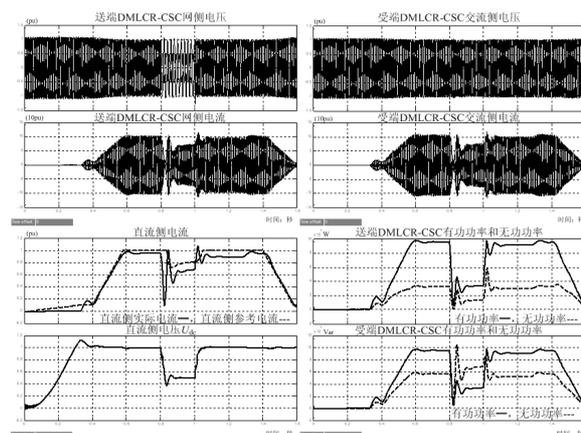


图 10 送端两相短路故障, HVDC 换流器仿真波形
Fig. 10 Current and power waves of HVDC converter during two phase short circuit fault on sending-side

故障期间, 发送端的有功功率和无功率均下降到原来的 40%; 接收端的有功功率维持在原来的一半, 无功功率增大, 来维持接收端电压保持恒定。1.0 s 故障解除, 发送端交流侧电压电流功率均恢复正常, 直流侧电压和电流恢复到 1.0 p.u.; 接收端交流侧电压电流均恢复正常, 有功功率和无功率恢复到故障前的状态。

4 结论与展望

从仿真结果可以得到以下结论:

(1) DMLCR-CSC 电路在每个基波周期内提供 6 个电流过零点, 实现了晶闸管电流过零关断; 9 电平 DMLCR-CSC, 主电路晶闸管导通频率 50 Hz, 重注入电路 IGBT 导通频率 600 Hz。

(2) DMLCR-CSC 通过注入多电平电流, 能够有效降低输出波形谐波含量, 不同触发时刻均低于 4%, 并且 THD 在谐波含量与触发角 α 没有关系; 实现单位功率因数运行; 9 电平 MLCR-CSC 最优零电流脉冲宽度为基准的 1.125 倍, THD=2.11%。

(3) DMLCR-CSC 在网侧单相接地故障、两相短

路故障和直流侧短路故障时,换流器在 $3.3 \mu\text{s}$ 内出现主电路晶闸管电流为零,安全快速实现触发脉冲封锁,把电流控制在安全的范围内;整个故障过程,换流器没有受到短路带来破坏性的危害,提高了设备安全稳定性能。

因此,DMLCR-CSC 构成的 HVDC 换流器是高压大功率电能传输的一种可靠的选择。

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.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [2] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [3] PERALTA J, SAAD H, DENNETIERE S, et al. Detailed and averaged models for a 401-level MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1501-1508.
- [4] 李笑倩,宋强,刘文华,等. 采用载波移相调制的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 49-55.
LI Xiaoqian, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Capacitor voltage balancing control by using carrier phase-shift modulation of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 49-55.
- [5] 周逢权,黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 62-67.
ZHOU Fengquan, HUANG Wei. Study on the key technology of DC distribution power network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62-67.
- [6] MONTILLA-DJESUS M E, MARTIN D S, ARNALTES S A. Optimal operation of offshore wind farms with line-commutated HVDC link connection[J]. IEEE Transactions on Energy Converters, 2010, 25(2): 504-513.
- [7] KAWAGUCHI T, SAKAZAKI T, ISOBE T, et al. Offshore-wind-farm configuration using diode rectifier with MERS in current link topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2930-2937.
- [8] GIMENEZ R B, VILLALBA S A, D'DERLEE J R, et al. Diode-based HVDC link for the connection of large offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Convers, 2011, 26(2): 615-626.
- [9] 张哲任,徐政,薛英林,等. LCC-HVDC 混合直流输电系统直流侧谐波电流计算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 65-70.
ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Calculation of DC side harmonics currents for LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 65-70.
- [10] 许烽,徐政. 基于 LCC 和 FHMMC 的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2520-2530.
XU Feng, XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2520-2530.
- [11] 唐庚,徐政,薛英林. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 301-310.
TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-310.
- [12] LIU Y H, ARRILLAGA J, WATSON N R. Reinjection concept: a new option for large power and high-quality AC-DC conversion[J]. The Institution of Engineering and Technology Power Electron, 2008, 1(1): 4-13.
- [13] MURRAY N J, ARRILLAGA J, WATSON N R, et al. Two-quadrant power control for large-current, low-voltage rectification with reference to aluminum smelters[J]. Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering, 2010, 7(3): 235-246.
- [14] MURRAY N J, ARRILLAGA J, LIU Y H, et al. Flexible reactive power control in multi-group current-sourced HVDC interconnections[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2160-2167.
- [15] 武海涛,刘永和. 大功率电流型光伏并网换流器的拓扑与控制[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2086-2093.
WU Haitao, LIU Yonghe. Topology and control of high-power current source converter for grid-connection of photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2086-2093.
- [16] LIU Y H, ARRILLAGA J, MURRAY N, et al. Derivation of a four-quadrant control system for MLCR-HVDC conversion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1-9.
- [17] 姚致清,于飞,赵倩,等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [18] LEE T, HU S, CHAN Y. D-STATCOM with positive-

- sequence admittance and negative-sequence conductance to mitigate voltage fluctuations in high-level penetration of distributed generation systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1417-1428.
- [19] 陈谦, 李冲, 金字清, 等. 基于并网型 VSC 解耦模型的控制参数优化[J]. *高电压技术*, 2014, 40(8): 2478-2484.
- CHEN Qian, LI Chong, JIN Yuqing, et al. Optimization of grid-connected VSC controller by decoupling models[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(8): 2478-2484.
- [20] 张建坡, 赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(7): 32-37.
- ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(7): 32-37.
- [21] MUÑOZ J, ESPINOZA J, ESPINOSA E, et al. Design of a discrete-time linear control strategy for a multicell UPQC[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(10): 3797-3807.
- [22] 赵成勇, 陈晓芳, 曹春刚, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(23): 82-87.
- ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(23): 82-87.
- [23] 张浩, 吴金龙, 杨美娟, 等. 模块化多电平变换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.
- [24] 李龙, 刘重阳, 贲洪奇. 基于神经元 PI 控制的 PWM 整流器动态特性研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(11): 124-128.
- LI Long, LIU Chongyang, BEN Hongqi. Research of the dynamic characteristics of the PWM converter based on neurons PI control[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(11): 124-128.
- [25] 蒋辰晖. 不对称电网电压下基于正负序分量检测风电换流器控制策略[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(1): 89-94.
- JIANG Chenhui. Control strategy of wind power converter based on negative sequence component detection under asymmetric grid voltage[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(1): 89-94.
- [26] LIU Y H, WATSON N R, ZHOU K L, et al. Converter system nonlinear modeling and control for transmission applications — part II: CSC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(3): 1391-1401.
- [27] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(17): 76-81.
- YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(17): 76-81.
- [28] 丘永亮. 适用于微电网的分布式电源逆变器控制策略研究[J]. *电器与能效管理技术*, 2013(3): 30-35.
- QIU Yongliang. Research on distributed generation inverter control strategies adapted to microgrid[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2013(3): 30-35.

收稿日期: 2015-07-01; 修回日期: 2015-09-02

作者简介:

赵建阳(1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: jianyangzhaohet@126.com

张福民(1965-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子与电气传动、柔性交流输电和高压直流输电。

(编辑 葛艳娜)