

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.10.033

4种多馈入高压直流输电电子系统的仿真分析

梅永振, 王海云, 李 阳, 潘 悦

(新疆大学教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830047)

摘要:以多馈入高压直流输电为例,分析了4种多馈入高压直流输电电子系统的拓扑结构,基于PSCAD/EMTDC仿真软件建立了4种不同拓扑结构的多馈入高压直流输电电子系统,通过接入受端弱交流系统,研究了4种多馈入子系统的暂态运行特性,仿真结果表明:整流侧为LCC、逆变侧为MMC的LCC-MMC HVDC系统的馈入有效地提高了LCC-HVDC的换相失败免疫力,缩短了故障恢复时间,改善了LCC-HVDC系统的暂态运行特性,提高了系统的供电可靠性。同时降低了VSC-HVDC、H-HVDC的工程造价和开关损耗,也避免了运行时换流器桥臂功率器件的动态均压问题,改善了输出波形的质量,该研究为以后工程应用中多馈入输电结构的选择提供一定的理论指导。

关键词:多馈入高压直流输电系统;模块化多电平换流器;换相失败;暂态运行特性;混合高压直流输电系统

Simulation Analysis of Four Kinds of Multi-infeed HVDC Subsystems

MEI Yongzhen, WANG Haiyun, LI Yang, PAN Yue

(Ministry of Education Renewable Energy Generation and Grid Control Engineering Technology Research Center, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: The multi-infeed HVDC transmission is taken for an example and four kinds of topological structures of multi-infeed HVDC transmission subsystem are analyzed in this paper. Four kinds of multi-infeed HVDC transmission subsystem are established based on PSCAD/EMTDC simulation software, after connected to weak AC system, the transient operating characteristics of four kinds of subsystems are studied. The simulation results show that, LCC-MMC HVDC system, whose rectifier side is LCC and inverter side is MMC, effectively improves the commutation failure immunity of LCC-HVDC, shortens the fault recovery time, and improves the power supply reliability of the system. At the same time, LCC-MMC HVDC avoids the problems existing in the operation of H-HVDC and VSC-HVDC, such as high switching loss, high engineering cost and dynamic voltage sharing of power devices for converter bridge arm. The research is beneficial to select better multi-infeed transmission structures for future engineering application.

Key words: multi-infeed HVDC system; modular multilevel converter; commutation failure; transient operating characteristics; hybrid HVDC transmission system

0 引言

20世纪50年代以来,以无自关断能力的晶闸管作为换流器的传统高压直流输电(line-commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)以

其在大容量、长距离输电方面的优势开始在电力系统中得到广泛地应用。但LCC-HVDC运行时需提供一定的换相电压支撑、容易发生换相失败,对持续、可靠供电带来一定的挑战。随着电力电子技术的逐步发展,电压源型高压直流输电(voltage source

收稿日期:2018-04-25; 修回日期:2018-06-30

基金项目:新疆维吾尔自治区重点实验室项目(2016D03021)。

Project Supported by the Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region(2016D03021).

converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)凭借能够实现有功和无功的快速独立控制、没有换相失败问题、可以向无源电网供电、谐波水平低等优势迅速应用在新能源发电并网外送直流工程中。但就目前而言,VSC-HVDC工程造价高、运行损耗大,限制了其在直流输电工程中的大规模应用。因此,结合传统高压直流输电和柔性直流输电两者优势的混合高压直流输电(hybrid HVDC, H-HVDC)应运而生。随着输送功率等级越来越高,为降低换流器每个桥臂的开关器件所承受的电压及进一步抑制其输出的谐波含量,采用多电平换流器或者模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的高压直流输电迅速成为直流输电工程的研究热点^[1-5]。

随着发达地区对电能质量、用电需求量的不断提高,已形成多条直流线路同时向同一负荷中心供电的输电模式(多馈入输电系统, multi-infeed HVDC),加之,消纳能力弱、偏远地区的新能源发电的产能及并网控制策略的逐步提高,多馈入输电模式将越来越多地应用在实际工程中^[6],因此对不同多馈入输电电子系统内部相互影响的研究十分必要,并有一定的工程指导意义。目前,国内外相关学者对LCC-HVDC、VSC-HVDC的研究已相当成熟,部分学者对模块化多电平换流器的高压直流输电及多馈入直流输电也做了一些研究。文[7]基于全控型电力电子器件,设计了一种新的换流器的拓扑结构,有效降低了LCC-HVDC系统换相失败概率,提高了其换相失败免疫力;文[8]指出采用VSC作为换流器的VSC-HVDC,彻底解决了传统高压直流输电的换相失败问题,但传输容量和输电距离受到限制;文[9]在多馈入直流系统逆变侧引入定交流电压控制,使用电压稳定耦合因子指标来评估多馈入子系统换流母线间的影响,有效地改善了多馈入直流系统受端交流系统的无功电压综合特性;文[10]建立了MMC型直流输电系统,并设计了控制策略,仿真验证了该输电模式的良好运行效果,但系统建模时忽略了MMC中的电抗值,不能全面反映MMC型直流输电系统的实际运行特性。参阅国内外相关文献可看出,大多学者都集中在针对特定一种模式的高压直流输电的研究,鲜有专门讨论各高压直流输电模式与传统高压直流输电形成多馈入子系统时,其对传统高压直流输电运行特性的研究。

针对以上研究不足,文中首先分析了多馈入子系统的4种拓扑结构,重点讨论了含H-HVDC的子

系统和含LCC-MMC HVDC的子系统的运行特性,基于PSCAD/EMTDC仿真软件在同种条件下建立了另外2种多馈入子系统(LCC-HVDC双馈入子系统、LCC-HVDC和VSC-HVDC双馈入子系统),与之作为比较。通过接入弱交流系统,研究了故障状态下4种多馈入子系统的运行特性,仿真结果表明,含H-HVDC的子系统在降低VSC-HVDC的开关损耗、工程造价的同时,也提高了LCC-HVDC的换相失败免疫力,加快了LCC-HVDC的故障恢复速率,一定程度上改善了LCC-HVDC的运行特性;含LCC-MMC HVDC的子系统有效地抑制了LCC-HVDC的暂态过电压,改善了输出电压波形的质量,防止因电压跌落而引起换相失败或者连续换相失败,对故障恢复时间也有一些改善,提高了系统的供电质量及供电可靠性。

1 子系统的拓扑结构及数学模型

1.1 子系统的拓扑结构

文中4种多馈入高压直流输电电子系统是LCC-HVDC与VSC-HVDC或者H-HVDC并联馈入受端同一条交流母线上构成的,其拓扑结构见图1。图1(a)为前3种子系统,图1(b)为含LCC-MMC的子系统,图1(c)为MMC的拓扑结构。其中,HVDC₁代表LCC-HVDC系统,HVDC₂为LCC-HVDC、VSC-HVDC或者H-HVDC系统;H-HVDC的整流侧为LCC,逆变侧为VSC;模块化多电平换流器(MMC)共有6个对称桥臂,每个桥臂都由一个电抗器和 n 个子模块(SM)串联组成,运行时,每个相单元的直流电流为直流电流的1/3,且上、下桥臂近似对称,因此,流过每个桥臂的交流电流近似为相电流的一半,“O”为直流侧虚拟中性点。

1.2 子系统的数学模型

由图1(a)、(b)子系统的拓扑结构可知,当系统稳定运行时,根据潮流分布及功率交换可知,LCC-HVDC系统与HVDC₂或者LCC-MMC HVDC系统的相互影响满足式(1)。

$$\begin{cases} P_{\text{HVDC}_1} + P_{\text{HVDC}_2} - P_{\text{AC}} = 0 \\ Q_{\text{HVDC}_1} + Q_{\text{HVDC}_2} + Q_{\text{C}} - Q_{\text{AC}} = 0 \\ S_{\text{AC}} = \sqrt{P_{\text{AC}}^2 + Q_{\text{AC}}^2} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: P_{HVDC_1} 和 Q_{HVDC_1} 为HVDC₁输出的有功功率和无功功率; P_{HVDC_2} 和 Q_{HVDC_2} 为HVDC₂或者LCC-MMC HVDC输出的有功功率和无功功率; P_{AC} 和 Q_{AC} 为受端交流系统的有功功率和无功功率; Q_{C} 为交流母线B上补偿的无功功率;对于子系统中LCC-

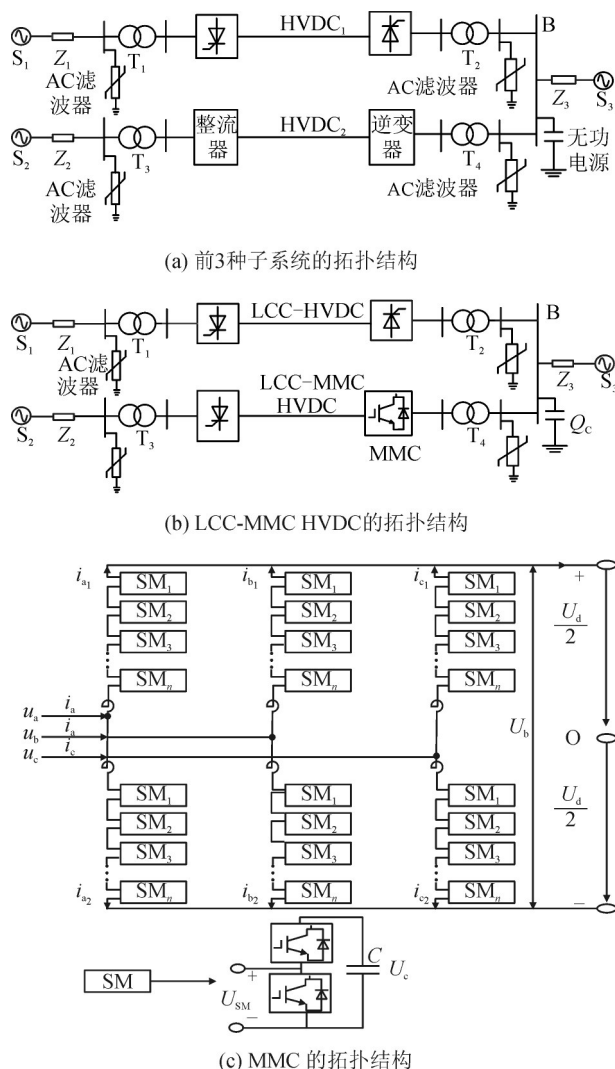


图1 子系统拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of the subsystem

HVDC和VSC-HVDC,已经研究相当成熟,这里不再赘述。若HVDC₂为H-HVDC输电系统,其数学模型满足式(2)

$$\begin{cases} U_{d1} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_{s2} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)] \\ U_{d2} = \frac{\sqrt{2}}{m} U_c & 0 \leq m \leq 1 \\ P_{HVDC2} = \frac{U_{s2} \times U_c}{X} \sin \delta \\ Q_{HVDC2} = \frac{U_{s2}}{X} [U_c \cos \delta - U_{s2}] \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: U_{s2} 为整流侧交流系统的电压; U_c 为VSC输出电压的基波分量的有效值; δ 为交流系统电压(U_{s2})与VSC输出电压之间的相位差; m 为PWM的电压调制度; X 为换流电抗器和换流变压器的等效阻抗。 α 、 γ 分别为脉冲触发角和换流器的关断角(熄弧角)。对于LCC-MMC系统,稳态运行下,整流侧LCC、逆变侧MMC满足以下关系^[11-12],见式(3)、(4):

$$\begin{cases} U_{d1} = 2.7 U_{s2} \cos \alpha - \frac{6}{\pi} X I_d \\ I_d = (U_{d1} - U_{d2}) / R \\ P_{d1} = 2 U_{d1} I_d \\ Q_r = P_{d1} \tan \varphi_r \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{MMC} + Q_{MMC} = \sqrt{3} U_B I_B (\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i) \\ P_{d2} = U_d I_d \\ i_{pk} = \frac{1}{3} I_d + \frac{1}{2} i_k + i_{cirk} \\ i_{nk} = \frac{1}{3} I_d - \frac{1}{2} i_k + i_{cirk} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)中: X 为每相的等效换相电抗; P_{d1} 和 Q_r 分别为直流传输功率和整流器吸收的无功功率; φ_r 为对应的功率因数。式(4)中: P_{MMC} 和 Q_{MMC} 分别为MMC吸收的有功、无功功率; U_B 和 I_B 分别为交流母线B上的电压的有效值; i_{pk} 和 i_{cirk} 分别为MMC的某相桥臂的电流值和环流值; i_k 为交流母线B的某相瞬时电流值。

2 子系统控制策略的选择

2.1 LCC-HVDC和VSC-HVDC的控制策略

文中所有LCC-HVDC系统均采用CIGRE HVDC标准测试模型的控制策略,对于VSC-HVDC系统的控制策略,已有很多文献涉及到,这里也不再赘述。

2.2 H-HVDC的控制策略

H-HVDC输电系统是一种整流侧采用LCC,逆变侧采用VSC的新型混合输电模式,该输电模式综合了LCC-HVDC和VSC-HVDC两者的优势,提高LCC-HVDC抵御换相失败能力的同时,也降低了VSC-HVDC的工程造价。整流侧(LCC)的控制策略采用CIGRE标准模型的控制方式,即定直流电流控制。该控制方式有效地限制了过电流及LCC过载;逆变侧(VSC)采用定直流电压控制和定无功功率控制,保证系统功率传输平衡,其控制器主要包括外环电压控制、内环电流控制、PLL和PWM脉冲生成部分。H-HVDC的控制框图见图2。

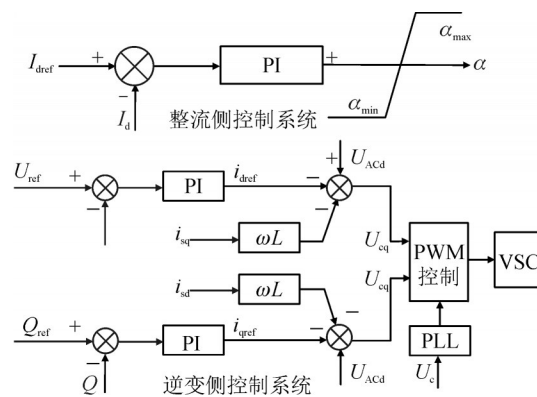


图2 H-HVDC的控制框图

Fig. 2 The control block diagram of H-HVDC

2.3 LCC-MMC HVDC的控制策略

LCC-MMC HVDC 的整流侧 LCC 采用 CIGRE HVDC benchmark mode 的控制策略, 即最小触发角控制和定直流电流控制, 保证系统功率传输平衡, 附加低压限流控制环节, 防止故障时系统的直流电压或者交流电压大幅跌; 逆变侧 MMC 采用定直流电压和定交流母线电压控制, 确保 MMC 交流测母线电压恒定, 其中 U_c 为 MMC 输出电压的有效值, U_{c2} 为 MMC 输出的交流电压, U_{AC} 为交流母线 B 上的电压^[13-14]。其控制框图见图 3。

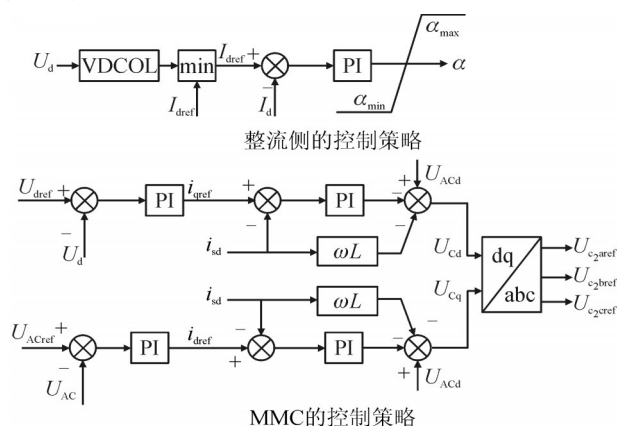


图3 LCC-MMC HVDC 的控制框图

Fig. 3 The control block diagram of LCC-MMC HVDC

3 子系统的仿真与分析

3.1 各子系统的参数设置

文中所有 LCC-HVDC 均采用 CIGRE HVDC 标准测试模型的参数, 系统输送容量为 1 000 MW, 直流额定电压、额定电流分别为 500 kV 和 0.2 kA; 对于其他不同结构的输电系统, 设定系统传输容量为 300 MW, 额定直流电压为 220 kV, 其余参数参照

CIGRE 标准模型参数和文[14-16]的系统参数。随着发达地区对电能质量、用电需求量的不断提高, 多条直流线路同时向同一负荷中心供电的现象越来越普遍, 加之, 直流输送功率越来越高, 根据短路比计算公式 $SCR = S_{ac}/P_{dN}$ 可得^[20], 其中, S_{ac} 为交流系统短路容量、 P_{dN} 为直流输送功率, 系统短路比将越来越小, 交流系统强度也越来越弱, 因而将增大传统高压直流输电系统的换相失败率。为研究文中 4 种高压直流输电系统馈入对传统高压直流输电系统的影响, 将 4 种多馈入高压直流输电电子系统的短路比设为 1.9, 即各子系统接入受端弱交流系统。

3.2 子系统的仿真与分析

3.2.1 LCC-HVDC 双馈入和含 VSC-HVDC 的双馈入子系统的运行分析

LCC-HVDC 双馈入子系统是由 2 条 LCC-HVDC 输电线路组成, 第 1 条 LCC-HVDC 为 CIGRE HVDC 标准测试模型, 含 VSC-HVDC 的双馈入输电子系统是由 1 条 LCC-HVDC 和 1 条 VSC-HVDC 构成, 系统各项参数见文 3.1 节所述; 2 种子系统中的 LCC-HVDC 均采用 CIGRE HVDC 标准测试模型的控制策略, 见文 2.1 节, VSC-HVDC 的逆变侧采用定交流电压控制方式, 维持逆变侧交流母线电压恒定, 为 LCC-HVDC 提供一定的换相电压支撑; 整流侧采用定无功功率控制和定直流电压控制方式, 保证系统功率传输平衡。

设置故障发生在 2.1 s, 运行系统, 研究 2 种子系统中 LCC-HVDC 的暂态运行特性, 仿真结果见图 4、5。图 4 为 LCC-HVDC 双馈入子系统中第 1 条 LCC-HVDC 的运行特性, 图 5 为含 VSC-HVDC 的双馈入子系统中 LCC-HVDC 的运行特性。

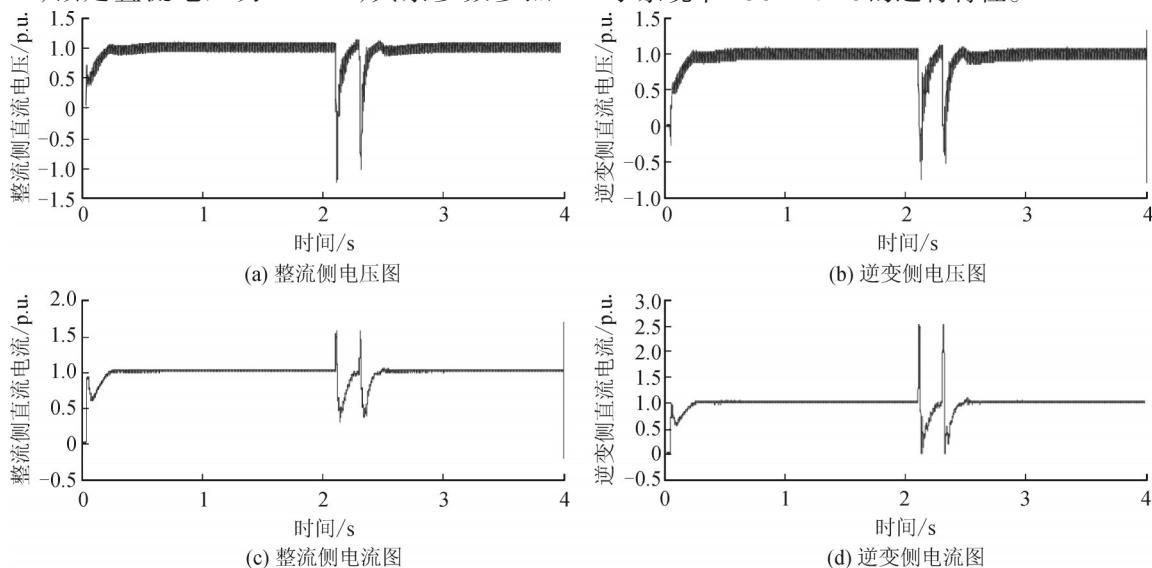


图4 LCC-HVDC 的整流侧、逆变侧电压、电流波形

Fig. 4 The voltage and current waveform of the rectifier side and the inverter side for LCC-HVDC

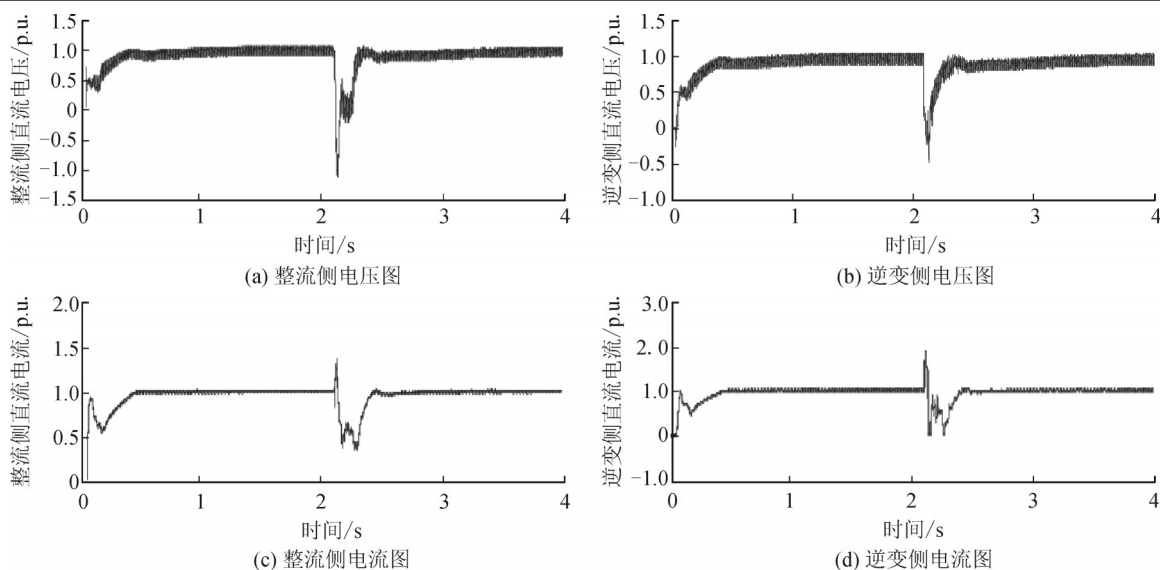


图5 LCC-HVDC的整流侧、逆变侧电压、电流波形

Fig. 5 The voltage and current waveform of the rectifier side and the inverter side for LCC-HVDC

从图4、5可知,2种子系统均在2.1s时发生短路故障,子系统整流侧、逆变侧的电压迅速下降,并且过零,尤其LCC-HVDC双馈入子系统,其整流侧直流电压跌落至-1.2 p.u.,子系统发生换相失败,直流电流也出现大幅波动,其中逆变侧冲击电流达到2.5 p.u.;与图4相比较,图5的波形得到了一定程度的改善,VSC-HVDC采用全控型电力电子器件作为换流器,本身不存在换相失败的可能,并且系统运行时,能够为LCC-HVDC提供一定的换相电压支撑,一定程度上提高了LCC-HVDC的换相失败免疫

力,对故障恢复时间也有一些改善。

3.2.2 含H-HVDC的双馈入子系统的仿真分析

该双馈入子系统是由1条LCC-HVDC输电线路和1条整流侧采用LCC、逆变侧采用VSC的H-HVDC输电线路组成,LCC-HVDC仍采用CIGRE HVDC标准测试模型的参数及控制策略;H-HVDC输电系统的传输容量为300 MW,直流电压为220 kV,控制策略见2.2节。设置故障发生在2.1s,运行系统,研究子系统中LCC-HVDC的暂态运行特性,仿真结果见图6。

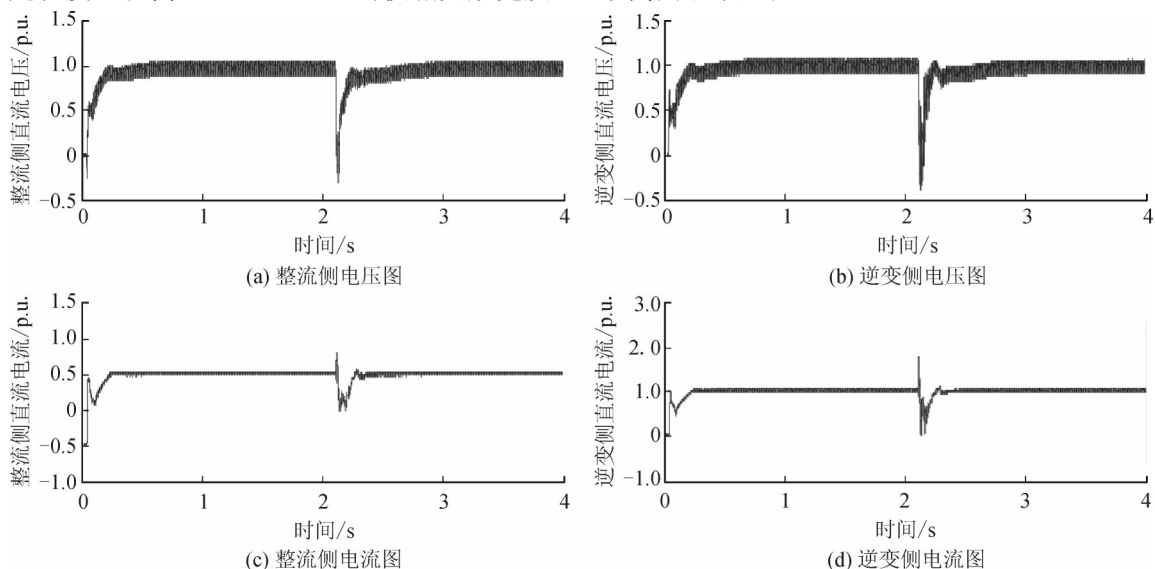


图6 LCC-HVDC的整流侧、逆变侧电压、电流波形

Fig. 6 The voltage and current waveform of the rectifier side and the inverter side for LCC-HVDC

通过图6可知,2.1s时子系统发生短路故障,与图4、5的仿真结果相比较,含H-HVDC的双馈入子系统直流电压、电流的波动幅值较小,与含VSC-HVDC的子系统相比较,整流侧的电压跌落幅值降低了约为0.4 p.u.,逆变侧冲击电流减小了约为

0.2 p.u.,并且LCC-HVDC没有出现换相失败。H-HVDC结合了传统VSC-HVDC和LCC-HVDC两者的优点,提高了LCC-HVDC的换相失败免疫力,降低VSC-HVDC的工程造价,对多馈入高压直流输电系统中LCC-HVDC的运行特性也有一定的改善。

3.2.3 含LCC-MMC HVDC的双馈入子系统的运行分析

含LCC-MMC HVDC的双馈入子系统是由1条LCC-HVDC和1条LCC-MMC HVDC构成,LCC-HVDC仍采用CIGRE HVDC标准测试模型的参数及

控制策略;LCC-MMC HVDC的整流侧为LCC、逆变侧为模块化多电平换流器MMC,其传输容量为300 MW,直流电压为220 kV,控制策略见文2.3节。设置故障发生在2.1 s,运行系统,研究子系统中LCC-HVDC的暂态运行特性,仿真结果见图7。

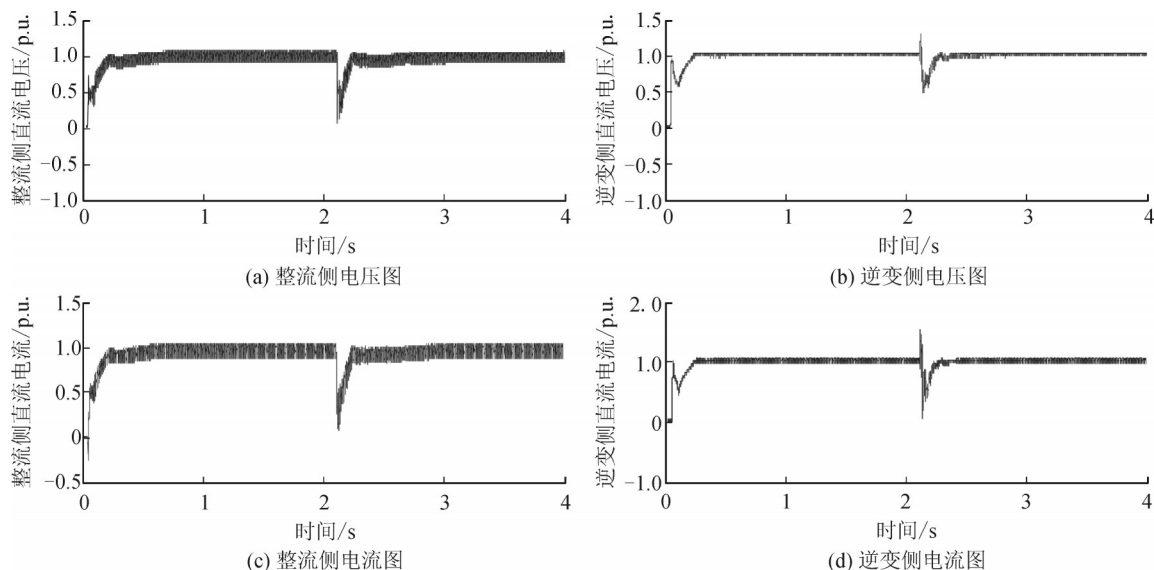


图7 LCC-HVDC的整流侧、逆变侧电压、电流波形

Fig. 7 The voltage and current waveform of the rectifier side and the inverter side for LCC-HVDC

由图7可知,LCC-MMC的馈入有效地改善了直流电压、直流电流的波形质量,与图6相比较,电压、电流的波动较小,LCC-HVDC没有发生换相失败,故障恢复特性也得到了一定程度的改善。与LCC和传统的两电平、三电平VSC相比较,MMC凭借具有较强的交流故障免疫力、低开关频率得到较优的输出波形、总开关损耗低、易扩展到不同电压和功率等级等优点迅速成为直流输电技术的研究热点。对其在电力系统上的研究,具有一定的实际意义和工程应用价值。

4 结语

以多馈入高压直流输电为例,研究了4种多馈入高压直流输电电子系统的拓扑结构,基于PSCAD/EMTDC仿真软件建立了4种多馈入高压直流输电电子系统的仿真模型,通过接入受端弱交流系统,研究了4种多馈入子系统的暂态运行特性,仿真结果表明:VSC-HVDC、H-HVDC、LCC-MMC HVDC的馈入均对LCC-HVDC的运行特性起到了一定程度的改善作用,但VSC-HVDC的工程造价高,运行时开关损耗大,制约了其发展;整流侧为LCC、逆变侧为VSC的H-HVDC结合了LCC-HVDC和VSC-HVDC的两者优势,既降低了VSC-HVDC的开关损耗和工程造价,也提高了LCC-HVDC的换相失败免疫力,改善了LCC-HVDC系统的暂态运行特性,但其运行时,逆变侧VSC需考虑功率器件动态均压、

谐波抑制等问题,以模块化拓扑设计的MMC有效地避免了传统的两电平或者三电平VSC桥臂功率器件的动态均压问题,通过低开关频率得到较优的输出波形,与LCC结合形成了LCC-MMC HVDC不仅降低了VSC-HVDC的系统成本,也解决了H-HVDC运行时存在的问题,同时LCC-MMC HVDC具有较强的交流故障免疫力,其馈入有效地提高了LCC-HVDC的抵御换相失败的能力,缩短了故障恢复时间,提高了系统的供电可靠性。

参考文献:

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 2版.北京:中国电力出版社,2004:9-11.
ZHAO Wanjun. High voltage direct current transmission engineering technology[M]. 2nd ed.Beijing:China Electric Power Publishing House, 2004:9-11.
- [2] 徐政. 交直流电力系统的动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:39-44.
XU Zheng. Dynamic behavior analysis of AC and DC power system[M]. Beijing:Machinery Industry Press, 2004:39-44.
- [3] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.
SHAO Yao, TANG Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology, 2009: 33(17): 24-30.
- [4] TEEUWSEN S P. Modeling the trans bay cable project as voltage-sourced converter with modular multilevel converter design[C]//Power and Energy Society General Meeting. Detroit, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [5] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 2015年特高压规划电网华

- 北和华东地区多馈入直流输电系统的换相失败分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10):9-15.
- SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojian, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in north china and east china power grids planned for UHV power grids in 2015[J]. Power System Technology, 2011, 35(10):9-15.
- [6] 白加林. 具有多馈入直流输电的交直流电力系统电磁暂态仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- BAI Jialin. Research on electromagnetic transient simulation of AC/DC power system with multi infeed HVDC transmission[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [7] 李春华, 孙宝奎, 赵成勇, 等. 半控型H桥子模块提高HVDC换相失败免疫力的机理[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9):2419-2427.
- LI Chunhua, SUN Baokui, ZHAO Chengyong, et al. Mechanism of semi-controlled h-bridge sub-module to improve commutation failure immunity of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9):2419-2427.
- [8] RAO H. Architecture of Nan'ao multi-terminal VSC- HVDC system and its multi-functional control[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(1):9-18.
- [9] 李 妮, 李兴源, 冯 明, 等. 改善多馈入直流系统电压无功特性的直流控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2):25-31.
- LI Ni, LI Xingyuan, FENG Ming, et al. DC control for improving voltage and reactive power characteristics of multi-infeed HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 36(2):25-31.
- [10] 刘钟淇, 宋 强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2):53-58.
- LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2):53-58.
- [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 Electro-technical Society, 2013, 28(10):301-310.
- [12] 张哲任, 徐 政, 薛英林. LCC-MMC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, 28(23):65-70.
- ZHENG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin. Calculation of DC side harmonic currents for LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 28(23):65-70.
- [13] 李程昊. 混合直流输电系统拓扑结构及关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- LI Chenghao. Research on topology and other key technologies of hybrid HVDC transmission system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.
- [14] 张宝顺. MMC型柔性直流输电系统控制策略与物理模拟系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- ZHANG Baoshun. Research on control strategy and physical emulation system of MMC-HVDC system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [15] 郭春义, 刘文静, 赵成勇. 电压源电流源混合型高压直流输电控制方法研究[J]. 中国科学, 2013, 43(11):1281-1288.
- GUO Chunyi, LIU Wenjing, ZHAO Chengyong. Research on the control method for voltage-current source hybrid-HVDC system[J]. Science China: Technological Sciences, 2013, 43(11):1281-1288.
- [16] MERLIN M M, GREEN T C, MITCHESON P D, et al. The alternate arm converter: A new hybrid multilevel converter with DC-fault blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1):310-317.
- [17] 林卫星, 文劲宇, 王少荣, 等. 一种适用于风电直接经直流大规模外送的换流器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13):2022-2030.
- LIN Weixing, WEN Jinyu, WANG Shaorong, et al. A kind of converters suitable for large-scale integration of wind power directly through HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13):2022-2030.
- [18] GUO X J, TANG Y, GUO Q, et al. Influence factors and theory for CIGRE MISC index[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9):69-74.
- [19] SON G T, LEE H J, NAM T S, et al. Design and control of a modular multilevel HVDC converter with redundant power modules for noninterruptible energy transfer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3):1611-1619.
- [20] 辛焕海, 章 枫, 于 洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016(3):633-647.
- XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: Definition and theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2016(3):633-647.
- 梅永振(1988—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化及高压直流输电。

(上接第203页)

- um compositions and thermodynamic properties considering condensed phases[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(49):5202.
- [22] HIRSCHFELDER J O, CURTIS C F, BIRD R B. Molecular theory of gases and liquids[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1964.
- [23] CHAPMAN S, COWLING T G. The mathematical theory of non-uniform gases[M]. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University, 1970.
- [24] FERZIGER J H, KAPER H G. Mathematical theory of transport processes in gases[M]. Amsterdam: North-Holland, 1972.
- [25] CRESSAULT Y, GLEIZES A. Thermodynamic properties and transport coefficients in Ar-H₂-Cu plasmas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(4):560.
- 韩桂全(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要从事电力开关设备研发工作。