

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.05.031

含风电的混合直流输电并网系统暂态特性分析

齐方方¹, 王海云¹, 常 鹏²

(1. 新疆大学教育部可再生能源发电与并网控制技术研究中心, 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力公司
经济技术研究院, 乌鲁木齐 830047)

摘要: 为了提高直流输电并网系统的暂态稳定运行特性,文中基于送端采用双馈风电机组(DFIG),建立LCC-二极管-MMC混合直流输电并网系统,研究该系统的并网暂态运行特性,其整流侧采用电网换相换流器(line commutated converter, LCC),逆变侧采用模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)。为解决MMC无法清除直流故障的问题,在逆变侧的直流出口处加装大功率二极管以阻断故障电流通路。在MATLAB/Simulink平台搭建LCC-二极管-MMC风电并网仿真模型,通过设置直流及并网点接地故障,仿真分析LCC及MMC的各种优越性。研究结果表明:该系统不存在逆变侧换相失败的问题且发生直流故障时系统中大功率二极管能够阻断故障电流通路,在故障期间逆变侧直流电压也无突增现象且有功功率波动极小,从而增强了系统的暂态稳定特性。

关键词: 混合直流输电; 电网换相换流器; 模块化多电平换流器; 暂态特性

Analysis on Transient Characteristics of Hybrid DC Transmission Connected-grid System with Wind Power

QI Fangfang¹, WANG Haiyun¹, CHANG Peng²

(1. Ministry of Education Renewable Energy Generation and Grid Control Engineering Technology Research Center, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Chinese Power Company in Xinjiang Economic Institute of Technology, Urumqi 830047, China)

Abstract: In order to improve the transient stability of the HVDC system, in this paper uses the DFIG based on sending, to establish the LCC-diode-MMC hybrid DC transmission network system, and study the grid-connected transient operation characteristics of the system, the rectifier side using the line commutated converter (line commutated converter, LCC), inverter side using modular multilevel converter (modular multilevel converter, MMC). In order to solve the problems of the MMC can't remove the DC fault, install the high power diode at the DC outlet of the inverter side to block the fault current path. In the MATLAB/Simulink platform, LCC-diode-MMC wind power grid simulation model is established. The superiority of LCC and MMC is analyzed by setting the DC and grounding fault. The results show that the system does not have the problem of inverter phase commutation failure and the high-power diode in the system can block the fault current path when the DC fault occurs, during the fault, the DC voltage of the inverter side does not increase and the active power fluctuates very small, thus enhancing the system's transient stability characteristics.

Key words: hybrid DC transmission; line commutated converter; modular multilevel converter; transient performances

收稿日期:2018-11-26; 修回日期:2019-01-19

基金项目:国家自然科学基金(51667020);自治区重点实验室项目(2016D3021)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51667020), Autonomous Region Key Laboratory Program (2016D3021).

0 引言

传统的直流输电(LCC-HVDC)技术愈加成熟,LCC-HVDC可以远距离输电,输送容量大,但因采用的半控型器件,所以存在逆变站换相失败的问题,造成大量的无功功率损耗^[1-2]。随着电力电子元件的发展,VSC-HVDC在输电领域的应用愈加普遍,因其不存在换相失败,可以实现无功与有功的独立解耦,还可以适用于城市电网以及偏远山区,实现为无源网络供电等众多优点,而被工业界和学术界广泛青睐^[3]。为了避免柔性直流输电和高压直流输电的缺点,并充分发挥各自的优点,混合直流输电成了现在研究的热点^[4]。

文[5-7]通过对高压直流输电和柔性直流输电的技术特点进行比较和总结,对结合二者优点的LCC-VSC结构混合直流输电系统进行了研究;文[8]提出了利用并联混合直流输电系统向无源网络输电的思路,并且分析了该输电系统的稳态和暂态特性;文[9]分别对比研究了传统的双馈入输电系统和并联混合直流输电系统的暂态和稳态运行特性;文[10]分析了一种送端选择LCC-VSC,受端选择以全控器件的电流源型VSC为基础的混合直流输电系统,并且详细地论述了其潮流反转的方式,对故障期间系统的恢复特性进行了实验仿真;文[11-13]主要针对传统高压直流输电的控制策略、参数的设计以及系统的运行特性等进行了研究,并且做出实验仿真验证;文[14-15]详细论述了VSC-HVDC的参数设计、控制保护方式等方面的问题,并且通过建模对以上方面进行仿真验证。

上面文献大多针对混合直流输电向无源负荷供电以及对混合直流输电的拓扑结构和机理进行了介绍,对整个双馈风电机组(DFIG)接入混合直流输电系统的暂态特性分析还需进一步地研究探讨。文中主要是基于DFIG建立风电场模型,包含DFIG的数学模型以及控制方式,通过设置直流及并网点接地故障,分析并网故障情况下系统的暂态稳定特性与柔性直流输电的暂态特性进行对比,研究结果表明:在并网点故障期间混合直流输电LCC-二极管-MMC大大降低了VSC-HVDC直流电压的上升幅度,该系统不存在逆变侧换相失败的问题,在发生直流故障时系统中大功率二极管 D_p 能够阻断故障电流通路,可以看出,LCC-二极管-MMC输电系统对电能质量有极大地提高。

1 混合直流输电系统结构及模型

1.1 双馈风电机组的数学模型

双馈风电机组的构成含有风力机、齿轮箱、双馈式感应发电机和一组背靠背的双PWM变流器及其变频控制器等。此外,转子侧的绕组和电网的连接通过背靠背VSC,而定子侧绕组则直接和电网连接,因DFIG具有变速恒频的特点,可以将风能的捕获率达到最大,通过VSC就可以让风力发电机组实现无功与有功的独立解耦,因此,DFIG机组无需无功补偿的装置。DFIG基本结构图见图1。

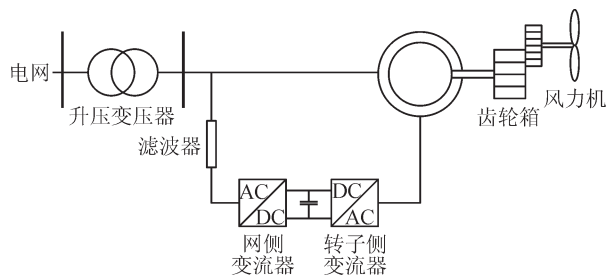


图1 DFIG基本结构图

Fig. 1 DFIG basic structure

如图1所示,DFIG在 dq 同步坐标轴系下的数学模型为^[16]

$$\begin{cases} u_{sd} = -L_s \dot{P}i_{sd} + \omega L_s i_{sq} + L_m \dot{P}i_{rd} - \omega L_m i_{rq} \\ u_{sq} = -\omega L_s i_{sd} - L_s \dot{P}i_{sq} + L_m \dot{P}i_{rd} + L_m \dot{P}i_{rq} \\ u_{rd} = -L_m \dot{P}i_{sd} + \omega L_m i_{sq} + L_r \dot{P}i_{rd} - \omega L_r i_{rq} \\ u_{rq} = -\omega L_m i_{sd} - L_m \dot{P}i_{sq} + \omega L_r i_{rd} + L_r \dot{P}i_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: u 、 i 分别是电压及电流;角标 r 是转子的物理量;角标 s 是定子物理量;角标 d 与 q 依次是各电气量 d 与 q 轴的分量; L 是等效的电感; s 代表转差率;角标 s 和 m 分别为自感与互感; p 表示微分算子; ω 是旋转角速度。

1.2 LCC-二极管-MMC拓扑结构

为了便于分析,文中以单极的LCC-二极管-MMC输电系统作为研究的对象,见图2。送端采用LCC型的结构,且整流侧采用的是12脉动VSC由 $Y0/\Delta$ 与 $Y0/Y$ 两种不同接线方法的6脉动换流器串联而成。受端采用MMC型结构,且在逆变侧的直流母线处设置一个功率极大的二极管 D_p 来处理直流故障时的电流^[17]。

1.3 LCC-二极管-MMC数学模型

U_1 为电压的有效值, U_{d1} 、 I_d 及 P_{d1} 分别为直流电压、电流和功率, Q_{c1} 为VSC吸收的无功功率, X_d 为换相电抗, $\cos\varphi$ 为功率因素, α 为触发时的延迟角, μ 为换相重叠角, U_{d2} 为逆变站的直流电压。数学式为^[18]:

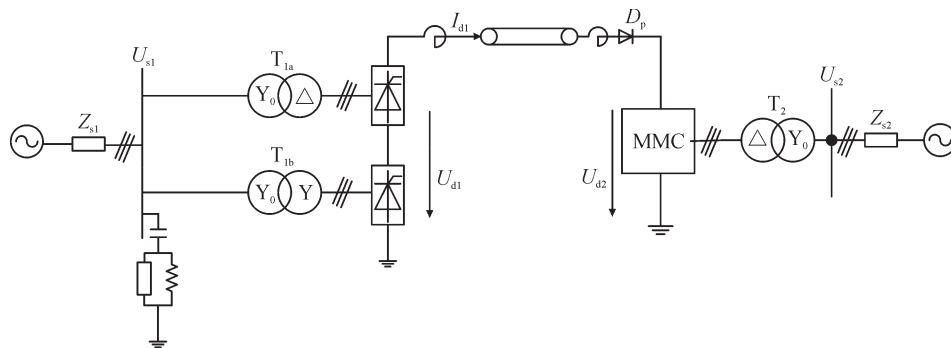


图2 LCC-二极管-MMC结构示意图

Fig. 2 LCC-diode-MMC structure diagram

$$U_{d1} = 2.7U_1 \cos \alpha - \frac{6}{\pi} X_{r1} I_d \quad (2)$$

$$\cos \phi = 0.5 [\cos \alpha + \cos(\alpha + u)] \quad (3)$$

$$I_d = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{R} \quad (4)$$

$$Q_{c1} = P_{d1} \tan \phi \quad (5)$$

$$P_{c1} = 2U_{d1} I_d \quad (6)$$

2 基本控制策略

为了使得系统具有稳定的运行特性,必须确保

换流站有极高的可靠性,逆变侧换流站外环控制器和内环控制器的基本原理见图3,图3中,下标ref表示参考值,把实际值和参考值加以比对,其偏差值经过PI调节后,就可以得出电流内环值,最后对 i_d 和 i_q 进行调控,就可以达到有功与无功的独立解耦控制的目的。其中, P_{ref} 和 Q_{ref} 分别表示有功和无功的参考量,控制器的组成包括内环电流控制器,PWM触发的环节以及PLL环节。电流环控制器的作用就是实现换流站交流侧相位与电压的调控以便迅速地追踪电流的参考值。

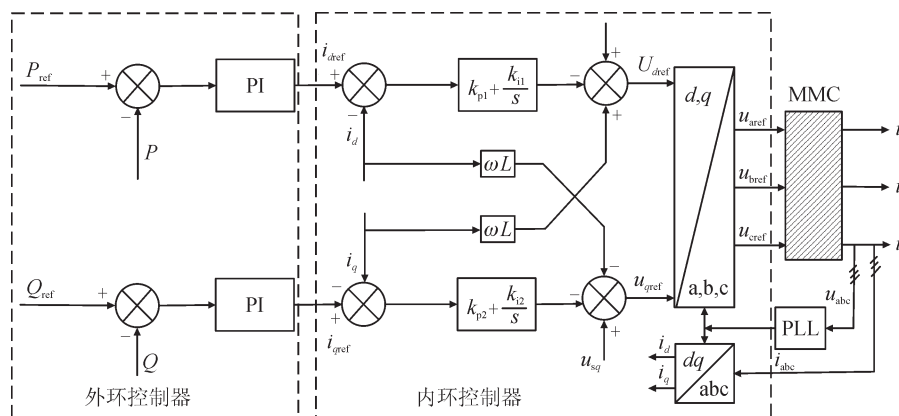


图3 逆变侧VSC控制框图

Fig. 3 Inverter side VSC control block diagram

2.1 整流侧LCC数学模型及控制策略

LCC-二极管-MMC输电系统LCC侧等效电路结构图,见图4。

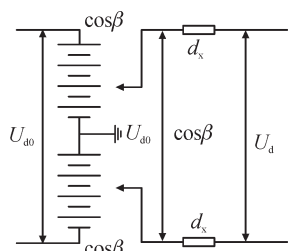


图4 LCC侧等效电路结构图

Fig. 4 LCC side equivalent circuit diagram

直流电压数学式^[19]为:

$$U_{d0} = \frac{6\sqrt{2}E}{\pi T} \quad (7)$$

$$\Delta U_d = 0.5U_{d0}(\cos \alpha + \cos \gamma) = U_{d0}I_d = 2d_x I_d \quad (8)$$

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha - \Delta U_d = U_{d0} \cos \alpha - 2d_x I_d \quad (9)$$

式(7)-(9)中: U_{d0} 、 E 、 d_x 、 α 、 γ 分别是LCC侧的相控空载的直流电压、交流母线电压、等效电抗、超前的触发角、关断角; T 是变压器的电压变比。

在LCC-二极管-MMC输电系统中,为了提高输电系统运行的稳定性,送端LCC直流电压的控制是通过调控 α 实现的,因此就能够保证为受端MMC供给功率输送所需直流电压的稳定性。整流侧LCC选择定直流电压的控制方式,由前面LCC数学模型可以得到的控制方式见图5。

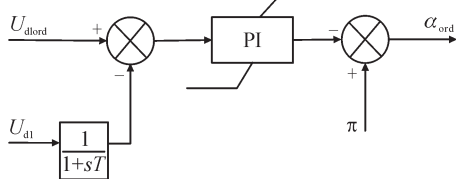


图5 LCC定直流电压控制框图

Fig. 5 LCC constant DC voltage control block

2.2 逆变侧MMC数学模型及控制策略

逆变侧MMC的控制系统包括内、外环控制器和阀组级控制器组成,此外,外环控制器的控制策略采用定无功和定有功功率。其中模块化多电平换流器是由三相六桥臂所组成,而每一个桥臂都含有几个半桥子模块及一个电抗器组成。其中子模块有闭锁、切除和投入3种运行模式。

内环电流控制器的控制方式选用电网电压的前馈和电流解耦流控制,这对内环电流控制器的跟踪特性有极大的提高。

MMC数学模型为^[20]

$$\begin{cases} L_{eq} \frac{di_a}{dt} = u_{sa} - u_a - R_{eq} i_a \\ L_{eq} \frac{di_b}{dt} = u_{sb} - u_b - R_{eq} i_b \\ L_{eq} \frac{di_c}{dt} = u_{sc} - u_c - R_{eq} i_c \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 为电网的相电压; i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为相电流; R_{eq} 、 L_{eq} 为换流电抗器的电阻值和电感值。经Park变换后,把式(3)变换成两相旋转坐标下,得

$$\begin{cases} L_{eq} \frac{di_d}{dt} = u_{sd} - u_d - R_{eq} i_d + \omega L_{eq} i_q \\ L_{eq} \frac{di_q}{dt} = u_{sq} - u_q - R_{eq} i_q - \omega L_{eq} i_d \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: u_{sd} 、 u_{sq} 是电网电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为交流侧电流的 d 、 q 轴分量; u_d 、 u_q 为MMC交流侧输出电压基波的 d 、 q 轴分量。

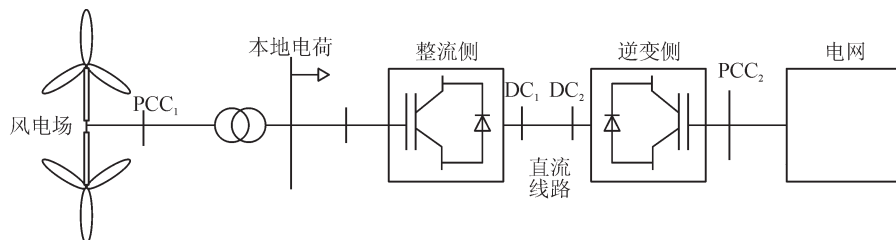


图7 柔性直流输电外送系统

Fig. 7 Flexible HVDC system to be delivered to the outside

3.1 逆变侧并网点故障实验仿真对比分析

在 $t=6$ s时在逆变侧并网点处设置三相对称接地短路,故障持续时间为0.3 s。

实验仿真结果见图8。

仿真见图8,并网点故障期间,采用VSC-HVDC

外环控制器的目的就是为了确保输电系统功率均衡与直流电压的可靠稳定性,所以输电系统中一定要有一端的换流器选择定直流电压的控制方式,以确保输电系统的稳定运行。其他换流站可使用定有功或者定频率的控制策略,因此送端换流站选择的控制策略为定无功和定直流电压,实现方式见图6。

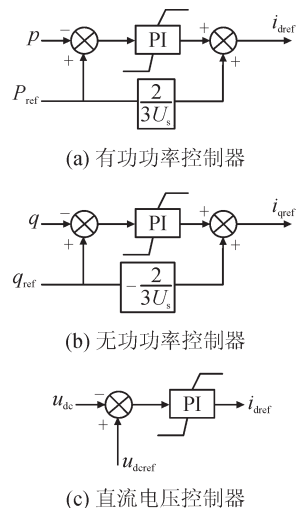


图6 外环控制器结构框图

Fig. 6 The outer loop controller structure diagram

3 仿真研究

文中主要是对风电场经LCC-二极管-MMC和VSC-HVDC方式分别接入到电网,在并网点发生故障时,对比分析其系统的暂态稳定特性。风电场使用40台DFIG构成额定的容量是80 MW,输电距离为100 km,额定的电压为 ± 100 kV,整流侧LCC选择定直流电压的控制方式,逆变侧MMC的控制系统采用内、外环控制方式。其中:LCC-二极管-MMC输电系统见图2,VSC-HVDC输电系统见图7。

接入电网,受端的母线电压会迅速跌落,不能确保故障时仍能向电网输送功率,同时有功功率出现大幅度降低,波动性较大,直流电压也出现突增,会造成系统失去稳定。而采用LCC-二极管-MMC接入电网,受端母线电压、有功功率及直流电压在并网点

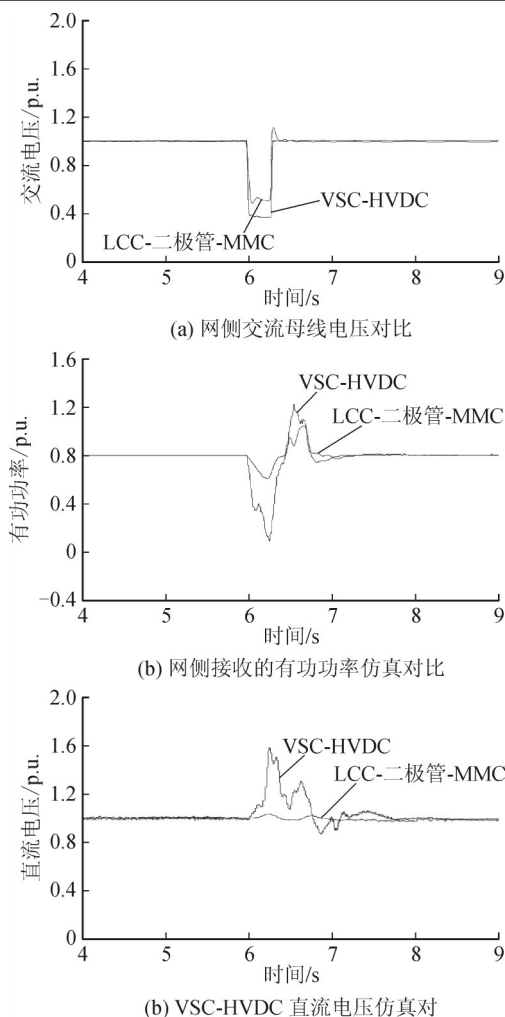


图8 逆变侧并网故障实验仿真对比分析

Fig. 8 Inverter side and network fault simulation analysis

故障期间也存在波动,但波动都比较小,而且在系统发生故障之后可以快速恢复输电系统的稳定性且平稳运行,从而提高系统的运行特性,这证明逆变侧的MMC在并网点发生故障时其耐受能力很强,从而使得输送的功率损失很小。经上述实验仿真对比表明:在并网点发生故障时,采用LCC-二极管-MMC输电系统能够有效地遏制并网直流电压的上升幅度,确保直流电压稳定,同时LCC-二极管-MMC系统不会出现类似传统高压直流输电系统逆变侧换相失败的情况,实现了良好的风电并网系统的暂态运行特性。

3.2 直流故障仿真

在 $t=6\text{ s}$ 时发生直流接地故障,持续时间为 0.4 s ,实验仿真结果见图9。

由图9所示,6 s时出现直流接地故障,送端直流电压骤降,同时出现很大的故障电流,输出的直流电流也迅速下降至0,因此导致输送到整流站的有功功率骤降到极小值。因为整流侧有LCC的缘故,整流侧VSC会向交流侧电网输送极大的无功,在直流发生故障时逆变侧的直流电流会迅速地降

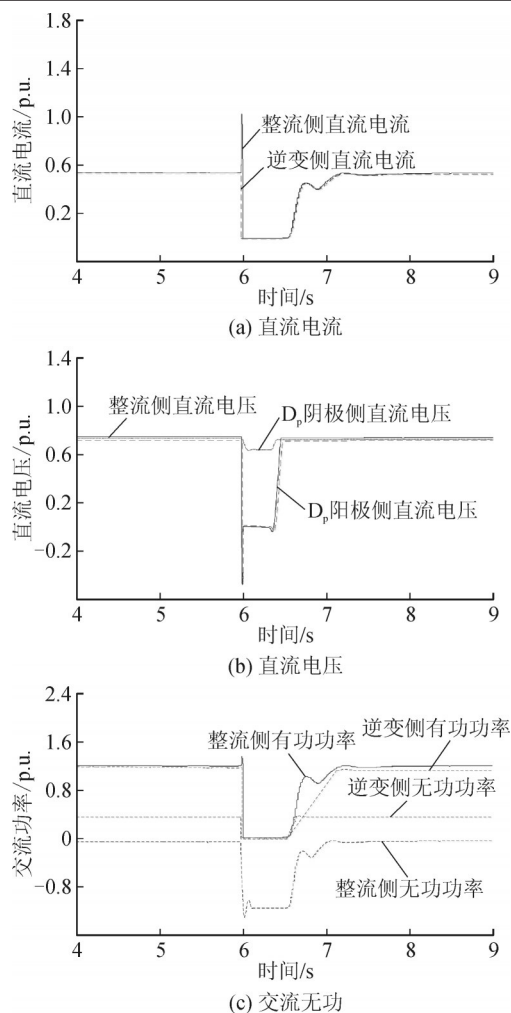


图9 LCC-二极管-MMC直流故障仿真图

Fig. 9 LCC-diode-MMC DC fault simulation diagram

至0,同时逆变侧 D_p 两端承受反向电压,说明二极管 D_p 能在直流发生故障时切断原来存有故障电流的通路,从而能够清除直流故障线路,避免了直流故障时过电流对受端的交流系统产生的损害, D_p 的主要作用是切除直流线路故障,同时在故障切除后,重启输电系统能够恢复到稳态运行。

4 结论

文中基于送端采用LCC,受端采用MMC建立混合直流输电LCC-二极管-MMC并网系统,研究该系统在并网点以及直流故障期间的暂态运行特性,并对比分析了该系统与柔性直流输电系统接入电网发生故障时的响应特性,得到以下结论:

1)并网点故障期间,LCC-二极管-MMC并网系统的有功功率及直流电压波动特别小,在故障切除后可以迅速的恢复,并可持续稳定的运行,这大大提高了系统的暂态稳定特性。

2)LCC-二极管-MMC并网系统并无出现LCC-

HVDC 逆变侧发生换相失败的现象。

3)系统中大功率二极管 D_p 能够切除直流线路故障,在故障切除后,重启并网系统能够迅速恢复到稳态运行,从而增强了系统的暂态稳定特性。

参考文献:

- [1] 刘羽超,郭春义,许韦华,等.一种降低直流输电换相失败概率的控制方法[J].电网技术,2015,39(1):76-82.
LIU Yuchao, GUO Chunyi, XU Weihua, et al. A control method to reduce commutation failure probability in HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2015, 39(1):76-82.
- [2] 徐政,王世佳,李宁臻,等.适用于远距离大容量架空线路的LCC-MMC串联混合型直流输电系统[J].电网技术,2016,40(1):55-63.
XU Zheng, WANG Shijia, LI Ningcan, et al. A LCC and MMC series hybrid HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):55-63.
- [3] 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.
TANG Guangfu. Based on voltage source inverter of high-voltage direct current transmission technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [4] 赵成勇,郭春义,刘文静.混合直流输电[M].北京:科学出版社,2014.
ZHAO Chengyong, GUO Chunyi, LIU Wenjing. Hybrid DC transmission[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [5] 李广凯,李庚银,梁海峰,等.新型混合直流输电方式的研究[J].电网技术,2006,30(4):82-86.
LI Guangkai, LI Gengyin, LIANG Haifeng, et al. Research on a novel hybrid HVDC system[J]. Power System Technology, 2006, 30(4):82-86.
- [6] LI Guangkai, LI Gengyin, LIANG Haifeng, et al. Operational mechanism and characteristic analysis of novel hybrid HVDC system[C]//International Conference on Power System Technology. [S.l.]: IEEE, 2006: 1-6.
- [7] LI Guangkai, LI Gengyin, LIANG Haifeng, et al. Research on hybrid HVDC[C]//International Conference on Power System Technology. [S.l.]: IEEE, 2004: 1607-1612.
- [8] GUO Chunyi, ZHAO Chengyong. Supply of an entirely passive AC network through a double-infeed HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(11): 2835-2841.
- [9] GUO Chunyi, ZHANG Yi, GOLE A M, et al. Analysis of dual-infeed HVDC with LCC-HVDC and VSC-HVDC[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2012, 27(3): 1529-1537.
- [10] 薛英林,徐政,潘武略,等.电流源型混合直流输电系统建模与仿真[J].电力系统自动化,2012,36(9):98-103.
XUE Yinglin, XU Zheng, PAN Wulue, et al. Modeling and simulation for a hybrid current source converter high voltage direct current transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9):98-103.
- [11] 杨汾艳.直流输电系统主回路和控制器参数优化选择研究[D].杭州:浙江大学,2007:39-104.
YANG Fenyan. Research on parameter optimization of main circuit and controller of HVDC transmission system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 39-104.
- [12] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. A benchmark model for hvdc system studies[C]//International Conference on AC and DC Power Transmission. [S.l.]: IET, 1991: 374-378.
- [13] 杨汾艳,徐政.直流输电系统平波电抗器电感参数的选择研究[J].高压电器,2009,45(3):8-10.
YANG Fenyan, XU Zheng. Selection of smoothing reactance for HVDC projects[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3):8-10.
- [14] 赵成勇,李金丰,李广凯.基于有功和无功独立调节的VSC-HVDC控制策略[J].电力系统自动化,2005,29(9): 20-24.
ZHAO Chengyong, LI Jinfeng, LI Guangkai. VSC-HVDC control strategy based on respective adjustment of active and reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9):20-24.
- [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(技术科学),2013,43(11):1281-1288.
GUO Chunyi, LIU Wenjing, ZHAO Chengyong. Research on the control method for voltage-current source hybrid-HVDC system[J]. Scientia Sinica Technologica, 2013, 43(11):1281-1288.
- [16] 苏常胜,李凤婷,武宇平.双馈风电机组短路特性及对保护整定的影响[J].电力系统自动化,2011,35(6):86-91.
SU Changsheng, LI Fengting, WU Yuping. An analysis on short-circuit characteristic of wind turbine driven doubly fed induction generator and its impact on relay setting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6):86-91.
- [17] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2013.
XU Zheng. Flexible HVDC System[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [18] 赵晓君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
ZHAO Wanjun. High-voltage direct current transmission engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [19] 徐政.交直流电力系统动态行为分析[M].北京:机械工业出版社,2004.
XU Zheng. AC/DC power system dynamic behavior analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [20] 于凯.基于MMC的直流输电系统控制策略研究[D].北京:北方工业大学,2012.
YU Kai. Research on control strategy of DC transmission system based on MMC[D]. Beijing: North China University of Technology, 2012.

齐方方(1990—),女,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电和电力系统稳定与控制等方面的研究。

王海云(1973—),女,博士,教授,硕士生导师,研究方向为风电并网技术和高压直流输电与电力系统稳定性等方面的研究。