

一种研究 ± 660 kV 银东直流动态特性的建模方法

郭启伟, 孙兆国, 侯慧军, 闫百祥

(国网山东省电力公司检修公司, 济南 250118)

摘要: 银东直流输电工程额定直流电压为 ± 660 kV, 是世界首个该电压等级的直流输电工程。笔者基于 PSCAD 电磁暂态仿真软件提出了一种研究分析银东直流系统动态特性的建模方法, 该方法密切结合该直流设计数据, 对银东直流的控制系统和主电路详细建模, 并结合现场故障录波数据图形进行了准确性验证。该方法对直流系统的稳定运行和故障分析有一定的指导意义。

关键词: 直流系统; PSCAD; 建模; 动态特性

中图分类号: TM721.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)10-0056-07

Modeling Approach for the Study of ± 660 kV Yindong HVDC Dynamic Characteristics

GUO Qiwei, SUN Zhaoguo, HOU Huijun, YAN Baixiang

(State Grid Company of Shandong Province Power Maintenance Company, Jinan 250118, China)

Abstract: The rated voltage of Yindong HVDC system is ± 660 kV. It is the first ± 660 kV HVDC project in the world. A modeling method for analyzing the dynamic characteristics of the Yindong HVDC system is presented based on PSCAD electromagnetic transient simulation software. This method directly uses the designed data of the HVDC project, and the models of the control system and the main circuit are established in detail. Its accuracy is verified with the actual fault data through the recorded fault waveform and data on site. It is showed that this method has a certain reference to the stable operation and the fault analysis of the HVDC transmission system.

Key words: HVDC system; PSCAD; modeling; dynamic characteristics

0 引言

银东直流输电工程额定直流电压为 ± 660 kV, 是世界首个该电压等级的直流输电工程。虽然其在现存的直流电压等级序列中不是最高, 但因其设计特点决定了其换流变容量, 换流阀规模等其他主设设备都超过了 ± 800 kV 直流输电使用要求。因此从某些设备的运行角度而言, 银东 ± 660 kV 直流输电带来的运行挑战不亚于目前在建或已经投运的 ± 800 kV 直流工程。银东 ± 660 kV 直流输电工程对于运行、维护以及检修的技术挑战也是空前的, 所以无论对于系统运行方式, 还是技术监督, 针对该工程的技术储备都显得尤为重要^[1-8]。

笔者在 PSCAD 电磁暂态仿真软件中基于工程实际数据建立银东直流模型, 重点介绍了直流控制

系统的建模分析。并对银东 ± 660 kV 直流系统设置故障, 通过其动态特性与现场故障录波数据的对比来验证建模的准确性, 该建模方法对银东直流系统的稳定运行和故障分析有一定的指导意义。

1 银东直流系统仿真模型说明

通过 PSCAD 软件建立的银东直流系统仿真模型包括控制系统和主电路。控制系统和主电路的建模框架见图 1。

银东直流系统主电路结构见图 2, 其等值电路见图 3。

图 3 中: U_{oi} 、 U_{oj} 分别为整流侧和逆变侧换流变压器直流侧的交流电压方均根值; α 、 β 分别为整流器的触发延迟角和逆变器的超前触发角; R_{ci} 、 R_{cj} 分别为直流平波电抗器和换流变压器以及整流器、逆变器的损耗对应的电阻; R_{dc} 为直流输电线路的电

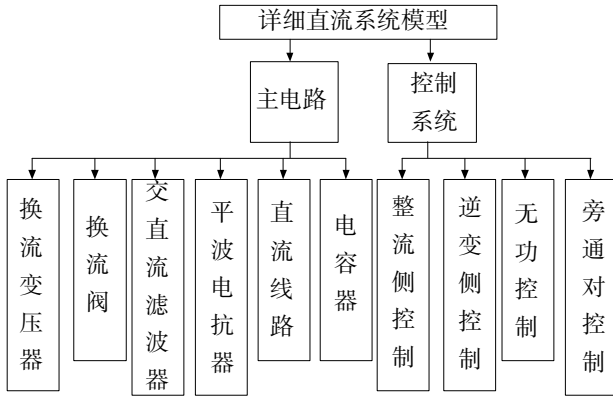


图1 直流系统的总体建模框架

Fig. 1 Modeling framework of the HVDC system

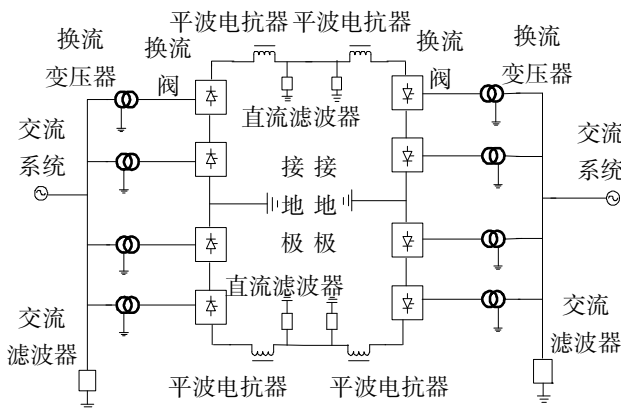


图2 银东±660 kV 直流输电系统结构

Fig. 2 Architecture of the ±660 kV Yindong HVDC system

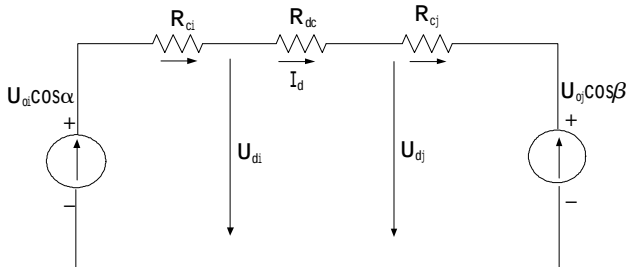


图3 银东直流输电等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of Yindong HVDC system

阻; U_{d1} 、 U_{d2} 分别为整流器、逆变器直流电抗器出口的直流输电侧直流电压; I_d 为直流电流。

银东直流输电系统的运行, 按照直流系统一次接线方式的不同, 可分为双极运行、单极大地回线运行等方式。其中双极运行为正常方式, 单极运行为特殊方式。从稳态运行方式的计算分析来看, 无论双极运行或者单极运行, 都可采用图3所示的等值电路, 用相同的稳态运行基本方程式描述^[9-13]。

由图3可得, 两端直流输电稳态运行方式直流系统的方程式是^[14-17]

$$U_{d1} \cos \alpha = (R_{cl} + R_{dc} + R_{cj}) I_d + U_{d2} \cos \beta. \quad (1)$$

由式(1)得出直流线路电流为

$$I_d = \frac{U_{d1} \cos \alpha - U_{d2} \cos \beta}{R_{cl} + R_{dc} + R_{cj}}. \quad (2)$$

直流电压 U_{d1} 、 U_{d2} 由图3可得:

$$U_{d1} = U_{d1} \cos \alpha - R_{cl} I_d; \quad (3)$$

$$U_{d2} = U_{d2} \cos \beta + R_{cj} I_d. \quad (4)$$

不难得出直流输送功率为:

$$P_{d1} = U_{d1} I_d; \quad (5)$$

$$P_{d2} = U_{d2} I_d. \quad (6)$$

直流输电的运行方式取决于整流侧和逆变侧换流器的控制方式。控制系统是直流系统的核心, 也是模型正确建立的关键。正常工况下银东直流系统整流侧为定电流控制, 其控制逻辑模型可以采用 CIGRE 标准定电流控制。由于银东直流系统采用阿海珐公司的换流阀, 无法实测熄弧角大小, 所以逆变侧无法采用 CIGRE 标准定熄弧角控制, 结合许继公司的设计理念, 逆变侧采用修正的预测熄弧角控制。此外, 整流侧和逆变侧都配有低压限流(VDCOL)控制^[18-21]。整流侧与逆变侧的控制模型分别见图4、5。

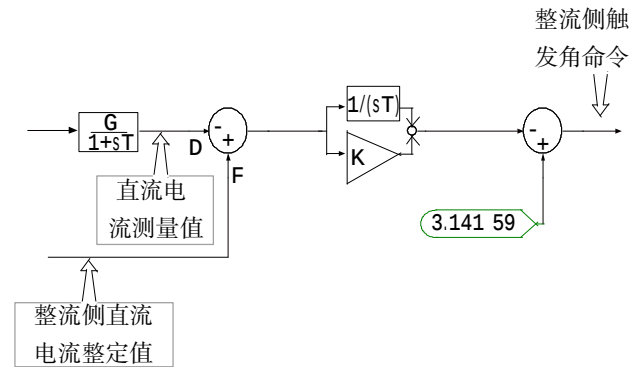


图4 整流侧控制模型

Fig. 4 Control model of the rectifier side

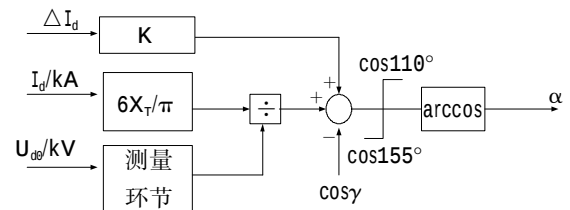


图5 逆变侧控制模型

Fig. 5 Control model of the inverter side

修正的预测熄弧角控制属于开环型控制器, 该控制器原理见式(7)^[22-25]。

$$\cos \alpha = \frac{6X_r}{\pi} \times \frac{I_d}{U_{d0}} - \cos \gamma. \quad (7)$$

式(7)中: α 为逆变侧的触发延迟角; X_r 为换相电抗; I_d 为每极直流额定电流; U_{d0} 为逆变侧换流变压器直流侧的交流电压方均根值; γ 为额定方式下的关断角(17°)。

银东直流系统的无功控制在仿真中需要遵照的

投切原则是:

1) 控制好系统交换无功功率在死区内, 整流侧银川换流站与交流系统无功交换量的设计死区为 90 Mvar, 逆变侧青岛换流站与交流系统无功交换量的设计死区为 117 Mvar。

2) 投切顺序。按照 A B A B C A B 的顺序投切, 其中对整流侧来说, A 是 HP11/13, B 是 HP24/36, C 是 HP3; 对逆变侧来说, A 是 HP12, B 是 HP24/36, C 是 HP3。无功控制具体投切策略见表 1、2。

表 1 银东直流整流侧双极全压策略

Tab. 1 The rectifier bipolar full voltage tactics of Yindong HVDC system

直流功率 P_d/MW	最小滤波器	
	性能	定值
解锁前	A 或 B 或 C	A 或 B 或 C
$0 \leq P_d \leq 800$	A + B	—
$800 < P_d \leq 1\ 000$	—	A + B
$1\ 000 < P_d \leq 1\ 800$	2A + B	—
$1\ 800 < P_d \leq 2\ 000$	—	2A + B
$2\ 000 < P_d \leq 3\ 600$	2A + 2B	—
$3\ 600 < P_d \leq 4\ 400$	—	2A + 2B
$4\ 400 < P_d \leq 4\ 800$	2A + 2B + C	2A + 2B + C

表 2 银东直流逆变侧双极全压策略

Tab. 2 The inverter bipolar full voltage tactics of Yindong HVDC system

直流功率 P_d/MW	最小滤波器	
	性能	定值
解锁前	A 或 B 或 C	A 或 B 或 C
$0 \leq P_d \leq 600$	A + B	—
$600 < P_d \leq 800$	—	A + B
$800 < P_d \leq 1\ 600$	2A + B	—
$1\ 600 < P_d \leq 2\ 000$	2A + 2B	2A + B
$2\ 000 < P_d \leq 3\ 600$	2A + 2B + C	2A + 2B

基于工程实际, 需要在银东直流系统模型中加入旁通对控制逻辑, 见图 6。

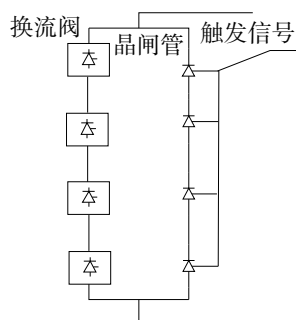


图 6 银东直流 12 脉动换流器的旁通对模型

Fig. 6 The 12-pulse converter bypass model of Yindong HVDC system

采用图 6 所示方式, 是由于换流阀采用软件自带的集成模型, 无法触发导通特定的一对换流阀, 故采用将一对串联晶闸管并联在一个 6 脉动换流器两侧的等效方法, 由于银东直流系统采用每极 12 脉动结构, 所以采用 4 个串联晶闸管并联在一 12 脉动换流器的两侧, 当收到触发命令时, 这 4 个晶闸管同时导通, 形成投旁通对的逻辑。

银东直流系统实际的运行控制方式见表 3。

表 3 银东直流系统实际控制运行方式

Tab. 3 The actual control mode of Yindong HVDC system

运行		极 1	极 2
单极模式运行	1	单极电流	—
	2	单极功率	—
	3	—	单极电流
	4	—	单极功率
双极模式运行	1	单极电流	单极电流
	2	单极电流	单极功率
	3	单极功率	单极电流
	4	单极功率	单极功率
	5	双极功率	双极功率
	6	双极功率	单极电流
	7	双极功率	单极功率
	8	单极电流	双极功率
	9	单极功率	双极功率

针对上述控制运行方式, 笔者在 PSCAD 中设置了功率控制器和电流控制器, 并建立了控制方式转换器。控制器见图 7。



图 7 银东直流运行控制器模型

Fig. 7 Operation controller model of Yindong HVDC system

图 7 从左到右依次是极 1 电流控制、极 2 电流控制、极 1 功率控制、极 2 功率控制、极 1 控制方式转换、极 2 控制方式转换。电流的大小设置是采用标么值, 功率的大小设置采用实际值。通过该控制器可以实现表 3 所示的实际控制运行方式并可在任意时刻进行控制方式的转换。需要说明的是, 双极功率控制一般是将总功率平均分配在两个极上, 该功率控制器功率可灵活设置, 满足双极控制的要求。

2 银东直流仿真模型的准确性验证

为了验证直流系统建立的准确性使其更好地符

合工程实际, 对建好的直流模型进行了额定状态下的运行模拟。其中受端山东电网用无穷大等值电源来代替, 整流侧和逆变侧均设定为最大运行方式, 在该环境下模拟银东直流系统额定运行方式。

在实际的工程中, 功率正送方式下, 降压方式除外, 传输功率从最小功率至额定功率时, 考虑所有可

能误差在内的直流运行电压最高不应超过 680 kV, 最低不应小于 640 kV。 ± 660 kV 银东直流输电工程功率正送方式时, 从银东换流站向青岛换流站传输功率能力为: 双极运行输送 4 000 MW。逆变侧定熄弧角控制熄弧角额定情况为 17° 。系统运行后所得参数见图 8。

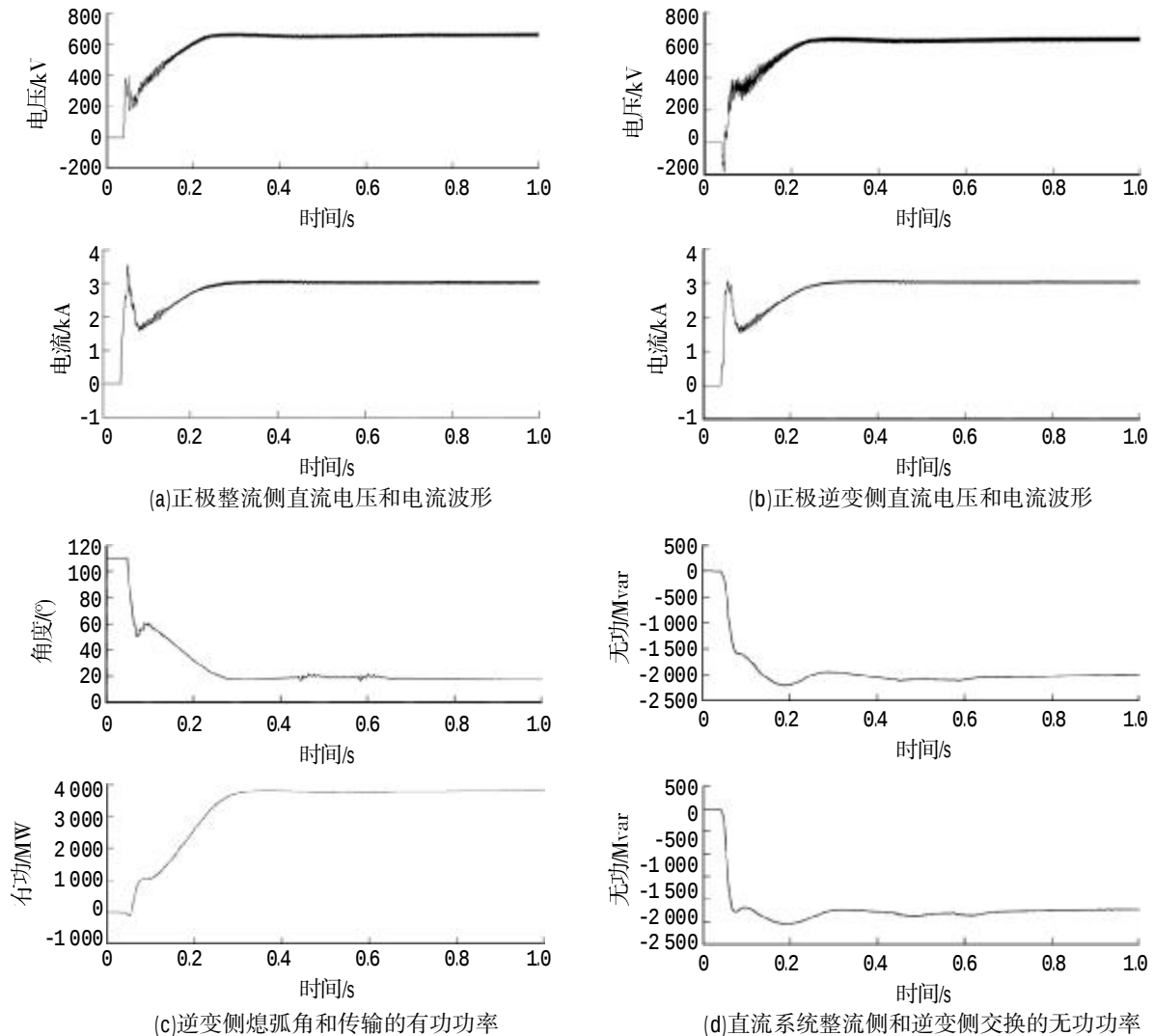


图 8 额定方式下直流系统波形

Fig. 8 Rated waveforms of HVDC system

从仿真结果可得, 两极整流侧直流电压值都介于 650~670 kV, 其值符合直流系统额定运行下的标准值, 两极整流侧直流电流是 3.05~4.00 kA, 其值也符合直流系统额定运行下的标准值。两极逆变侧直流电压为 630~650 kV, 直流电流为 3.02~4.00 kA, 两极熄弧角稳定后其值大小为 17° , 直流系统输送的有功功率约为 3 850 MW, 两侧交换的无功功率约为 2 200 Mvar, 考虑到误差允许的范围, 均与实际工程吻合。

对直流系统电流的阶跃响应和功率的阶跃响应进行仿真验证, 首先在 0.5 s 使电流指令从 1 p.u. 降

为 0.9 p.u., 0.65 s 指令从 0.9 p.u. 降为 0.8 p.u., 0.75 s 指令从 0.8 p.u. 升为 1 p.u.。仿真见图 9。

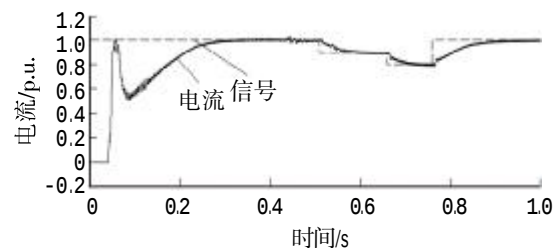


图 9 直流系统电流阶跃响应

Fig. 9 The current step response of HVDC system

从图 9 可以看出, 从给出指令下降 0.1 p.u. 到电

流实际降为指定值所用的时间在 50 ms 左右, 从给出指令上升 0.2 p.u. 到电流实际升为指定值所用的时间在 0.1 s 左右, 经过的时间都很短。电流阶跃响应特性符合要求。

进而对直流系统功率的阶跃响应验证, 在 0.5 s 使功率指令从 4 000 MW 降至 3 000 MW, 0.65 s 指令从 3 000 MW 降至 2 000 MW, 0.75 s 指令从 2 000 MW 升至 4 000 MW。仿真见图 10。

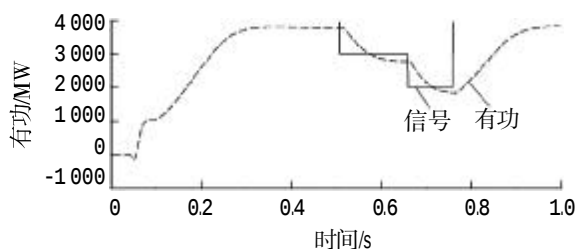


图 10 直流系统功率阶跃响应

Fig. 10 The power step response of HVDC system

从图 10 可以看出, 从给出指令下降 1 000 MW 到功率实际降为指定值所用的时间在 50 ms 左右, 从给出指令上升 2 000 MW 到功率实际升为指定值所用的时间在 0.15 s 左右, 经过的时间都很短。功率阶跃响应特性符合要求。

实际工程中银东直流系统发生换相失败时录波数据见图 11、12。

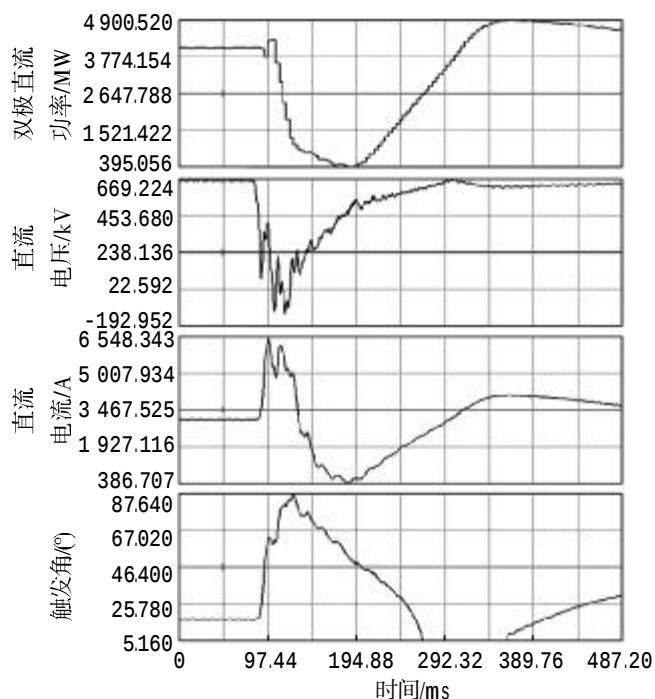


图 11 逆变侧发生换相失败时银川东站直流系统波形

Fig. 11 HVDC waveforms of Yindong side when commutation failure occurs in inverter side

通过仿真进行模拟现实中银东直流发生换相失败^[11-13], 对与逆变侧相连接的交流系统线路设置单

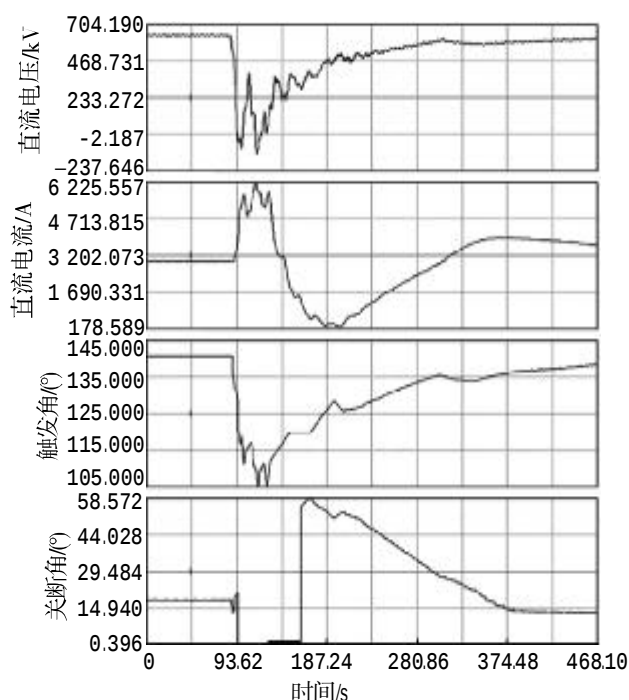


图 12 逆变侧发生换相失败时胶东站直流系统波形

Fig. 12 HVDC waveforms of Jiaodong side when commutation failure occurs in inverter side

相接地故障, 仿真波形分别见图 13、14。

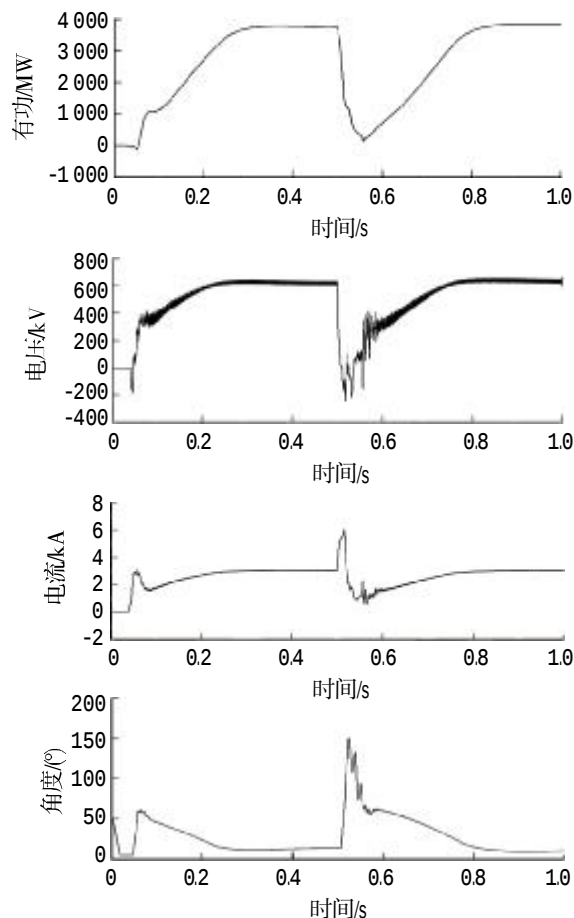


图 13 逆变侧发生换相失败时银川东站直流系统波形

Fig. 13 HVDC waveforms of Yindong side when commutation failure occurs in inverter side

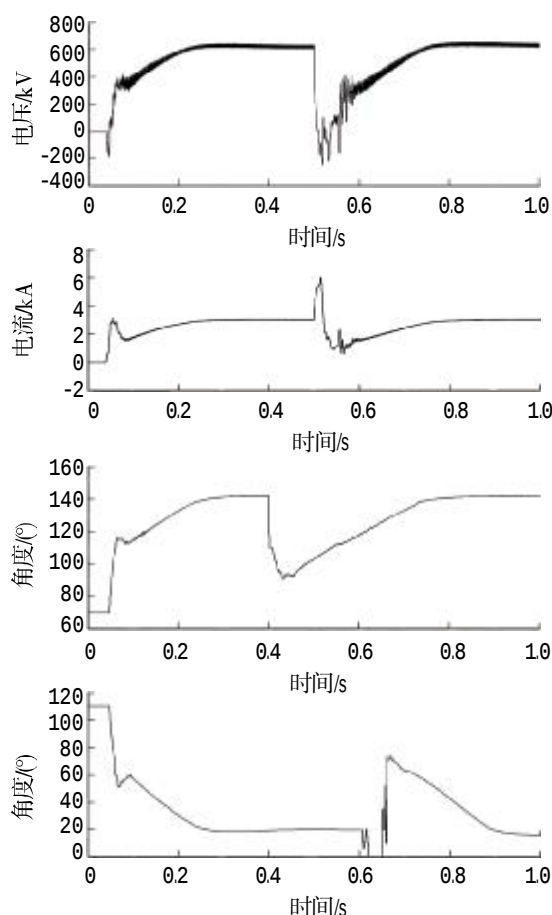


图 14 逆变侧发生换相失败时胶东站直流系统波形
Fig. 14 HVDC waveforms of Jiaodong side when commutation failure occurs in inverter side

图 11 与图 13 分别为银川东站双极直流功率、直流电压、直流电流和触发角。图 12 与图 14 分别为胶东站直流电压、直流电流、触发角和熄弧角。从图 13、14 与图 11、12 的对比来看, 实际中发生换相失败的故障录波波形与 PSCAD 中通过建模仿真得到的图形变化趋势基本一致, 这进一步印证了仿真图形的准确性和可信性。

3 结语

笔者介绍了在 PSCAD 电磁暂态仿真软件中对 ± 660 kV 银东直流系统进行建模的方法, 其中主电路和各个控制系统均根据实际数据设计并进行了适度简化, 对模型的稳态数据与动态特性数据进行了仿真分析, 并通过故障录波数据与仿真数据进行对比, 验证了该模型建立的准确性, 可以应用该直流系统模型进行进一步研究。该建模方法对银东直流系统的稳定运行和故障分析有一定的指导意义。

参考文献:

[1] IEEE Std 1204—1997 IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit

capacities[S]. New York: IEEE PES, 1997.

- [2] 黄志龙. 华东大受端电网安全稳定分析研究思路[J]. 华东电力, 2007, 35(5): 40-43.
HUANG Zhilong. Study of security and stability of large receiving end grids of East China[J]. East China Electric Power, 2007, 35(5): 40-43.
- [3] 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. HVDC engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [4] 欧开健. 南方电网交直流混合仿真系统研究与实施(一)—国内外电力系统非实时仿真技术分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(2): 24-29.
OU Kaijian. Research and application of the AC & DC hybrid simulation system in CSG Part one—Analysis on the real-time simulation technologies in the world [J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2006, 2(2): 24-29.
- [5] 陈志伟, 王冰, 赵文祥, 等. 轻型直流输电用换流变压器的设计[J]. 变压器, 2014, 51(3): 10-12.
CHEN Zhiwei, WANG Bing, ZHAO Wenxiang, et al. Design of converter transformer for HVDC light [J]. Transformer, 2014, 51(3): 10-12.
- [6] 王建民, 景崇友, 汪友华, 等. 超(特)高压直流换流变压器瞬态电磁场特性的仿真研究[J]. 变压器, 2013, 50(11): 40-43.
WANG Jianmin, JING Chongyou, WANG Youhua, et al. Simulation research on transient electromagnetic field characteristics of UHV DC converter transformer [J]. Transformer, 2013, 50(11): 40-43.
- [7] 别睿, 涂莉, 周全, 等. 同塔双回直流输电线路的感应电压仿真研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(5): 11-16.
BIE Rui, TU Li, ZHOU Quan, et al. Induced voltage simulation and study of DC transmission lines with double circuit on same tower [J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(5): 11-16.
- [8] 苏新霞, 王致杰, 陈丽娟. 柔性直流输电特点及应用前景研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(5): 35-39.
SU Xinxia, WANG Zhijie, CHEN Lijuan. Study on VSC-HVDC and its application prospect [J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(5): 35-39.
- [9] 欧开健. 南方电网交直流混合仿真系统研究与实施(二)—国内外电力系统实时仿真技术分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(3): 30-33.
OU Kaijian. Research and application of the AC&DC hybrid simulation system in CSG Part two—Analysis on the real-time simulation technologies in the world [J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2006, 2(3): 30-33.

- [10] 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. Dynamics analysis of AC and DC power systems[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004.
- [11] 刘宝宏, 殷威扬, 杨志栋, 等. ± 800 kV 特高压直流输电系统主回路参数研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 17-21.
- LIU Baohong, YIN Weiyang, YANG Zhidong, et al. Study on main circuit parameters for ± 800 kV UHVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 17-21.
- [12] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. First benchmark model for HVDC control studies[J]. Electra, 1991(135): 54-60.
- [13] 赵 勇, 苏 毅, 陈 峰, 等. 福建电网在线稳定控制系统中对华东电网实时动态等值的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 18-22.
- ZHAO Yong, SU Yi, CHEN Feng, et al. Real-time dynamic equivalence of East China Power Grid for online stability control system of Fujian power system [J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 18-22.
- [14] 许剑冰, 薛禹胜, 张启平, 等. 电力系统同调动态等值的述评[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 91-95.
- XU Jianbing, XUE Yusheng, ZHANG Qiping, et al. A critical review on coherency-based dynamic equivalences [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 91-95.
- [15] 温柏坚, 张海波, 张伯明, 等. 广东省地区电网外网等值自动生成系统设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 77-79.
- WEN Bojian, ZHANG Haibo, ZHANG Boming, et al. Design of a real-time external of sub-transmission network auto equivalence system networks in Guangdong [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 77-79.
- [16] 荆 勇, 欧开健, 任 震. 交流单相故障对高压直流输电换相失败的影响[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 60-62.
- JING Yong, OU Kaijian, REN Zhen. Impact on HVDC commutation failure of AC single phase fault [J]. High Voltage Technology, 2004, 30(3): 60-62.
- [17] 任永生, 王晓丽, 艾 飞. 交流单相故障引起直流输电换相失败的仿真研究及其预防措施[J]. 浙江电力, 2009, 10(5): 16-19.
- REN Yongsheng, WANG Xiaoli, AI Fei. Simulation study and prevention measures on HVDC commutation failures induced by single-phase ground fault in AC lines [J]. Zhejiang Electric Power, 2009, 10(5): 16-19.
- [18] 王小凤, 周 浩. ± 800 kV 特高压直流输电线路的电磁环境研究[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 109-111.
- WANG Xiaofeng, ZHOU Hao. The electromagnetic research of ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 109-112.
- [19] MAIER F K. A new closed loop control method for HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4): 1955-1960.
- [20] BUCHHOLZ B M, LEI X, RETZMANN D W. Advanced solutions for power system analysis-computer study and real-time simulation[C]//International Conference on Power System Technology. Perth, Australia: IEEE, 2000: 613-618.
- [21] 韩民晓, 文 俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- HAN Minxiao, WEN Jun, XU Yonghai. HVDC principle and operation[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008.
- [22] 张万荣, 任军辉, 王蔚华. ± 800 kV 特高压直流输电工程直流滤波器设计研究[J]. 高压电器, 2007, 43(6): 431-434.
- ZHANG Wanrong, REN Junhui, WANG Weihua. The DC filter design research of ± 800 kV UHVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 431-434.
- [23] 司马文霞, 庞 锴, 杨 庆. ± 800 kV 特高压换流站直流侧操作过电压的仿真与研究[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 126-129.
- SIMA Wenxia, PANG Kai, YANG Qing. Operation overvoltage simulation and research of ± 800 kV UHVDC system converter DC side[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 126-129.
- [24] 王 鹏, 王清让, 任 冲. 天中直流工程投产后西北电网运行控制模式研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(12): 70-74.
- WANG Peng, WANG Qingrang, REN Chong. Study on the operation control mode of northwest power grid after tianzhong DC project is put into operation[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(12): 70-74.
- [25] 刘皓明, 李晨晨, 王 瀚. 直流微电网微电源接口分析与控制策略设计[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(1): 1-7.
- LIU Haoming, LI Chenchen, WANG Hao. Interface analysis of micro-sources and control strategy design for DC microgrid [J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(1): 1-7.

郭启伟(1985—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护、高压直流输电。

孙兆国(1978—), 男, 本科, 主要研究方向为电力系统继电保护。