

DOI: 10.7667/PSPC151925

永富直流三种功率输送方式在线转换直流过电压仿真研究

贾轩涛¹, 史博伦², 胡锦涛¹, 张波¹, 苗瑜¹, 贾红光¹

(1. 国网浙江省电力公司检修分公司, 浙江 杭州 310018; 2. 哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 永富工程在进行3种功率输送方式在线转换操作时会产生不同程度的直流过电压。为了研究在线转换操作对直流过电压影响, 通过RTDS进行仿真, 在不同直流功率水平下进行功率输送方式的在线转换操作试验。根据试验数据和波形, 研究分析了直流操作过电压发生的规律和原因, 确定了功率输送方式在线转换操作的安全功率水平值。并得出如下结论: 直流操作过电压水平与直流输送功率成正比关系, 在安全功率水平下进行在线转换操作可以避免出现较大操作过电压。研究结果为工程以后的实际运行提供了参考和借鉴价值。

关键词: 直流输电工程; 功率传输模式; 操作过电压; 顺序控制; 在线转换

DC overvoltage simulation for online-switching of three power transmission modes in Yongfu HVDC project

JIA Xuanta¹, SHI Bolun², HU Jingen¹, ZHANG Bo¹, MIAO Yu¹, JIA Hongguang¹

(1. Maintenance Company of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310018, China;

2. Department of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The different levels of DC overvoltage are happened when online-switching of three power transmission modes is operated in Yongfu HVDC project. In order to research the influence of online-switching operation on DC overvoltage, based on the simulation of Real-Time Digital Simulator (RTDS), the online-switching tests are done at different DC power levels. According to the test data, the law and reason of DC switching overvoltage are studied, the safe power level value can be determined, and the following conclusion is drawn: it's proportional relationship between the level of DC switching overvoltage and the DC transmission power, higher DC switching overvoltage can be avoided when the online-switching operation is under the safe power level. The research results provide reference values for the practical operation of the project.

Key words: HVDC project; power transmission mode; switching overvoltage; sequence control; online-switching

0 引言

永仁-富宁直流输电工程(永富工程)是我国第一条省内端对端直流输电工程, 永富工程额定输送功率为3000 MW, 额定电流为3000 A, 额定直流电压为 ± 500 kV, 线路送电距离约为为577 km; 永富工程作为云南省观音岩水电站送出工程, 送端起点在云南省楚雄州永仁换流站, 受端落点在云南省文山州富宁换流站。永富工程已经在2014年8月开工建设, 计划在2016年6月底投入运行。

永富工程在受端富宁换流站500 kV交流场通过开关倒闸操作实现三种不同的功率输送方式: 直流功率“全送广西”; 直流功率“全送云南”; 直流功率“极1送广西, 极2送云南”。

根据永富工程设计要求, 以上三种功率输送方式可进行在线转换, 即在直流功率稳定输送的工况

下完成功率输送方式的自动转换^[1-2]。

厂内试验过程中发现在不同直流功率水平下进行在线转换时, 直流线路会发生不同程度的操作过电压, 通过仿真研究分析, 确定了避免出现严重操作过电压的安全直流功率水平值; 仿真研究的结果可为工程投运后的实际操作提供参考和理论支持。

1 3种功率输送方式的实现

1.1 富宁站500 kV交流场配置

3种不同功率输送方式是永富工程与以往直流输电工程最大的不同之处, 为了实现不同的功率输送方式, 逆变站500 kV交流场开关设备在常规设计的基础上增加了4个母线断路器和两个线路隔离开关, 500 kV交流场电气主接线如图1所示, 运行人员通过对CB1、CB2、CB3、CB4及1#、2#隔离开关的倒闸操作, 实现3种不同的运行方式^[3]。

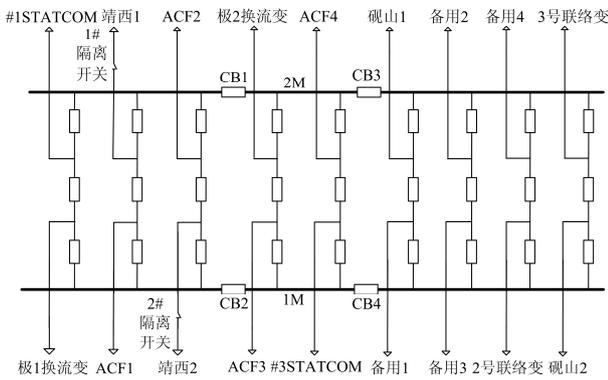


图1 富宁换流站 500 kV 交流场配置

Fig. 1 Configuration of 500 kV AC yard in Funing converter station

“全送广西”方式运行时，CB1、CB2 母线断路器合位、CB3、CB4 母线断路器分位，1#、2#隔离开关合位，直流功率可从极 1、极 2 通过靖西出线全部输送到广西。

“全送云南”方式运行时，CB1、CB2、CB3、CB4 母线断路器合位，1#、2#隔离开关分位或者砚山出线两侧断路器断开，直流功率可从极 1、极 2 通过砚山出线全部输送到云南。

“极 1 送广西，极 2 送云南”方式下运行时，CB1、CB2 母线断路器分位，CB3、CB4 母线断路器合位、1#、2#隔离开关合位，直流功率分别通过靖西和砚山出线输送到广西和云南。

1.2 3 种功率输送方式的自动转换顺序控制

为了实现不同功率输送方式间的平稳、快速转换，在富宁站交流站控系统中设计了专门的顺序控制，运行人员可以在后台监控界面通过顺序控制功能完成开关倒闸操作，实现功率输送方式的在线转换；为了防止交流母线失压的工况出现，顺序控制倒闸操作过程遵循“当前方式>>中间状态>>目标方式”的原则，其中“中间状态”指广西、云南同时联网^[4-6]。

以功率“全送广西”向功率“全送云南”转换时，开关倒闸操作顺序如下：

- 1) 依次合 CB3、CB4 母线断路器；
- 2) 如靖西 1 线路隔离刀合位，分第二串线路出线中开关和边开关；
- 3) 如靖西 2 线路隔离刀合位，分第三串线路出线中开关和边开关；
- 4) 如靖西 1 线路隔离刀合位，分靖西 1 出线线路隔离刀；
- 5) 如靖西 2 线路隔离刀合位，分靖西 2 出线线路隔离刀。

2 RTDS 仿真模型

以 RTDS 平台搭建永仁直流输电模拟系统，模拟的主要系统元件有：12 脉动阀组、交流等值系统、交流滤波器、直流滤波器、换流变压器等，两站配置基本相同，图 2 为逆变站主接线示意图^[7-11]。

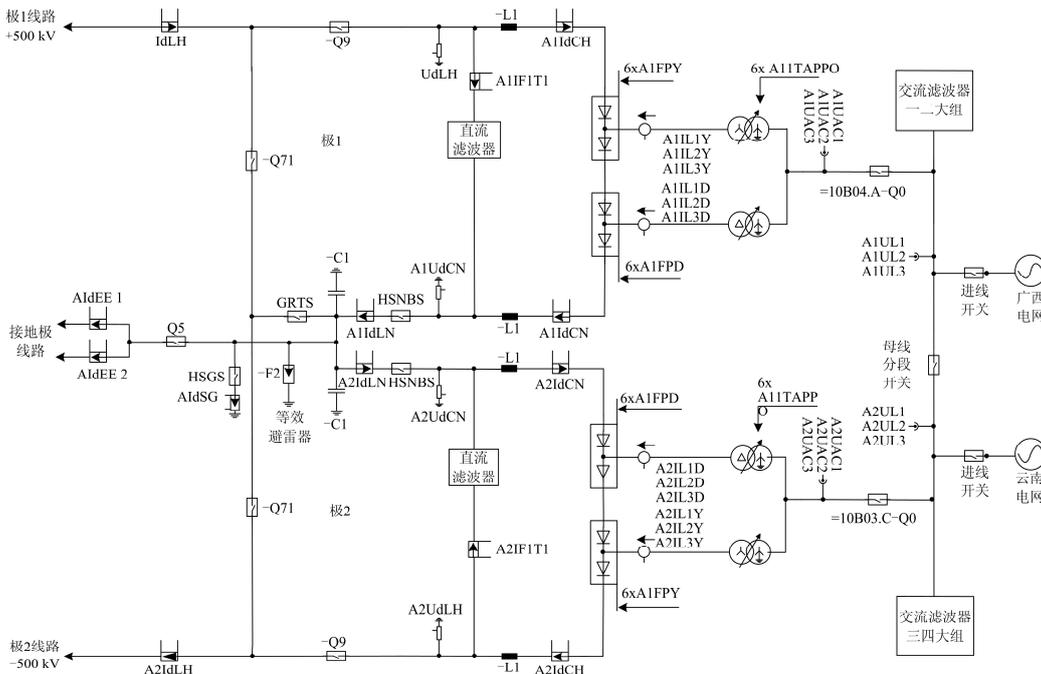


图2 富宁站系统接线图

Fig. 2 Signal line connection of Funing station

在图 2 中进线开关和母线分段开关用于实现 3 种功率输送方式转换时的倒闸操作。

两侧交流系统电源内阻值、母线电压由所给最大短路电流和电压水平确定, 频率取 50 Hz, 如表 1 所示。

换流阀模型为单极 12 脉冲结构, 整流侧、逆变侧各有 4 个换流阀单元(每单元为一个六脉冲换流桥), 具体参数如表 2 所示。

表 1 交流系统参数

Table 1 Parameters of AC system

项目	整流侧	逆变侧
母线电压/kV	525	525
短路容量/MVA	26 005.98	9820.44
阻抗/ Ω	$10.56 \angle 84.29^\circ$	$28.066 \angle 85.24^\circ$

表 2 换流阀参数

Table 2 Parameters of converter valve

项目	整流侧	逆变侧
额定直流电压/kV	250	250
额定直流电流/kA	3	3
额定功率/MW	750	750
额定触发角 $\alpha/^\circ$	15	-
额定熄弧角 $\beta/^\circ$	-	17
吸收回路电阻/ Ω	2808	2808
吸收回路电容/mF	0.0179	0.0179
阀导通电阻/ Ω	0.056	0.056
最小熄弧角/ $^\circ$	8.64	8.64

换流变压器模型为两卷变, 整流侧、逆变侧分别有 YY-12、YD-11 接线方式变压器各 2 台, 参数如表 3 所示。

表 3 换流变压器参数

Table 3 Parameters of converter transformer

项目	整流侧	逆变侧
额定功率/MW	750	750
一次侧线电压/kV	525	525
二次侧线电压/kV	210	204.9
换流变漏抗/p.u.	0.16	0.16
分接头位置	+18/-6	+18/-6
分接头步进	1.25%	1.25%

直流线路模型参数如表 4 所示。接地极线路模型参数如表 5 所示。

3 RTDS 仿真试验

与 RTDS 接口的直流控制保护系统由实际供货的控制保护屏柜组成, 接口信号与实际工程保持一致。

3.1 试验过程

首先在双极功率 3000 MW 稳态工况下, 进行功率输送方式在线转换试验, 然后逐步降低直流功

率, 依次进行在线转换试验。

表 4 直流线路参数

Table 4 Parameters of DC line

	项目	单位	直流线路
导线	线路长度	km	约 566
	直流电阻 20 $^\circ\text{C}$	Ω/km	0.0358
	型号		JL/G1A-800/70
	分裂线		4
	分裂间距	mm	550
	导线外径	mm	38.6
	导线高度	m	32
	导线弧垂	m	18
避雷线	两极导线间距	m	13
	线路长度	km	约 535
	型号		JLB20A-100/ OPGW-120
	分裂线		1
	避雷线外径	mm	13/14.7
	避雷线高度	m	42
	避雷线弧垂	m	15
	避雷线间距	m	18
	避雷线电阻	Ω/km	0.8524/0.755
	土壤电阻率	$\Omega \cdot \text{m}$	500

表 5 接地极线路参数

Table 5 Parameters of electrode line

	项目	单位	直流线路
导线	线路长度	km	67/51.5(永仁/富宁)
	直流电阻 20 $^\circ\text{C}$	Ω/km	0.0977(单根子导线)
	型号		JNRLH60/G3A-300/40
	分裂线		2 \times 2
	分裂间距	mm	400
	导线外径	mm	23.94
	导线高度	m	28 /40.3(永仁/富宁)
	导线弧垂	m	16.5 /10(永仁/富宁)
避雷线	导线间距	m	6
	线路长度	km	32 /40.3(永仁/富宁)
	型号		1 \times 7-11.4-1270-B-GB1200- 88(GJ-80)
	分裂线		1
	避雷线外径	mm	11.4
	避雷线高度	m	13 /8(永仁/富宁)
	避雷线弧垂	m	0
	避雷线间距	m	2.42 /2.43(永仁/富宁)
	避雷线电阻	Ω/km	1500 /2300(永仁/富宁)
	土壤电阻率	$\Omega \cdot \text{m}$	500
	接地极电阻	Ω	0.195 /0.9(永仁/富宁)

在 3000 MW 工况下，分别进行如下 6 项试验：

- (1) “全送广西”转“全送云南”
- (2) “全送广西”转“双极分送”
- (3) “全送云南”转“全送广西”

(4) “全送云南”转“双极分送”

(5) “双极分送”转“全送广西”

(6) “双极分送”转“全送云南”

试验过程及结果详见故障录波图 3、图 4。

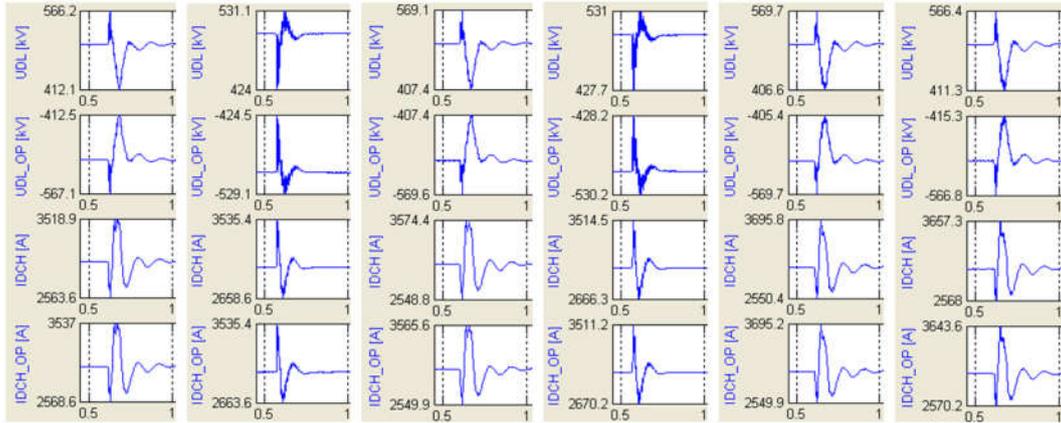


图 3 3000 MW 功率输送方式转换故障录波图(整流站)

Fig. 3 TFR of power transmission change-over on 3 000 MW (rectifier station and inverter)

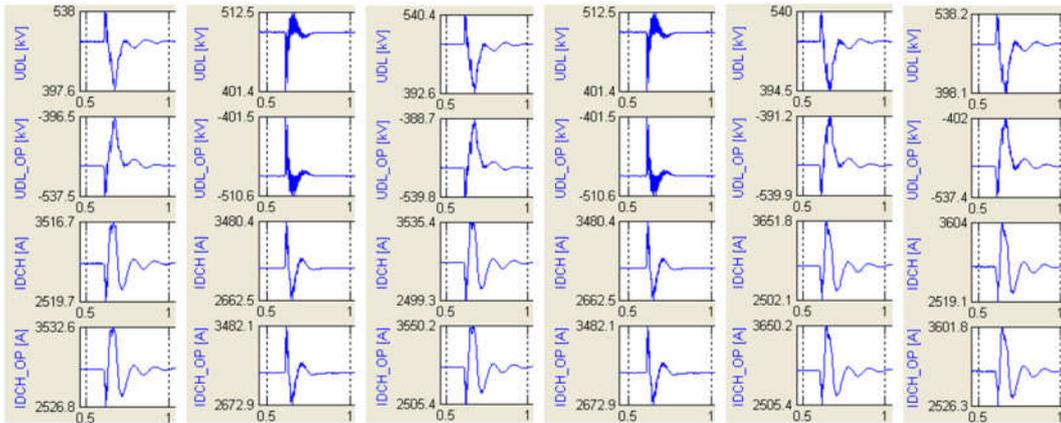


图 4 3000 MW 功率输送方式转换故障录波图(逆变站)

Fig. 4 TFR of power transmission change-over on 3 000 MW (inverter station)

图 3、图 4 中 UDL 为极 1 直流电压，UDL_OP 为极 2 直流电压，IDCH 为极 1 直流电流，IDCH_OP 为极 2 直流电流；横坐标为时间轴，单位为“s”。

通过对图 3 和图 4 故障录波进行分析：在进行功率方式在线转换时，在整流站、逆变站均出现不同程度的直流操作过电压。整流侧直流过电压最高到±567 kV 左右，逆变侧直流过电压最高到±540 kV 左右，直流电流最高过冲到 3605 A 左右。分别在直流功率 2800 MW、2600 MW、2400 MW、2200 MW、2000 MW、1800 MW、1600 MW、1400 MW 等不同功率水平下进行“全送广西”转“全送云南”操作，进一步验证直流系统的过电压特性，试验数据如表 6 所示。

表 6 不同直流功率水平下试验记录

Table 6 Test record under different DC power levels

功率水平/MW	整流侧最高电压值/kV	逆变侧最高电压值/kV
2800	560	537
2600	553	533
2400	549	530
2200	537	524
2000	534	523
1800	527	520
1600	517	514
1400	510	508

2800 MW、2600 MW、2400 MW、2200 MW、

2000 MW、1800 MW 功率水平下转换时电压电流故障录波数据如图 5—图 10 所示, 图中左侧为整流站波形, 右侧为逆变站波形。

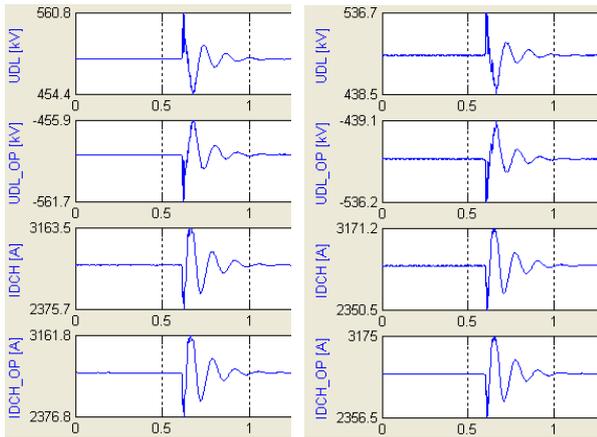


图 5 2800 MW 功率输送方式转换故障录波图

Fig. 5 TFR of power transmission change-over on 2 800 MW

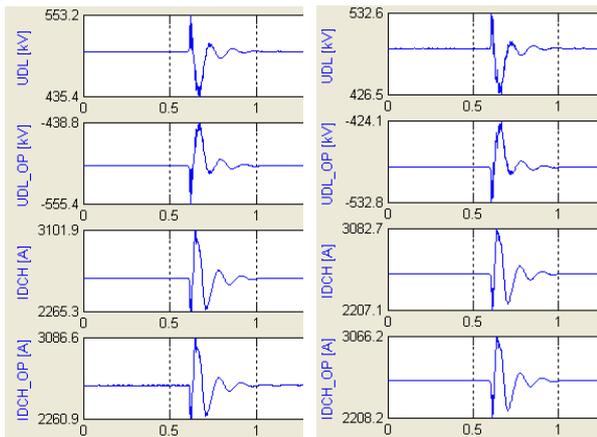


图 6 2600 MW 功率输送方式转换故障录波图

Fig. 6 TFR of power transmission change-over on 2 600 MW

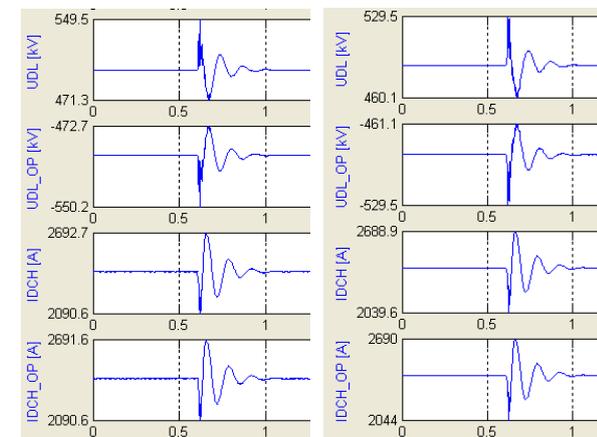


图 7 2400 MW 功率输送方式转换故障录波图

Fig. 7 TFR of power transmission change-over on 2 400 MW

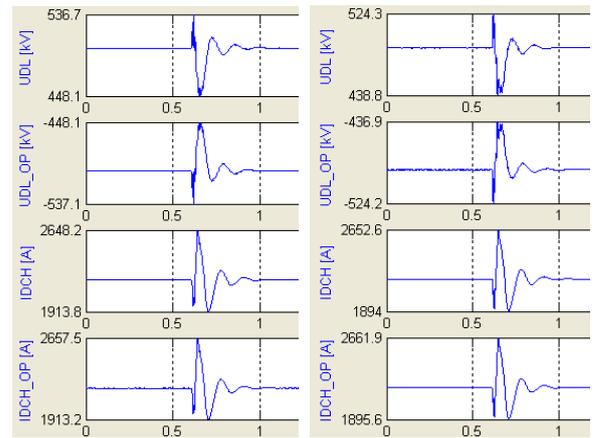


图 8 2200 MW 功率输送方式转换故障录波图

Fig. 8 TFR of power transmission change-over on 2 200 MW

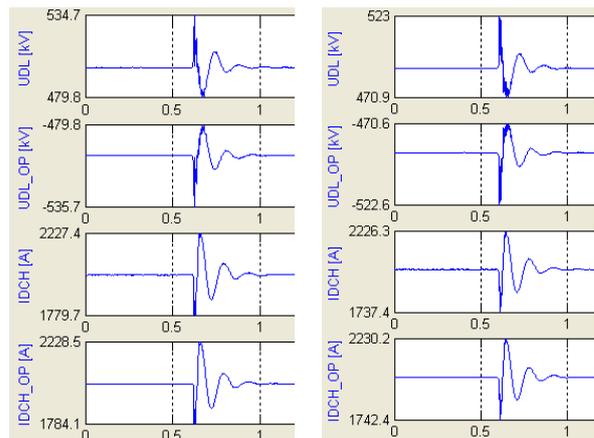


图 9 2000 MW 功率输送方式转换故障录波图

Fig. 9 TFR of power transmission change-over on 2 000 MW

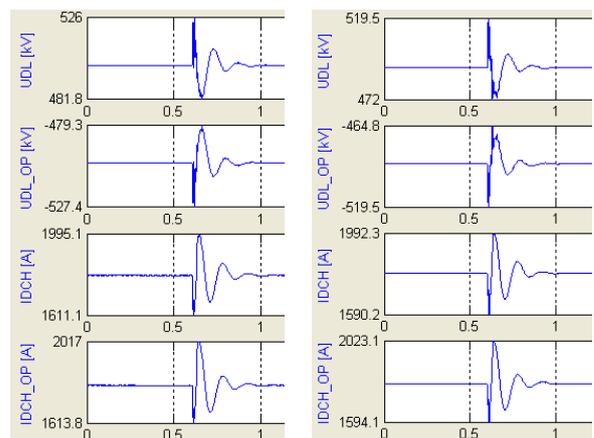


图 10 1800 MW 功率输送方式转换故障录波图

Fig. 10 TFR of power transmission change-over on 1 800 MW

不同功率水平下在线转换时直流控制系统电流、电压、熄弧角控制的运行状态如图 11—图 14 所示。

在图 11—图 14 中 Id_Ctrl 为电流控制器，Ud_Inv_Ctrl 为逆变侧电压控制器，Ud_Rec_Ctrl 为整流侧电压控制器，Gamma_Ctrl 为熄弧角控制器。

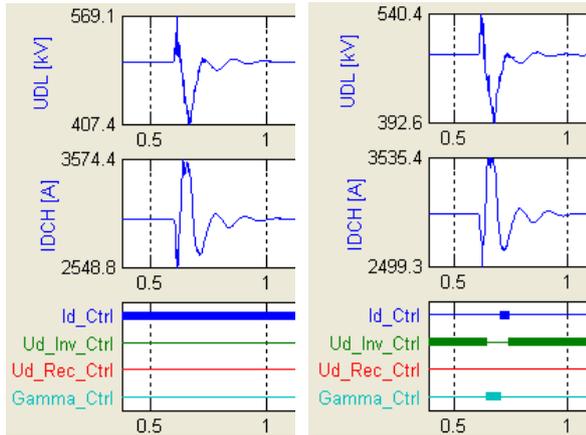


图 11 控制器状态故障录波图(3000 MW)
Fig. 11 TFR of controller status (3000 MW)

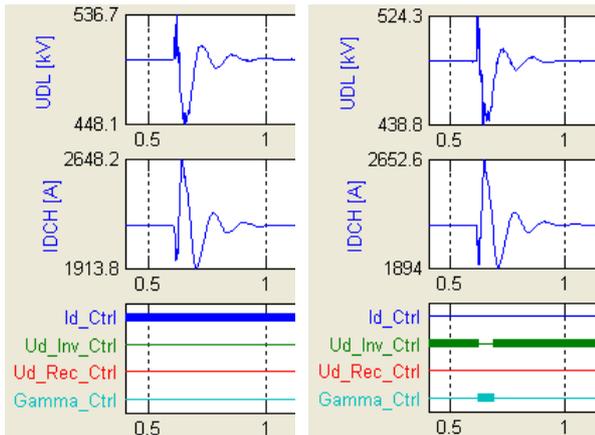


图 12 控制器状态故障录波图(2200 MW)
Fig. 12 TFR of controller status (2200 MW)

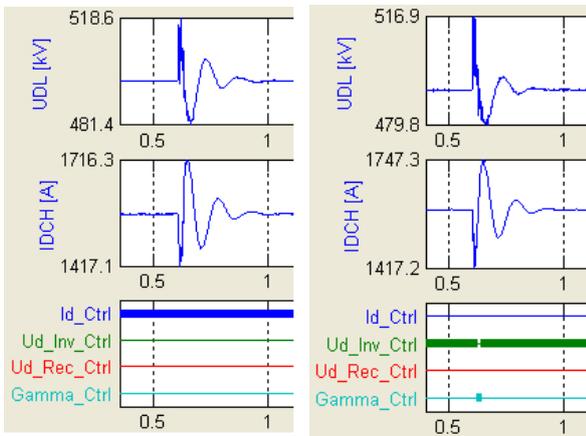


图 13 控制器状态故障录波图(1600 MW)
Fig. 13 TFR of controller status (1600 MW)

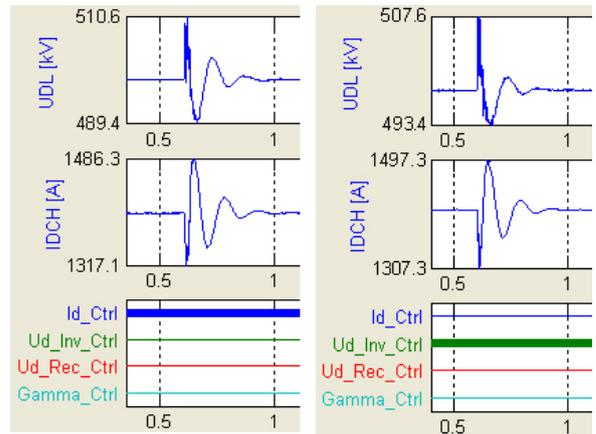


图 14 控制器状态故障录波图(1400 MW)
Fig. 14 TFR of controller status (1400 MW)

3.2 试验结论

通过对表 6 以及图 3—图 14 试验数据的分析，可以得出以下结论：

- (1) 3 种功率输送方式进行在线转换操作时，直流系统会出现不同程度的过电压；
- (2) 操作过电压水平随着直流功率的下降而降低；
- (3) 操作过电压的持续和恢复时间在 3000 MW 时最大，为 300 ms 左右，功率水平越低电压恢复时间越快；
- (4) 操作过电压不会影响到直流控制和直流保护，直流系统能够安全稳定运行；
- (5) 3 种功率输送方式进行在线转换操作时，整流站控制器不会发生切换，电流控制器始终有效；
- (6) 3 种功率输送方式进行在线转换操作时，逆变站控制器会发生切换，电压控制器会切换到熄弧角控制器，以防止熄弧角过小，避免换相失败的发生^[12-14]；

7) 在直流功率水平 1400 MW 以下进行功率输送方式在线转换时，整流站、逆变站的操作过电压影响不大，且两站控制器保持原来的运行状态，不会发生切换。

3.3 直流过电压原因分析及应对措施

通过上述仿真试验验证，直流过电压发生时均在广西和云南联网后，当其中一个电网与直流系统断开的过程中出现过电压。

在逆变站广西和云南联网后，直流输送功率相对稳定，负荷潮流分别流向两个交流电网，当逆变站其中一个电网断开后，直流系统整流站输出的功率还保持在原有水平上，由于逆变站断开电网的瞬间必然会减少一定的输出功率，导致直流电流减小，

整流站定电流控制策略会快速减小触发角, 直流电压则迅速升高, 过电压程度与在线转换时的功率水平有直接关系^[15-19]。

建议在双极功率 1400 MW 以下进行功率输送方式在线转换操作, 对直流系统影响较小。

4 结论

通过 RTDS 建模并进行仿真试验研究, 对永富工程 3 种不同功率输送方式在线转换操作试验, 证明在不同功率水平下在线转换操作是可以成功的; 对发生直流操作过电压进行分析, 并确定了输送方式在线转换的安全功率水平值; 研究结果为工程的实际生产运行提供了参考和借鉴价值。

参考文献

- [1] 徐殿国, 刘瑜超, 武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 1-12.
XU Dianguo, LIU Yuchao, WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 1-12.
- [2] 张望, 黄利军, 郝俊芳, 等. 高压直流输电控制保护系统的冗余设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 88-91.
ZHANG Wang, HUANG Lijun, HAO Junfang, et al. Redundant design of control and protection system for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 88-91.
- [3] 刘毅力, 贾轩涛, 戴国安, 等. 永仁-富宁直流工程三种功率输送方式自动转换顺序控制及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 139-146.
LIU Yili, JIA Xuanta, DAI Guoan, et al. Analysis of auto-sequence control and influence of three power transmission modes in Yongren-Funing HVDC Project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 139-146.
- [4] 罗磊, 盛琰, 王清坚, 等. 特高压直流输电系统顺序控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 30-33, 38.
LUO Lei, SHENG Yan, WANG Qingjian, et al. Research on sequence control in UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 30-33, 38.
- [5] 涂仁川. 特高压直流换流站顺序控制的研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 72-76.
TU Renchuan. Research on sequence control in UHVDC converter station[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 72-76.
- [6] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 288-300.
LI Xingyuan, ZHAO Rui, LIU Tianqi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 288-300.
- [7] 陈潜, 张尧, 钟庆, 等. ± 800 kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(16): 27-32.
CHEN Qian, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Simulation of ± 800 kV UHVDC system under different operation modes[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(16): 27-32.
- [8] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江 ± 800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ± 800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- [9] 周俊, 郭剑波, 胡涛, 等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.
ZHOU Jun, GUO Jianbo, HU Tao, et al. Digital/analog dynamic simulation for ± 500 kV HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 221-228.
- [10] 张爱玲. 溪洛渡送电广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.
ZHANG Ailing. Study of control and protection strategies for Xiluodu-Guangdong double HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 72-76.
- [11] 胡勇, 粟小华, 李怀强, 等. 青藏 ± 400 kV 直流联网工程继电保护配置与应用[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(3): 27-32.
HU Yong, SU Xiaohua, LI Huaiqiang, et al. Configuration and application of relay protections in ± 400 kV HVDC Qinghai-Tibet interconnection system[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(3): 27-32.
- [12] 彭忠, 李少华, 李泰, 等. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 75-80.
PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, et al. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 75-80.

- [13] 高本锋, 张学伟, 刘辛晔, 等. 高压直流输电保护定值整定流程的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 400-407.
GAO Benfeng, ZHANG Xuwei, LIU Xinye, et al. Research of HVDC protection value setting process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 400-407.
- [14] 黄银龙, 乐健, 毛涛, 等. 一种新型的高压直流输电系统直流侧谐波电压测量方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 144-152.
HUANG Yinlong, LE Jian, MAO Tao, et al. A novel measurement method of the harmonic voltage on the DC-side of HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 144-152.
- [15] 高强, 张小聪, 施正钗, 等. ± 800 kV 宾金直流双极闭锁故障对浙江电网的影响[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 47-51.
GAO Qiang, ZHANG Xiacong, SHI Zhengchai, et al. Impact of ± 800 kV Yibin-Jinhua DC bipolar block fault on Zhejiang Power Grid[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 47-51.
- [16] 李豹, 熊双成, 李金安, 等. 特高压直流保护逻辑元件对保护特性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 133-137.
LI Bao, XIONG Shuangcheng, LI Jinan, et al. Study on the influence of logical module on UHVDC protective characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 133-137.
- [17] 李豹, 马业林, 熊双成, 等. ± 800 kV 特高压直流保护优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 71-75.
LI Bao, MA Yelin, XIONG Shuangcheng, et al. Research on optimization of ± 800 kV UHVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 71-75.
- [18] 姚其新, 张侃君, 韩情涛, 等. 龙泉换流站直流控制保护系统运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 142-147.
YAO Qixin, ZHANG Kanjun, HAN Qingtao, et al. Operation analysis of Longquan converter station HVDC control and protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 142-147.
- [19] 吴彦维, 李晔, 陈大鹏, 等. 10 000 MW 特高压直流工程受端分层接入交流电网方式下直流控制系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 108-113.
WU Yanwei, LI Ye, CHEN Dapeng, et al. Research on control system for 10 000 MW UHVDC station B hierarchical connection to AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 108-113.

收稿日期: 2015-11-02; 修回日期: 2016-03-21

作者简介:

贾轩涛(1982-), 男, 通信作者, 本科, 工程师, 研究方向为高压直流输电控制保护系统; E-mail: jiaxuantao@163.com

史博伦(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。E-mail: 909485036@qq.com

胡锦涛(1980-), 男, 本科, 研究方向为高压直流输电控制保护及换流站运维生产管理。

(编辑 葛艳娜)