

扎鲁特—青州±800 kV 特高压直流输电工程运行特性分析

罗汉武¹, 乐健², 毛涛³, 李猛克¹, 徐新尧¹, 崔士刚¹

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司检修分公司, 内蒙古 通辽 028000;

2. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

3. 武汉东湖学院 机电工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:对蒙东扎鲁特—青州±800 kV/10 000 MW 特高压直流输电工程主电路设计和运行特性进行仿真分析。根据现有直流工程设计方法及本工程特点,给出了两端换流站一次设备的主要参数,建立了该工程整体 PSCAD 仿真模型,进行了双极全压和双极降压 70% 运行方式下系统运行特性的仿真计算,验证了主电路参数设计的正确性。进行了整流侧三相短路、逆变侧两相短路和换流阀短路故障时的仿真计算,分析了系统故障情况下的运行特性。研究结果为该特高压工程后续各项研究提供了参考。

关键词:特高压直流输电;换流变压器;主回路参数;运行特性分析

中图分类号:TM 721.1;TM 723

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.008

0 引言

特高压直流输电系统因其容量大、损耗小、占用土地少而在远距离电力输送中起到越来越重要的作用^[1-4]。自 2006 年以来,我国已经相继建成投运 4 个特高压直流工程,分别为向家坝—上海±800 kV 特高压直流输电示范工程、锦屏—苏南±800 kV、哈密南—郑州±800 kV 和溪洛渡左岸—浙江金华±800 kV 特高压直流输电工程,这些工程为后续特高压直流输电工程的设计和建设提供了重要依据^[5-9]。

根据国家电网公司总体规划,2015 年开工“五交八直”特高压工程建设。国网内蒙古东部电力有限公司抓住机遇,加快推进“两交三直”特高压工程的建设。其中扎鲁特—山东特高压直流工程线路起点为内蒙古东部,途经内蒙古、河北、天津、山东 4 省区,落点山东,线路长度约为 1 200 km,新建送端扎鲁特、受端青州 2 座换流站,工程输电电压等级为±800 kV,双极输电规模为 10 000 MW,规划在 2018 年左右建成投产。该工程建成后将成为输送容量最大的直流输电工程,对于促进内蒙古能源基地开发,满足山东用电负荷增长需求等均具有十分重要意义。

主回路参数设计是特高压直流输电工程的核心^[10-14],也是工程后续运行和控制研究的基础和依据^[15-18]。目前国内外运行的±800 kV 特高压直流输电工程的最高额定电流为 5 000 A,而扎鲁特—青州±800 kV 特高压直流输电工程直流电流为 6 250 A,其换流阀每个单阀包含 6 个阀模块,阀塔无论是容量还是体积都要比现有的换流阀塔大,对其主回路参数设计并进行运行特性分析具有工程实用价值。

本文以规划中的扎鲁特—青州±800 kV 特高压直流输电工程为应用背景,对其主回路元件参数进行了设计,基于 PSCAD/EMTDC 软件搭建了含换流器、

换流变、交/直流滤波器、直流平波电抗器、直流输电线路的系统仿真模型,进行了双极全压及降压 70% 运行方式的仿真计算,计算结果验证了主回路参数设计的正确性。通过仿真计算分析了该工程在两侧交流系统发生故障以及换流器故障时的运行特性。

1 扎鲁特—青州特高压直流输电工程主回路参数设计

1.1 换流站主接线及运行方式

根据现有已投运的±800 kV 特高压直流输电工程采用的主接线及运行方式,正在建设的扎鲁特—青州直流输电工程将采用每极 2 个 12 脉动换流器(400 kV+400 kV)串联的方式,高压端对地的电压为 400 kV 或 800 kV。该主接线结构下可选择多种运行方式,包括:

- a. 双极全压运行方式;
- b. 双极混合电压运行方式(一极双换流器运行,一极单换流器运行);
- c. 双极半压运行方式(每极 1 个换流器运行);
- d. 单极金属返回全压运行方式;
- e. 单极金属返回半压运行方式(只有 1 个换流器运行);
- f. 单极大地返回全压运行方式;
- g. 单极大地返回半压运行方式(只有 1 个换流器运行)。

本文在设计主回路参数时选用了双极全压运行方式,且扎鲁特端为整流站,青州端为逆变站。

为方便叙述,下文中下标 R 表示整流侧,下标 I 表示逆变侧,下标 N 表示额定,如 d_{nI} 为逆变侧 6 脉动换流器的额定相对阻性压降。

1.2 交流系统参数

扎鲁特站的额定运行电压为 530 kV,青州站的额定运行电压为 515 kV,最大短路容量均为 57 288

MV·A。

根据现有特高压设备生产技术能力,该特高压直流输电工程设计中采用的额定控制系统参数、设备制造公差和测量误差如下。

(1) 额定控制系统参数。

a. 额定触发角 $\alpha_N = 15^\circ$, 触发角 α 的稳态波动范围 $\Delta\alpha = \pm 2.5^\circ$, 最小触发角 $\alpha_{\min} = 5^\circ$;

b. 额定熄弧角 $\gamma_N = 17^\circ$;

c. 分接头变化一档对应的直流电压变化 $\Delta U_d = \pm 0.625\% U_{dRN}$, 分接头变化一档对应的整流侧直流电压变化 $\Delta I_d = \pm 0.625\% I_{dN}/2$, 其中, U_{dRN} 为整流侧额定直流电压, I_{dN} 为额定直流电流。

(2) 设备制造公差和测量误差。

a. 正常直流电压运行范围内换流变压器相对感性压降 d_x 的最大制造公差 δd_x 为 $-7\% d_{xN} \sim 5\% d_{xN}$;

b. 直流电压 U_d 的测量误差 $\delta_{U_{dmeas}} = \pm 0.5\% U_{dN}$, 直流电流 I_d 的测量误差 $\delta_{I_{dmeas}} = \pm 0.3\% I_{dN}$;

c. 逆变侧熄弧角的测量误差 $\delta_\gamma = \pm 1^\circ$, 整流侧触发角的测量误差 $\delta_\alpha = \pm 0.5^\circ$;

d. 电容式分压器电压互感器测量误差 $\delta_{U_{dio}} = \pm 1\% U_{dioN}$ 。

1.3 换流器参数设计

1.3.1 换流器额定空载直流电压

图 1 为直流输电系统的等效电路。

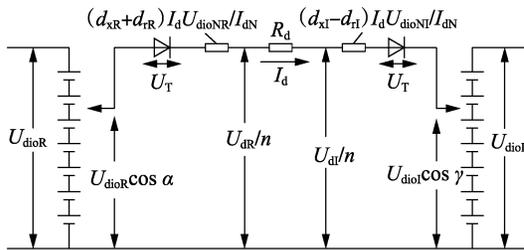


图 1 直流系统等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of DC system

6 脉动整流器和逆变器的输出直流电压分别如式(1)、(2)所示。

$$\frac{U_{dR}}{n} = U_{dioR} \left[\cos \alpha - (d_{xR} + d_{rR}) \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{U_{dioNR}}{U_{dioR}} \right] - U_T \quad (1)$$

$$\frac{U_{dI}}{n} = U_{dioI} \left[\cos \gamma - (d_{xI} - d_{rI}) \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{U_{dioNI}}{U_{dioI}} \right] + U_T \quad (2)$$

其中, U_{dR} 、 U_{dI} 分别为整流侧、逆变侧双 12 脉动换流器电压; U_{dioR} 、 U_{dioI} 分别为整流侧、逆变侧 6 脉动换流器空载电压; n 为每站每极 6 脉动换流器的个数, 在本工程中为 4; α 为整流器的触发角; γ 为逆变器熄弧角; d_{xR} 和 d_{rR} 分别为整流侧 6 脉动换流器相对感性和阻性压降; U_T 为换流阀通态压降; d_{xI} 和 d_{rI} 分别为逆变侧 6 脉动换流器相对感性和阻性压降; U_{dioNI} 为逆变侧 6 脉动换流器额定空载直流电压。

双极全压运行时满足:

$$U_{dR} = U_{dI} + R_d I_d \quad (3)$$

其中, R_d 为线路直流电阻。

对整流侧扎鲁特换流站, 根据式(1) 计算得到:

$$U_{dioNR} = \frac{\frac{U_{dNR}}{n} + U_T}{\cos \alpha_N - (d_{xNR} + d_{rNR})} = \frac{\frac{800/4 + 0.3}{\cos 15^\circ - (0.092 + 0.003)}}{230.0 \text{ (kV)}}$$

对逆变侧青州换流站, 根据式(2) 和式(3) 计算得到:

$$U_{dioNI} = \frac{\frac{U_{dNR} - R_d I_{dN}}{4} - U_T}{\cos \gamma_N - (d_{xNI} - d_{rNI})} = \frac{\frac{800 - 6.88 \times 6.25}{4} - 0.3}{\cos 17^\circ - (0.087 - 0.003)} = 216.6 \text{ (kV)}$$

1.3.2 无功功率损耗

12 脉动换流器消耗的无功功率为:

$$Q_d = 2 \chi I_d U_{dio} \quad (4)$$

$$\chi = \frac{1}{4} \frac{2\mu + \sin 2\varphi - \sin 2(\varphi + \mu)}{\cos \varphi - \cos(\varphi + \mu)} \quad (5)$$

每个换流站 2 极共有 4 个 12 脉动换流器, 代入相应的参数, 可得到两端换流站平衡双极额定运行时消耗的无功功率分别为 $Q_{dNR} = 5435.6 \text{ Mvar}$ 、 $Q_{dNI} = 5226.7 \text{ Mvar}$ 。

1.4 换流变压器参数设计

1.4.1 短路阻抗

换流变压器短路阻抗的选择是一个反复优选的过程, 需要综合考虑各种制约因素。

扎鲁特—青州换流变压器考虑 6250 A 换流阀承受短路电流水平为 65 kA, 可计算得到扎鲁特站换流变压器短路阻抗 $u_{k\min} = 16.65\%$, 青州站换流变压器短路阻抗 $u_{k\min} = 16.58\%$ 。考虑到送端换流站的运输条件限制和换流变压器的设计能力, 扎鲁特站换流变压器短路阻抗取为 18%, 青州站换流变压器短路阻抗取为 17%。

1.4.2 换流变阀侧额定线电压和额定容量

空载阀侧线电压与理想空载直流电压之间的关系为:

$$U_{vN} = \frac{U_{dioN}}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{3} \quad (6)$$

根据 1.3.1 节中计算得到 U_{dioN} , 扎鲁特换流站换流变阀侧线电压 U_{vNR} 为:

$$U_{vNR} = \frac{U_{dioNR}}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{3} = \frac{230}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{3} = 170.3 \text{ (kV)}$$

青州换流站换流变阀侧线电压 U_{vNI} 为:

$$U_{vNI} = \frac{U_{dioNI}}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{3} = \frac{216.6}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{3} = 160.4 (\text{kV})$$

阀侧交流电流有效值为:

$$I_{vN} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dN} \quad (7)$$

计算得到扎鲁特换流站和青州换流站换流变阀侧线电流 $I_{vNR} = I_{vNI} = 5.1 \text{ kA}$ 。

由此可得扎鲁特换流变压器容量 $S_{N2wR} = 501.8 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 青州换流站单相两绕组换流变容量 $S_{N2wI} = 472.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。

1.5 线路直流电阻

直流电阻对换流器额定容量选择具有直接影响。考虑到该特高压工程直流输电线路约为 1 200 km, 结合输送容量及相关已建成工程经验, 直流线路采用 6×LJG-900/40 的钢芯铝绞线, 主回路参数设计中采用的直流电阻如表 1 所示。

表 1 设计用直流电阻
Table 1 DC resistance for design

电阻	电阻值/Ω		
	最小值	额定值	最大值
线路电阻 R_b	5.5	6.88	8.61
接地电阻 $R_e + R_g$	0	2.53	3.50

1.6 平波电抗器

平波电抗器主要作用是避免换流站的过电压, 其选择需要综合考虑各种制约因素。在满足直流系统主要性能要求的前提下可尽量取较小值。本文借鉴已投产的±800 kV 云广特高压直流输电工程中平波电抗器的规格以及安装位置, 设计在极母线和中性母线处安装相同电感值(均为 2×75 mH)的平波电抗器。

1.7 交直流滤波器设置

直流滤波器的设置数量与型号需考虑特高压工程运行时谐波分布状况及投资运维费用等, 本文在设计中参考已投产的云广特高压工程的交直流滤波器设计型号, 根据本工程无功功率特性设置滤波器容量。所设计的交、直流滤波器分别如图 2 所示, 滤波器参数见表 2。

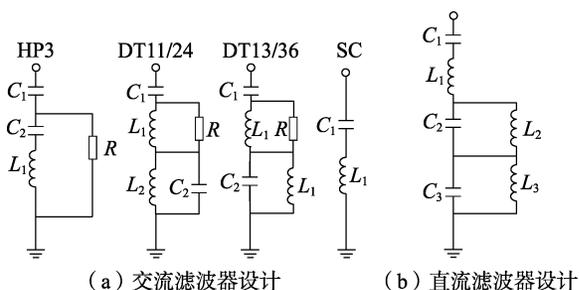


图 2 交直流滤波器设计

Fig.2 Design of AC and DC filters

表 2 交直流滤波器参数

Table 2 Parameters of AC and DC filters

滤波器型号	$C_1/\mu\text{F}$	L_1/mH	R/Ω	$C_2/\mu\text{F}$	L_2/mH	$C_3/\mu\text{F}$	L_3/mH
DT11/24	2.15	12.85	500	5.64	9.51	—	—
DT13/36	2.15	6.24	500	3.87	9.51	—	—
HP3	2.16	685.91	1 800	14.77	—	—	—
SC	2.16	2.04	—	—	—	—	—
直流	1.2	7.31	—	3.18	15.4	16.5	0.387

2 仿真系统的建立

2.1 主回路仿真模型

基于前文主电路参数设计, 根据 HVDC 标准模型搭建扎鲁特—青州特高压直流输电系统的仿真模型, 如附录中图 A1 所示。

该直流系统双极全压及双极降压 70% 运行时, 模型中元件参数设置如下。

(1) 双极全压运行。

a. 交流侧系统用戴维宁等效电路模拟, 根据潮流计算设置参数如下: 整流侧交流系统电压为 591 kV, 基波阻抗为 11.236 Ω, 额定电压为 530 kV, 短路比为 2.5/84°; 逆变侧交流系统电压设置为 502 kV, 基波阻抗为 10.609 Ω, 额定电压为 515 kV, 短路比为 2.5/75°。

b. 依据计算所得系统无功功率损耗, 投入相应交流滤波器, 整流侧与逆变侧各投入 4 组 DT11/24、4 组 DT13/36、2 组 HP3, 20 组 SC。整流侧与逆变侧各投入 2 组直流滤波器。

(2) 双极降压 70% 运行。

a. 在需要增大触发角以增加换流器消耗的无功功率、气候条件恶劣或严重污秽等特殊情况下, 系统需要降低直流电压运行。以直流电压降低至额定电压 70% 的情况为例, 直流电流保持为额定值不变, 功率正向传送, 整流侧触发角 $\alpha = 25^\circ$, 逆变侧熄弧角 $\gamma = 30^\circ$ 。 $U_{dioR} = 178.6 \text{ kV}$, $U_{dioI} = 169.9 \text{ kV}$, $TC_R = +23$, $TC_I = +22$, 根据式 (6) 计算得到 $U_{vNR} = 132.29 \text{ kV}$, $U_{vNI} = 125.85 \text{ kV}$ 。根据潮流计算设置整流站交流系统电压为 591.2 kV, 基波阻抗 16.08 Ω, 额定电压 530 kV, 短路比为 2.5/84°; 逆变站交流系统电压为 502 kV, 基波阻抗为 15.75 Ω, 额定电压为 515 kV, 短路比为 2.5/75°。

b. 整流侧与逆变侧各投入 4 组 DT11/24、4 组 DT13/36、2 组 HP3 和 20 组 SC。整流侧与逆变侧各投入 2 组直流滤波器。

2.2 控制系统设置

a. 整流侧采用定电流和最小 α 角控制, 同时配有低压限流环节, 由逆变侧传来的电流指令减去实际测量得到的整流侧电流后, 通过 PI 校正环节得到 β 角。正、负极的双 12 脉动换流器的触发角相同, 正常运行和降压运行时的电流增益根据实际工程设

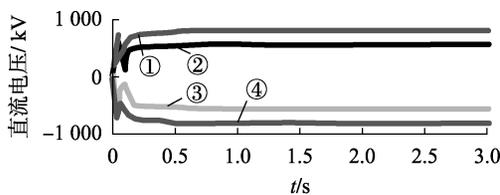
置为 0.16。

b. 逆变侧采用定电流和定 γ 角控制,同时产生整流侧的电流指令, γ 取为同一极中 4 个 6 脉动换流器熄弧角中的最小值。正/负极电压、电流增益分别为 0.001 25 和 0.16。双极降压 70% 运行时,整流侧正、负极控制器电压增益为 0.001 786,逆变侧正、负极控制器电压增益为 0.523 6。

3 正常运行特性分析

基于第 2 节中建立的系统仿真模型,对扎鲁特—青州特高压直流输电工程双极全压运行和双极降压 70% 运行方式进行了仿真,结果如图 3—6 所示。

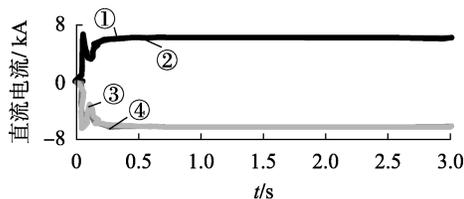
由上述仿真结果可以看出,双极全压运行方式下,正、负极直流电压分别为 800 kV、-800 kV,直流电流基本保持为 6 250 A,整流侧触发角 $\alpha \approx 15^\circ$,逆变侧熄弧角 $\gamma \approx 17^\circ$;双极降压 70% 运行方式下,正、负极直流电压分别为 560 kV、-560 kV,直流电流为 6 250 A,整流侧触发角 $\alpha \approx 27^\circ$,逆变侧熄弧角 $\gamma \approx 30^\circ$,



①—双极全压运行正极直流电压
②—双极降压 70% 运行正极直流电压
③—双极降压 70% 运行负极直流电压
④—双极全压运行负极直流电压

图 3 直流电压仿真结果

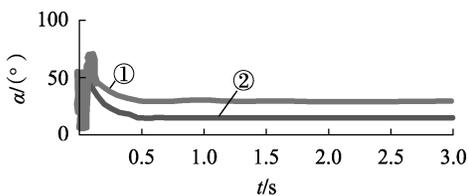
Fig.3 Simulative results of DC voltage



①—双极全压运行正极直流电流
②—双极降压 70% 运行正极直流电流
③—双极降压 70% 运行负极直流电流
④—双极全压运行负极直流电流

图 4 直流电流仿真结果

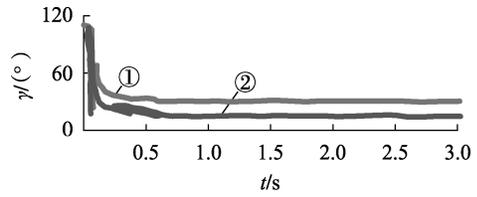
Fig.4 Simulative results of DC current



①—双极降压 70% 运行, ②—双极全压运行

图 5 整流侧换流器触发角

Fig.5 Simulative results of firing angle at rectifier side



①—双极降压 70% 运行, ②—双极全压运行

图 6 逆变侧换流器熄弧角

Fig.6 Simulative results of extinction angle at inverter side

与控制系统设计值基本相同。

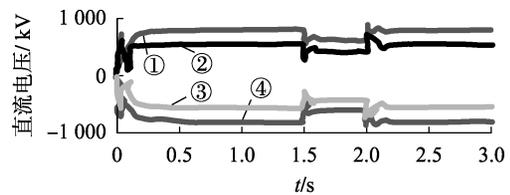
分析上述仿真结果可知,该 UHVDC 系统双极全压运行和双极降压 70% 运行方式下的直流电压和直流电流均满足系统设计要求,换流器关键控制参数满足设计要求,验证了本文主电路参数设计和控制系统参数设计的正确性和有效性,所建立的仿真模型为后续仿真研究提供了基础。

4 故障情况的仿真分析

4.1 整流侧交流系统故障

设置整流站交流母线在 $t = 1.5$ s 时发生三相短路故障,持续时间为 0.5 s,故障过渡电阻为 30 Ω 。双极全压和双极降压 70% 运行方式下的直流电压、直流电流、直流电流指令、整流侧触发角、逆变侧控制器输出分别如图 7—11 所示(图 9 中纵轴为标么值)。

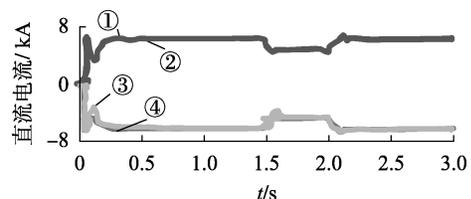
分析图 7—11 可知,当整流侧交流系统发生三相短路故障时,直流电压下降触发低压限流环节,导致直流电流指令下降,整流侧立即进入定最小 α 角



①—双极全压运行正极直流电压
②—双极降压 70% 运行正极直流电压
③—双极降压 70% 运行负极直流电压
④—双极全压运行负极直流电压

图 7 整流侧交流系统故障时的直流电压

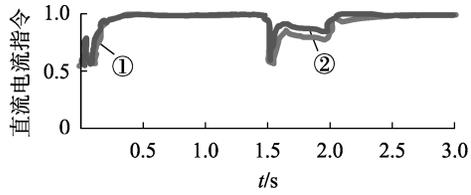
Fig.7 DC voltage during rectifier side fault



①—双极全压运行正极直流电流
②—双极降压 70% 运行正极直流电流
③—双极降压 70% 运行负极直流电流
④—双极全压运行负极直流电流

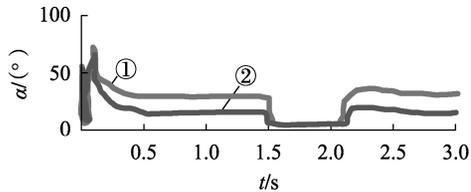
图 8 整流侧交流系统故障时的直流电流

Fig.8 DC current during rectifier side fault



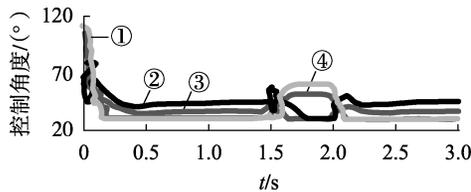
①—双极降压 70% 运行,②—双极全压运行

图 9 整流侧交流系统故障时的直流电流指令
Fig.9 DC current order during rectifier side fault



①—双极降压 70% 运行,②—双极全压运行

图 10 整流侧交流系统故障时的整流侧触发角
Fig.10 Firing angle during rectifier side fault



①—双极降压 70% 运行定直流控制
②—双极降压 70% 运行定 γ 角控制
③—双极全压运行定 γ 角控制
④—双极全压运行定直流控制

图 11 整流侧交流系统故障时的逆变侧控制器输出

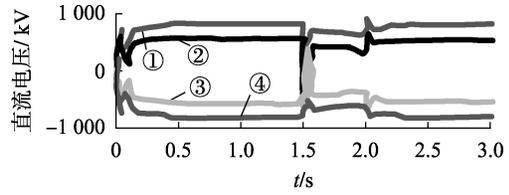
Fig.11 Inverter controller output during rectifier side fault

控制,以提高直流电压;故障切除后,直流电流逐渐提高,整流侧恢复至定电流控制。同时,整流侧故障对双极降压 70% 运行方式的影响更大。由图 11 可知,在故障期间由于直流电流小于逆变侧直流电流指令,逆变侧基本采用定电流控制。

4.2 逆变侧交流系统故障

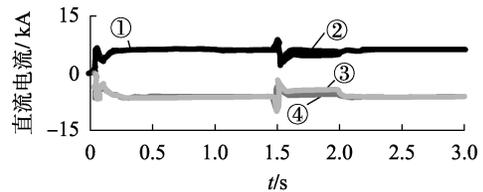
设置逆变站交流母线在 $t = 1.5\text{ s}$ 时发生两相短路故障,持续时间为 0.5 s ,故障过渡电阻为 $30\ \Omega$ 。双极全压和双极降压 70% 运行方式下的直流电压、直流电流、直流电流指令、整流侧触发角、逆变侧控制器输出分别如图 12—17 所示(图 14 中纵轴为标幺值)。

分析图 12—15 可知,逆变侧交流系统发生两相短路故障时,直流电流瞬间增大,直流电压下降触发低压限流环节,直流电流指令下降。发生故障后整流侧立即增大 α 角,以减小整流侧输出直流电压。当故障切除后,整流侧触发角减小,整个过程中整流侧保持为定电流控制。由图 16、17 可知,故障后 γ 出现 0° ,表明逆变侧换相失败,整流侧触发角 α 增大,同时采用定 γ 控制以避免换相失败的持续影响。



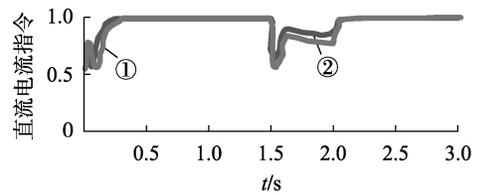
①—双极全压运行正极直流电压
②—双极降压 70% 运行正极直流电压
③—双极降压 70% 运行负极直流电压
④—双极全压运行负极直流电压

图 12 逆变侧故障时的直流电压
Fig.12 DC voltage during inverter side fault



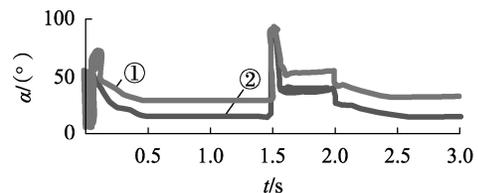
①—双极降压 70% 运行正极直流电流
②—双极全压运行正极直流电流
③—双极降压 70% 运行负极直流电流
④—双极全压运行负极直流电流

图 13 逆变侧故障时的直流电流
Fig.13 DC current during inverter side fault



①—双极降压 70% 运行,②—双极全压运行

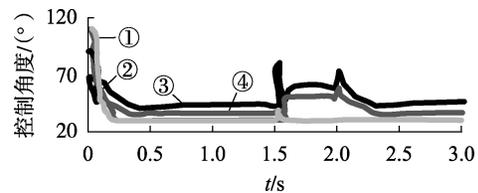
图 14 逆变侧故障时的直流电流指令
Fig.14 DC current order during inverter side fault



①—双极降压 70% 运行,②—双极全压运行

图 15 逆变侧故障时的整流侧触发角

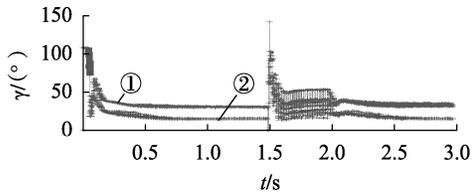
Fig.15 Firing angle during inverter side fault



①—双极降压 70% 运行定直流控制
②—双极全压运行定直流控制
③—双极降压 70% 运行定 γ 角控制
④—双极全压运行定 γ 角控制

图 16 逆变侧故障时的逆变侧控制器输出

Fig.16 Inverter controller output during inverter side fault



①—双极降压 70% 运行, ②—双极全压运行

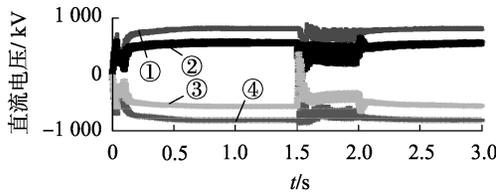
图 17 逆变侧故障时的逆变侧熄弧角

Fig.17 Extinction angle during inverter side fault

总体对比分析可知, 逆变侧交流系统故障更容易引起换相失败, 对特高压直流输电系统的影响更大, 需要引起足够重视。

4.3 换流阀短路故障

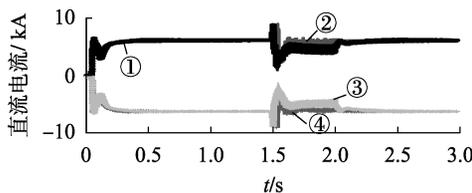
目前对换流阀短路故障情况的仿真很少, 为明确换流阀短路故障对特高压直流输电系统运行的影响, 在仿真模型中设置 $t=1.5\text{ s}$ 时正极、负极高压阀厅内的高端换流器中的 5 号阀出现短路故障, 持续时间为 0.5 s 。双极全压和双极降压 70% 运行方式下, 换流阀短路故障期间的直流电压、直流电流、整流侧触发角、逆变侧熄弧角分别如图 18—21 所示。



①—双极全压运行正极直流电压
②—双极降压 70% 运行正极直流电压
③—双极降压 70% 运行负极直流电压
④—双极全压运行负极直流电压

图 18 换流阀短路故障时的直流电压

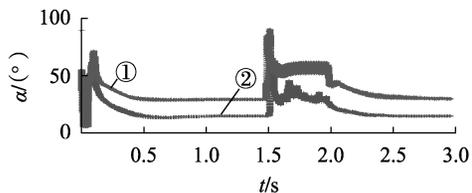
Fig.18 DC voltage during short circuit fault of converter valve



①—双极降压 70% 运行正极直流电流
②—双极全压运行正极直流电流
③—双极降压 70% 运行负极直流电流
④—双极全压运行负极直流电流

图 19 换流阀短路故障时的直流电流

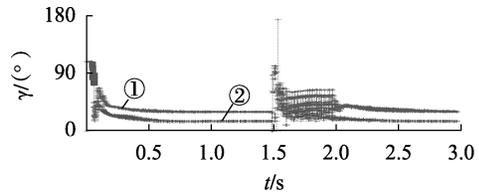
Fig.19 DC current during short circuit fault of converter valve



①—双极降压 70% 运行, ②—双极全压运行

图 20 换流阀短路故障时的整流侧触发角

Fig.20 Firing angle during short circuit fault of converter valve



①—双极降压 70% 运行, ②—双极全压运行

图 21 换流阀短路故障时的逆变侧熄弧角

Fig.21 Extinction angle during short circuit fault of converter valve

分析图 18—21 可知, 换流阀短路故障期间, 直流电压降低, 伴随直流电流增大。与逆变侧发生故障时的仿真结果对比可知, 在换流阀换相期间, 换流阀短路故障将造成交流侧三相短路, 在换流阀非换相期间, 换流阀故障将造成交流侧两相短路。

5 结论

本文对扎鲁特—青州 $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流输电工程的主回路参数进行了设计, 根据相关特高压工程的理论和设计基础给出了两端换流变和换流器的主要参数, 同时参照 HVDC 标准模型建立了该工程的整体仿真模型, 通过该系统双极全压进而降压 70% 运行方式下的仿真计算验证了主回路参数设计和控制系统设计的正确性, 分析了该系统在整流侧和逆变侧交流系统故障以及换流器阀故障下情况下的运行特性。本文为该工程的设备选型及后续相关研究提供了参考, 也为进行各种仿真分析提供了可靠的仿真模型。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2008 年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 田书欣, 程浩忠, 常浩, 等. 特高压电网社会效益分析及评价方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 145-153.
TIAN Shuxin, CHENG Haozhong, CHANG Hao, et al. Analysis and evaluation of social benefit from UHV power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 145-153.

[3] 徐箭, 张华坤, 孙涛, 等. 多馈入直流系统的特高压直流接入方式优选方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 58-63.
XU Jian, ZHANG Huakun, SUN Tao, et al. Optimal selection of UHVDC connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 58-63.

[4] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7.

[5] 聂定珍, 马为民, 李明. 锦屏—苏南特高压直流输电工程换流站绝缘配合[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 92-97.
NIE Dingzhen, MA Weimin, LI Ming. Insulation coordination for converter stations of UHVDC project from Jinping to Sunan[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 92-97.

[6] 马为民, 聂定珍, 曹燕明. 向家坝—上海 $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流工程中的关键技术[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 1-5.

- MA Weimin, NIE Dingzhen, CAO Yanming. Key technical schemes for ±800 kV UHVDC project from Xiangjiaba to Shanghai [J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 1-5.
- [7] 查鲲鹏,高冲,汤广福,等. 哈密南—郑州特高压直流输电工程晶闸管阀设计与试验[J]. 电力建设, 2014, 35(12): 54-60.
- ZHA Kunpeng, GAO Chong, TANG Guangfu, et al. Design and test of thyristor valve for Southern Hami-Zhengzhou ±800 kV/5 000 A UHVDC transmission project [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 54-60.
- [8] 娄彦涛,马元社,刘飞,等. 锦屏—苏南±800 kV 特高压直流工程晶闸管换流阀[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 42-51.
- LOU Yantao, MA Yuanshe, LIU Fei, et al. Thyristor valves in Jinping-Sunan ±800 kV UHVDC project [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 42-51.
- [9] 邹国平,姚晖,何文林,等. 溪洛渡—浙西±800 kV 特高压直流输电工程受端电网直流偏磁治理[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 543-550.
- ZOU Guoping, YAO Hui, HE Wenlin, et al. DC bias suppression of receiving-end power grid in ±800 kV Xiluodu-Zhexi UHVDC project [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 543-550.
- [10] 邓旭,王东举,沈扬,等. ±1 100 kV 准东—四川特高压直流输电工程主回路参数设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 133-140.
- DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. Main circuit parameter design of Zhundong-Sichuan ±1 100 kV UHVDC power transmission project [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 133-140.
- [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] 李勇伟,周康,李力,等. ±800 kV 直流特高压输电线路的设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1518-1525.
- LI Yongwei, ZHOU Kang, LI Li, et al. Design of ±800 kV DC UHV transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1518-1525.
- [13] 王峰,徐政,薛英林. 高压直流输电换流变压器参数确定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 98-102.
- WANG Feng, XU Zheng, XUE Yinglin. Calculation of converter transformer's parameters for HVDC transmission [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 98-102.
- [14] 王峰,徐政,黄莹,等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
- WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.
- [15] 莫丽琼. ±800 kV 特高压直流输电系统谐波不稳定研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 118-122.
- MO Liqiong. Study of harmonic instability for ±800 kV UHVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 118-122.
- [16] 陈仕龙,束洪春,谢静,等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 134-139.
- CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jing, et al. Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 134-139.
- [17] 陈仕龙,束洪春,甄颖. 云广特高压直流输电负极运行换相失败及控制研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 128-133.
- CHEN Shilong, SHU Hongchun, ZHEN Ying. Commutation failure of Yun-Guang UHVDC transmission system running in negative pole state and its control measures [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 128-133.
- [18] 袁阳,卫志农,雷霄,等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.
- YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.

作者简介:



罗汉武

罗汉武(1975—),男,湖北黄石人,高级工程师,博士,主要从事电力企业管理工作;

乐健(1975—),男,湖北黄冈人,副教授,主要从事智能电网运行与控制技术和高压直流输电技术的研究 (E-mail: lej01@mails.tsinghua.edu.cn);

毛涛(1986—),女,湖北黄冈人,助教,硕士,主要从事电能质量与高压直流输电技术的研究;

李猛克(1971—),男,内蒙古通辽人,高级工程师,硕士,主要从事输变电工程管理工作;

徐新尧(1985—),男,内蒙古通辽人,助理工程师,主要从事输变电工程管理工作;

崔士刚(1983—),男,内蒙古通辽人,助理工程师,从事电力科技管理工作。

Analysis of operation characteristics of Zhalu-te-Qingzhou ±800 kV UHVDC system

LUO Hanwu¹, LE Jian², MAO Tao³, LI Mengke¹, XU Xinyao¹, CUI Shigang¹

(1. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Maintenance Company, Tongliao 028000, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Donghu University, Wuhan 430074, China)

Abstract: The main circuit design and operation characteristics of the Zhalu-te-Qingzhou ±800 kV UHVDC power transmission project are simulated and analyzed. Based on the existing design methods of UHVDC projects and the characteristics of this project, the main parameters of the primary devices of the converter stations at both ends are given. The overall PSCAD simulation model of the project is established, and the operation characteristics of this system under both bipolar full voltage and bipolar 70% reduced voltage operating modes are simulated, and the results verify the correctness of the main circuit parameter design. The three-phase short circuit fault at rectifier side, two-phase short circuit fault at inverter side and converter valve short circuit fault are simulated and analyzed, and the operation characteristics of the system under faults are analyzed. The study results provide reference for the follow-up study of Zhalu-te-Qingzhou ±800 kV UHVDC power transmission project.

Key words: UHVDC power transmission; converter transformer; main circuit parameters; operation characteristics analysis

附录

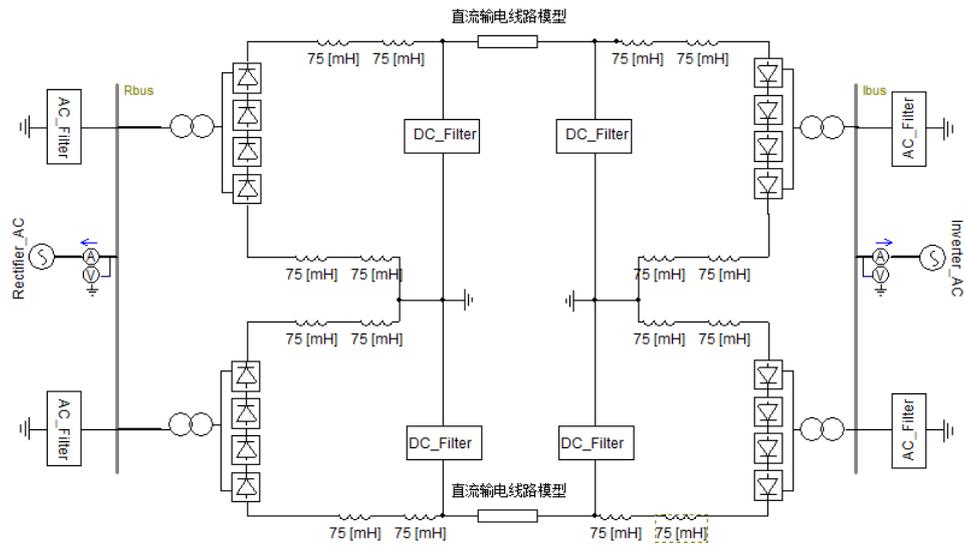


图 A1 特高压直流输电工程仿真模型

Fig.A1 Simulation model of the UHVDC system