

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.011

基于PSCAD的特高压直流输电系统建模与仿真分析

许多¹, 吴峰¹, 史林军¹, 彭琰², 黄弘扬²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:为了对特高压直流输电系统中的故障变化特性进行准确的仿真与分析,在PSCAD/EMTDC仿真平台上,以宾金直流为例,搭建±800 kV, 8 000 MW的特高压双极直流输电系统模型,主要对直流输电系统中的无功补偿设备、滤波装置、直流线路、直流控制系统进行详细建模。对于送、受端交流系统,在换流母线处对两侧实际交流系统进行戴维南等值,搭建了以直流系统为主、交流系统简化的实际系统输电模型。并对直流系统的典型故障换相失败进行仿真分析,分析了换相失败故障发生前后,特高压直流系统中主要电气量的变化。通过与实际故障录波的波形进行对比,验证了模型的可行性。着重分析了逆变侧换流母线上流入受端交流系统有功功率、无功功率的变化。研究结论为分析特高压直流换相失败故障对于实际交流系统的影响提供了技术支持。

关键词:换相失败;特高压双极直流输电系统模型;直流控制系统;戴维南等值;PSCAD/EMTDC仿真平台

中图分类号:TM721.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)03-0071-07

0 引言

为有效解决我国能源资源中心和负荷消耗中心在地理上逆向分布的问题,提出了基于晶闸管的特高压直流(ultra highvoltage direct current, UHVDC)输电工程新理论^[1-3]。然而,换流器中换流桥间的桥间短路、晶闸管误导通、晶闸管不导通以及换相失败等都会引起严重的直流系统故障。其中,换流器的换相失败是一种常见的故障类型,会给直流输电系统以及两侧的交流输电系统带来不可预估的损害和影响。

在电磁暂态尺度上,关于UHVDC输电系统建模的研究主要涉及建立模型结构、控制参数优化、故障仿真等多个方面^[4-6]。研究对象上可分为传统的单馈入直流输电系统、多馈入直流输电系统和混合直流输电系统等^[7]。从换相失败的故障类型上可分为换相失败、双重换相失败、连续换相失败、不连续换相失败等多种故障类型^[8-9]。从仿真工具上,可分为在线仿真平台(如RTDS)和离线仿真平台(如PSCAD/EMTDC)等。

目前,国内外关于直流系统建模和换相失败的故障的研究已有较为成熟的理论。文献[10-12]从换相电压对时间的面积角度阐述了励磁涌流、故障合闸角、谐波导致换相失败的机理。文献[13-16]从换相电压、直流电流、熄弧角等多个角度对换相失败的机理进行阐述。文献[17-19]以实际直

流输电工程为实例,建立实际的直流输电模型,以具体的换相失败故障为实例,分析预防换相失败发生的恢复手段和控制策略。文献[20-21]论述了多馈入直流输电系统中单一输电线路发生换相失败故障与电网运行中的其他直流、交流输电线路间的交互影响,并建立合适的交互作用因子评定输电线路间换相失败的交互作用效果。

目前我国主要电网框架是在以PSASP和BPA为主的2个机电暂态仿真软件中构建的,进行直流系统仿真时,BPA中的换流器模型主要采用直流系统换流器的准稳态模型,PSASP直接采用稳态模型^[22-24],不能很好地模拟直流系统发生故障后的暂态特性^[25-26]。针对这些问题,在PSCAD电磁暂态仿真软件中搭建与实际UHVDC运行状态相符的双极直流输电系统,对典型的直流故障进行精细化仿真,研究直流故障发生时典型电气量的变化,为后续研究直流系统故障对交流系统的影响奠定基础。

1 UHVDC的结构与控制模式

1.1 UHVDC的结构

UHVDC的结构与高压直流输电系统结构大体一致,具体结构如图1所示。最主要的设备是负责交、直流转换的换流器,除此之外,还由换流变压器、平波电抗器、滤波器、无功补偿设备等一些重要设备组成。

1.2 UHVDC系统的控制模式

UHVDC的控制系统一共分为3层:运行人员控制层、控制层和现场处理层。主要控制结构见图2。

收稿日期:2019-12-21;修回日期:2019-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1766203)

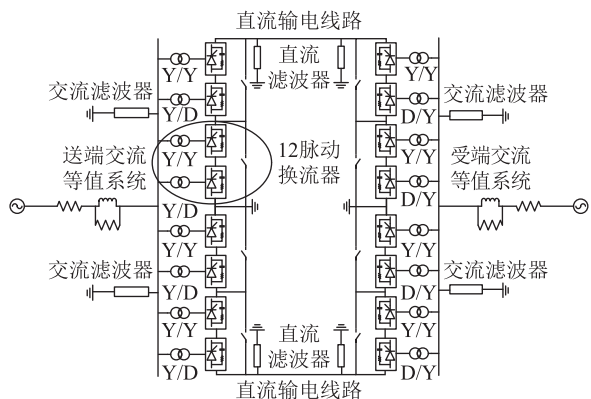


图 1 UHVDC 系统结构

Fig.1 Structure of UHVDC transmission system

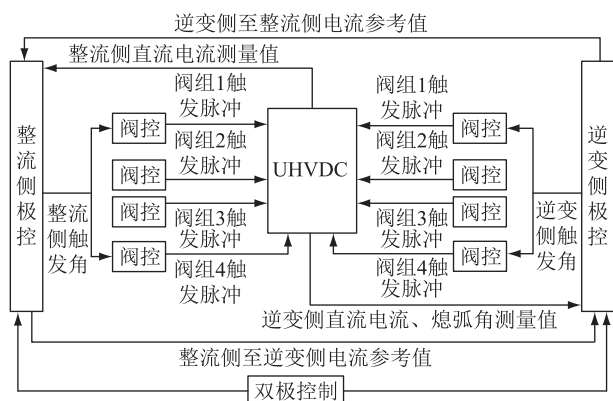


图 2 UHVDC 控制系统

Fig.2 Control system of UHVDC transmission system

UHVDC 常用控制模式大概可以分为 3 种。美国太平洋直流联络线控制系统模型、CIGRE 国际标准化直流输电系统模型和西门子公司为我国贵广、天广直流输电系统设计的实际系统控制模型^[27]。文中主要以 CIGRE 国际标准化直流输电系统模型为参考,结合实际的控制系统,对其中的控制参数进行修正。CIGRE 国际标准化直流输电系统模型的控制模式如图 3 所示。

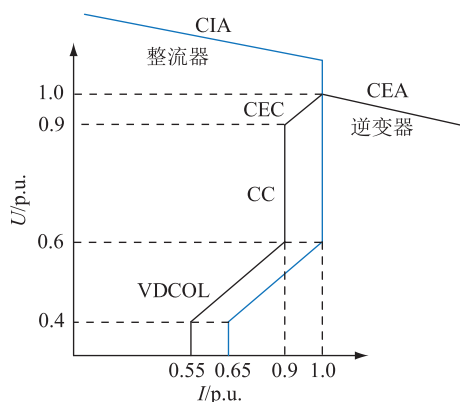


图 3 UHVDC 系统控制模式

Fig.3 Control mode of UHVDC transmission system

整流侧主要采用定触发角 (constant individual

angle, CIA) 控制、定电流 (constant current, CC) 控制和低压限流 (voltage dependent current order limiter, VDCOL) 控制; 逆变侧主要采用定熄弧角 (constant extinction angle, CEA) 控制、电流偏差控制 (constant error control, CEC)、CC 控制和 VDCOL 控制, 有时, 逆变侧还会采用定电压 (constant voltage, CV) 控制。整流侧和逆变侧伏安特性的交点就是系统的运行点, 在 PSCAD 中, 所有控制最终都通过控制换流阀的触发角来实现, 逆变侧定电流控制和定熄弧角控制经最小值比较之后, 触发角的最小值做为最后的控制角输出。

2 UHVDC 系统仿真模型

2.1 主电路仿真模型

UHVDC 系统的主电路模型主要包括: 换流器模型、送端交流系统等值模型、受端交流系统等值模型、交流滤波器模型、换流变压器模型、平波电抗器模型和直流输电线路模型。

2.1.1 换流器模型

文中所搭建的宾金直流 UHVDC 系统为 800 kV 双极直流输电系统。结构如图 1 所示, 2 个 6 脉冲换流器串联组成 1 个 12 脉冲换流器, 成为 1 个换流阀组, 2 个 12 脉冲换流器组成一极。所以, 该 UHVDC 系统单极额定电压为 800 kV 或 -800 kV, 则 1 个换流阀组的额定电压应为 400 kV 或 -400 kV。

在 PSCAD 电磁暂态仿真软件中, 有封装好的 6 脉冲换流器模型, 如图 4 所示。其中, AM、GM 接口用以输出延迟触发角 α 和熄弧角 γ , 便于实时监测变化。AO 输入控制系统对延迟触发角 α 的控制结果, KB 输入控制系统输出的闭锁信号。因此可以直接使用减少工作强度, 2 个 6 脉冲换流器串联可组成 1 个 12 脉冲换流器。

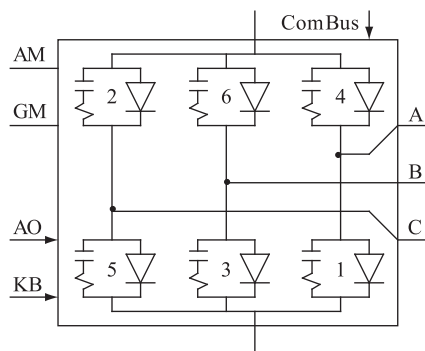


图 4 PSCAD 中 6 脉冲换流器模型

Fig.4 6-pulse converter model in PSCAD

每个 12 脉冲换流器旁配有 1 个旁通断路器, 如果某个 12 脉冲换流器发生故障, 通过控制旁通断

器的开合。可实现12脉冲换流器的退出与投入运行。

2.1.2 等值交流系统模型

搭建PSCAD的UHVDC模型时,采用戴维南等值对两侧交流系统进行简化。在PSASP中对送、受端2个交流系统进行等值,并将等值结果写入PSCAD中的等值模型。

在PSASP中,对宾金直流送、受端交流系统进行短路计算,得到宾金直流的多馈入短路比、短路容量如表1所示。

表1 宾金直流短路计算结果

Table 1 Binjin DC short circuit calculation results

接入母线	短路比	有效短路比	短路容量/(MV·A)
国金华-525	3.85	3.47	40 462.538
川双龙-525	3.01	2.62	29 564.099

由多馈入短路比的计算公式可计算得戴维南等值模型中的阻抗。

$$M_{SDRi} = \frac{S_{aci}}{P_{deqi}} = \frac{U_i^2 / |Z_{eqii}|}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij} / Z_{eqii}| P_{dj}} \quad (1)$$

式中: M_{SDRi} 为直流输电线路 i 的多馈入短路比; S_{aci} 为直流输电线路 i 的短路容量(包含了逆变侧的无功补偿,如果 S_{aci} 中去掉了直流滤波的容量,则计算得到的为多馈入有效短路比); P_{deqi} 为多端口戴维南等值模型中的直流功率; U_i 为换流母线 i 的电压; P_{di} , P_{dj} 分别为直流线路 i, j 的额定功率; Z_{eqij} 为换流母线 i, j 之间的互阻抗; Z_{eqii} 为多端口戴维南等值模型中的自阻抗。

2.1.3 滤波器模型

在整流侧和逆变侧分别配置18个小组,共2 800 Mvar无功补偿容量的交流滤波装置,用以滤除交流系统产生的 $12k \pm 1$ 次谐波;在UHVDC线路整流侧和逆变侧分别配备一组直流滤波器,用以滤除直流线路产生的 $12k$ 次谐波。此外,由于直流系统的运行需要大量的无功补偿,交流滤波器还有一定的无功补偿能力。每一极配置的9组交流滤波器如下:

第一组:1组11/24次双调谐RLC高通滤波器(DT11/24)、1组13/36次双调谐RLC高通滤波器(DT13/36)、1组并联电容器(SC);

第二组:1组11/24次双调谐RLC高通滤波器(DT11/24)、1组13/36次双调谐RLC高通滤波器(DT13/36)、1组并联电容器(SC);

第三组:1组3次高通滤波器(HP3)、2组并联电容器(SC)。

每一极配置的2组直流滤波器为1组12/24次双调谐RLC高通滤波器(HP12/24)和1组6/42次双调谐RLC高通滤波器(HP6/42)。

2.1.4 换流变压器

经计算,换流变压器的基本参数如表2所示。

表2 换流变压器基本参数

Table 2 Basic parameter table of converter transformer

位置	变比	额定容量/(MV·A)	短路阻抗/p.u.	连接方式
整流侧	525 kV/ 174.92 kV	1 273.5	0.23	Y/Y, Y/Δ
逆变侧	525 kV/ 163 kV	1 152.5	0.18	Y/Y, Y/Δ

2.2 控制系统仿真模型

整流侧、逆变侧控制框图如图5所示。依次对上述控制系统模型进行介绍。

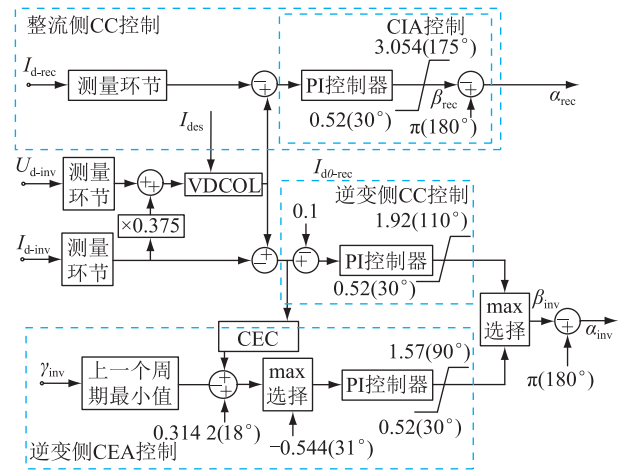


图5 整流侧和逆变侧控制框图

Fig.5 Control block diagram of rectifier and inverter

2.2.1 逆变侧阀组控制模型

逆变侧控制配置是:CEA控制、CC控制、CEC、VDCOL控制,同时VDCOL控制也产生整流侧的电流指令。根据测量得到的逆变侧直流电压和电流,计算出线路中点的直流电压,该电压通过VDCOL控制产生电流指令,该电流指令和CC控制的电流指令相比较,较小的值作为直流系统整流侧电流控制指令。同时整流侧电流指令减去0.1 p.u.的裕度后作为逆变侧的电流指令,该指令与实际测得的逆变侧电流相减后送入PI控制环节,产生CC控制的换相超前角 β 角,该角度的范围是 $30^\circ \sim 110^\circ$ 。文中采用的VDCOL控制为式(2)。通过VDCOL控制,将直流电流限定在 $0.55 \sim 1$ p.u.内。

$$I = \begin{cases} 0.55 & U \leq 0.4 \\ 0.9U + 0.19 & 0.4 < U \leq 0.9 \\ 1 & U > 0.9 \end{cases} \quad (2)$$

由图 5 可知,CEA 控制电路将测量得到的过去一个工频周期内的 4 个六脉冲逆变桥的最小熄弧角作为检测量。其中 0.314 2 对应熄弧角定值 18° , -0.544 对应熄弧角定值 -31° 。将检测到的熄弧角与 18° 的熄弧角定值相减,并对得到的值进行限幅,熄弧角的最大值不超过 49° 。送入 PI 控制器,得到 CEA 控制电路的 β 角,该角度的范围是 $30^\circ \sim 90^\circ$ 。

最后,从 CC 控制电路和 CEA 控制电路中得到的 2 个不同的 β 角中对比出一个较大的值输出,用 π 减去换相超前角 β_{inv} 之后即可知道逆变器的触发角的指令信号 α_{inv} 。

同时,CEA 控制部分还配备有 CEC 环节,将 VDCOL 控制得到的结果和实际测得的电流相减作为该环节的输入值。将逆变器熄弧角的控制策略期望值与实际测量结果相减所得的熄弧角增量 $\Delta\gamma$ 作为输出值。该环节的作用是使电流尽快回升至给定值。

3.2.2 整流侧阀组控制模型

整流侧的控制配置为 CIA 控制、CC 控制和 VDCOL 控制。由图 5 可知,由逆变侧传来的电流指令减去实际测得的经过滤波之后的整流侧电流之后,通过 PI 控制器得到整流侧换相超前角 β_{rec} 角,用 π 减去 β_{rec} 后即可得到触发角的指令信号 α_{rec} 。PI 控制器的最大值为 3.054,最小值为 0.52,对应于触发角 α 的变化范围为 $50^\circ \sim 150^\circ$ 。

3 模型仿真验证

3.1 不对称故障情况下的换相失败仿真

设置仿真时间 1.5 s,仿真步长 $50 \mu\text{s}$,在 UHV-DC 系统的正极、负极换流母线处设置单相接地不对称故障,0.25 s 设置交流故障,故障持续 0.05 s。由于正极、负极设置了相同故障,其功率波形大致相同,电压、电流波形相反,文中仅针对正极波形进行分析。故障发生前后仿真波形见图 6 和图 7。

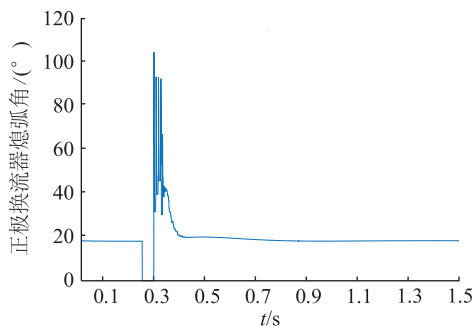


图 6 单相故障时熄弧角随时间变化情况
Fig.6 The arc-extinguishing angle changes with time in single-phase faults

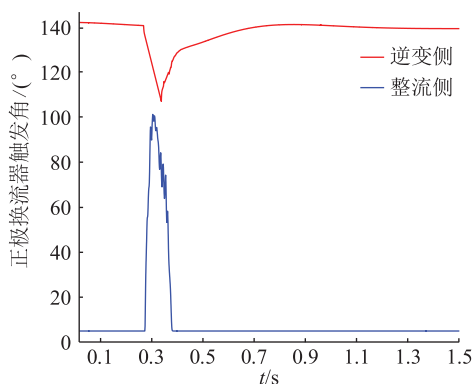


图 7 单相故障时触发角随时间变化情况
Fig.7 The Trigger angle changes with time in single-phase faults

由图 6 可知,在 0.25 s 故障开始之后,正极换流器熄弧角降为 0° ,发生换相失败故障。由图 7 可知,通过直流系统的控制受端,整流侧的触发角变大,延迟触发整流侧的各个换流器,降低直流电流。

需要特别注意,整流侧触发角有短暂超过 90° ,此时 UHVDC 系统向送端交流系统反送功率。与此同时,逆变侧触发角降低,相当于增加了逆变侧换流阀的换相超前角 β_{inv} ,从而稳定直流电压。0.30 s 切除故障之后,熄弧角经过振荡之后恢复正常,整流侧触发角迅速变小,以恢复直流电流。

换相失败故障发生前后,UHVDC 线路上直流电压、直流变化如图 8、图 9 所示。可以看出,发生换相失败故障后,直流电压下降,直流电流先上升后下降,且逆变侧直流电流上升值要比整流侧高。由图 10 可得,换相失败发生之后,VDCOL 迅速起作用,将直流电流维持在 0.55 p.u.,限制直流电流的下降,0.30 s 故障切除之后,直流电压有所回升,直流有功功率也开始上升,此时 VDCOL 退出运行,逆变侧转为 CC 控制,使直流电流迅速回升。0.4 s 之后,直流电流、直流电压基本恢复,逆变侧由 CC 控制转为正常的 CEA 控制,使系统快速恢复到正常状态。

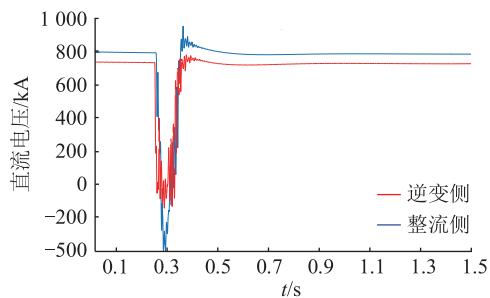


图 8 不对称故障时正极直流电压变化
Fig.8 Positive DC voltage change during asymmetric fault

在换相失败发生之后,由图 11 和图 12 可见,整

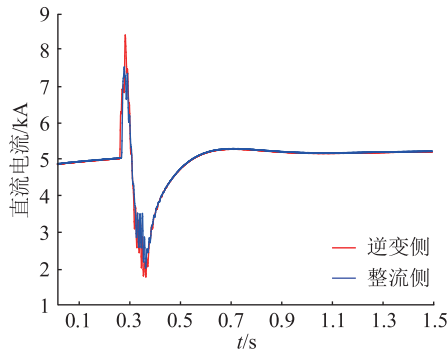


图9 不对称故障时正极直流电流变化

Fig.9 Positive DC current change during asymmetric fault

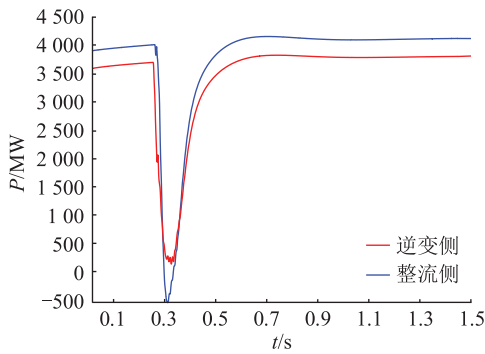


图10 不对称故障时正极直流有功功率

Fig.10 Active power change of positive DC during asymmetric fault

流侧换流站无功需求激增,送端无功补偿会有小幅度的波动,此时,送端无功补偿装置不能满足整流侧换流站的需要,故由送端交流系统提供剩余的无功功率。受到交流系统流入换流母线的无功功率见图13,逆变侧换流站在故障期间由于直流电压的降低,无功需求略有下降,由于受端交流系统无功补偿也降低,此时受端交流系统流入换流母线的无功功率会有所波动,波动的变化取决于逆变站无功功率变化情况和受端无功补偿装置变化的快慢。

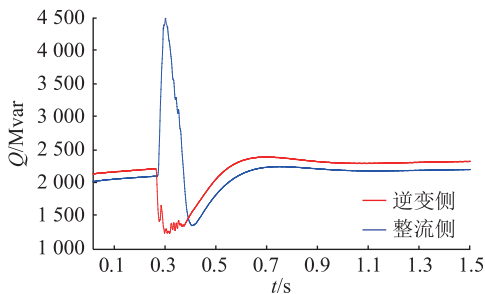


图11 不对称故障时正极直流无功功率

Fig.11 Active power change of reactive DC during asymmetric fault

3.2 仿真结果与实际录波波形对比

最后,将PSCAD搭建的双极UHVDC输电系统

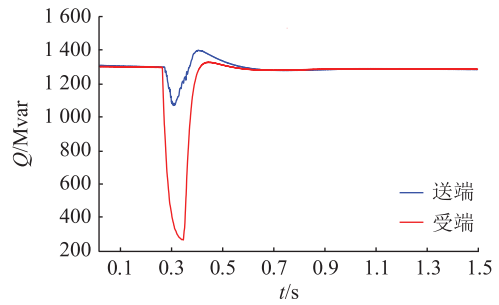


图12 送、受端无功功率补偿发出无功功率

Fig.12 Reactive power change of sending and receiving end reactive power compensation

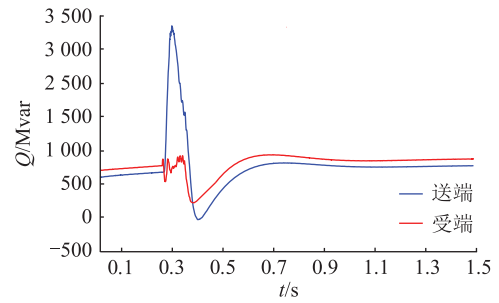


图13 交流系统流入换流母线无功功率

Fig.13 Reactive power change of AC system flowing into commutation bus

中不对称故障导致的换相失败功率波动波形,与宾金直流实际发生单相接地不对称故障的换相失败功率录波数据进行对比。整流站有功功率、无功功率对比如图14、图15所示。

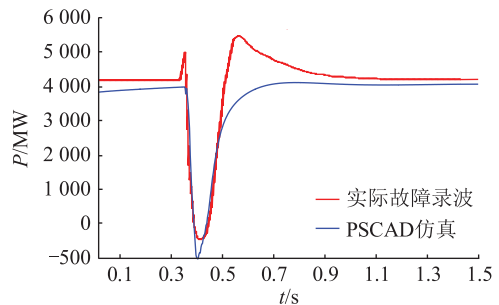


图14 整流站有功功率仿真与实际故障录波对比

Fig.14 Comparison of active power simulation graphs and actual fault recordings of rectifier stations

实际故障录波数据显示,宾金直流发生单相接地不对称故障造成的换相失败时,整流站直流电压下降,直流电流迅速上升,整流站增大触发角 α ,整流站消耗无功功率迅速增加,由2099 Mvar短时长上升至4436 Mvar。

有功功率大幅度下降,换相失败故障结束之后,触发角 α 减小,逐渐恢复稳态运行,在直流电流较小的一段时间内,整流站消耗的无功功率有所减少。此时无功补偿装置仍旧会向直流系统输送无

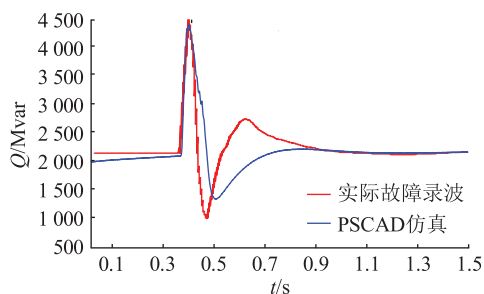


图 15 整流站无功功率仿真与实际故障录波对比

Fig.15 Comparison of reactive power simulation graphs and actual fault recordings of rectifier stations

功率,可能会造成部分的无功功率富裕流向整流侧交流系统,造成交流母线电压的短时上升。

通过与实际功率录波数据的对比,PSCAD 中搭建的双极 UHVDC 输电系统模型,单相接地不对称故障造成的换相失败故障与实际录波波形波动情况大致相同,可验证仿真模型的可行性。

4 结论

文中在 PSCAD 软件中以实际 UHVDC 系统为例,搭建了 800 kV,8 000 MW 的 UHVDC 系统模型。并对直流系统换相失败故障进行仿真。仿真波形与实际波形波动情况大致相同。通过观察在故障产生前后交直流系统中若干变量的变化情况,得出以下结论:

(1) 在 PSCAD 中,对交流系统进行戴维南等值,直流系统详细建模的方式能够较为准确地模拟实际 UHVDC 系统发生换相失败故障时的电气量变化。

(2) UHVDC 系统的控制系统采用 CEA 控制、CC 控制、CEC 控制、VDCOL 控制、CIA 控制等控制系统模型,能够较好地模拟实际 UHVDC 系统发生换相失败故障时主要控制变量的变化。

(3) 换相失败故障可能造成直流电流的激增,以及直流电压下降,从而进一步导致无功需求下降以及受端交流系统流入换流母线的无功功率波动。

本文得到国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS17002P)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 汤奕,郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(2):187-201,335.
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 187-201, 335.

[2] 张建,由静,赵建文,等. 特高压输电线路工程中特殊跨越的研究与应用[J]. 智慧电力,2018,46(7):75-79.

ZHANG Jian, YOU Jing, ZHAO Jianwen, et al. Research and application of special crossing in UHV transmission line project [J]. Smart Power, 2018, 46(7): 75-79.

[3] 姜梦,熊浩清,邓晓璐,等. 特高压直流系统异常运行下的功率特性研究[J]. 智慧电力,2018,46(5):58-64.
JIANG Meng, XIONG Haoqing, DENG Xiaolu, et al. Study on power characteristics of UHVDC under abnormal operation[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 58-64.

[4] 阮思焯,徐凯,刘丹,等. 直流输电系统换相失败统计分析及抵御措施建议[J]. 电力系统自动化,2019,43(18):13-17,34.
RUAN Siye, XU Kai, LIU Dan, et al. Statistical analysis and suggestion on resistance measures for commutation failures of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 13-17, 34.

[5] 饶宇飞,张鹏辉,李程昊,等. 励磁涌流对高压直流输电系统换相失败的影响机理及评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(13):54-61.
RAO Yufei, ZHANG Penghui, LI Chenghao, et al. Mechanism and evaluating method for HVDC commutation failure caused by inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 54-61.

[6] 景柳铭,王宾,董新洲,等. 高压直流输电系统连续换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):116-123.
JING Liuming, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Review of consecutive commutation failure research for HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 116-123.

[7] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.

[8] 王钢,李志铿,黄敏,等. HVDC 输电系统换相失败的故障合闸角影响机理[J]. 电力系统自动化,2010,34(4):49-54.
WANG Gang, LI Zhikeng, HUANG Min, et al. Influence of initial fault voltage angle on commutation failure identification in a HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 49-54.

[9] 邵思语,黄振琳,刘永强,等. 基于交流系统非特征谐波的 HVDC 换相失败风险评估及抑制策略[J]. 电网技术,2019,43(10):3466-3476.
SHAO Siyu, HUANG Zhenlin, LIU Yongqiang, et al. Risk assessment and suppression strategy of hvdc commutation failure based on non-characteristic harmonics in AC system[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3466-3476.

[10] 刘磊,林圣,刘健,等. 控制器交互不当引发连续换相失败的机理分析[J]. 电网技术,2019,43(10):3562-3568.
LIU Lei, LIN Sheng, LIU Jian, et al. Mechanism analysis of continuous commutation failure caused by improper interaction of controllers[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3562-3568.

[11] 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.
- [12] 朱韬析, 宁武军, 欧开健. 直流输电系统换相失败探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23):116-120.
ZHU Taoxi, NING Wujun, OU Kaijian. Discussion on commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23):116-120.
- [13] 吴萍, 林伟芳, 孙华东, 等. 多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J]. 电网技术, 2012, 36(5):269-274.
WU Ping, LIN Weifang, SUN Huadong, et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5):269-274.
- [14] 李新年, 易俊, 李柏青, 等. 流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]. 电网技术, 2012, 36(6):266-271.
LI Xinnian, YI Jun, LI Baiqing, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(6):266-271.
- [15] 邵瑶, 汤涌. 采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4):108-114, 11.
SHAO Yao, TANG Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4):108-114, 11.
- [16] 周仕豪, 唐飞, 刘涤尘, 等. 考虑降低多馈入直流换相失败风险的动态无功补偿配置方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(10):3258-3265.
ZHOU Shihao, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Dynamic reactive power compensation configuration method for reducing the risk of commutation failure in multi-infeed DC system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10):3258-3265.
- [17] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
LIU Zhenya. Ultra high voltage AC&DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [18] 陈中, 朱政光, 周涛. 基于换相面积的 CSCC-HVDC 输电特性研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1):6-13.
CHEN Zhong, ZHU Zhengguang, ZHOU Tao. Research on the transmission characteristics of CSCC-HVDC based on commutation area[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1):6-13.
- [19] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1):1-10.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1):1-10.
- [20] DU Z, WANG Z, DING J, et al. Influence of load models on commutation failure in HVDC transmission systems[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2018.
- [21] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure analysis in multi-Infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1):378-384.
- [22] 周生奇, 贾旭, 陈立征. 适用于大电网机电暂态分析的宁东直流模型探讨[J]. 电子制作, 2016(S1):67-69.
ZHOU Shengqi, JIA Xu, CHEN Lizheng. Discussion on Ningdong DC model suitable for large-scale electrical and mechanical transient analysis of power grids[J]. Electronic Manufacturing, 2016(S1):67-69.
- [23] 于占勋, 朱倩茹, 赵成勇, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(一):含直流馈入的山东电网 EMTDC 建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24):58-64.
YU Zhanxun, ZHU Qianru, ZHAO Chengyong, et al. Impact of HVDC transmission commutation failure on AC line protection(1): modeling and simulation of Shandong power grid EMTDC with DC feeding[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24):58-64.
- [24] 金贻涛, 杨军, 吴赋章, 等. 基于 PSASP 和 MATLAB 联合仿真的 PSS 参数整定研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(10):71-77, 102.
JIN Yitao, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Study on PSS parameter tuning based on PSASP and MATLAB co-simulation[J]. Smart Power, 2018, 46(10):71-77, 102.
- [25] 徐政, 蔡晔, 刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2002(15):4-8.
XU Zheng, CAI Ye, LIU Guoping. Relevant issues of simulation calculation of large-scale AC/DC power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002(15):4-8.
- [26] 周前, 张潮, 张宁宇, 等. 2018 年多直流馈入江苏规划电网连锁换相失败分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1):51-57.
ZHOU Qian, ZHANG Chao, ZHANG Ningyu, et al. Analysis on the failure of chain commutation of multi-DC feeding into Jiangsu planning power grid in 2018[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1):51-57.
- [27] 郑超, 盛灿辉, 林俊杰, 等. 特高压直流输电系统动态响应对接端交流电网故障恢复特性的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(3):555-561.
ZHENG Chao, SHENG Canhui, LIN Junjie, et al. Effects of the dynamic response of UHVDC transmission system on the fault recovery characteristics of the receiving AC network[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3):555-561.

作者简介:



许多

许多(1995),女,硕士在读,研究方向为直流输电系统建模与控制(E-mail:1583288042@qq.com);

吴峰(1977),男,博士,教授,研究方向为电力系统建模与控制;

史林军(1976),男,博士,副教授,研究方向为新能源及电力系统分析与控制。

Fault diagnosis method of UHVDC transmission line based on feature selection and TCED

DING Jinjin¹, TANG Hansong², GAO Bo¹, ZHANG Feng¹, LI Yuansong¹, SUN Hui¹

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hefei 230061, China;

2. Jiangsu Lingchuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China)

Abstract: In view of problems existing in multi-terminal ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission line, such as wide fault range and easy malfunction of protection actions, a fault diagnosis method based on wavelet transform and transient current energy difference (TCED) is proposed. Firstly, the wavelet transform is used to analyze fault current, and a mother wavelet selection method based on Pearson product-moment correlation coefficient is proposed. Then, the fault direction is determined by characteristics of TCED between two sides of the fault. The fault area is determined by fault direction information of each converter station. Finally, PSCAD / EMTDC simulation model of four terminal UHVDC transmission line is established, and performance of the proposed method is demonstrated in terms of fault location, resistance and distance. The simulation results show that the proposed method can effectively distinguish the power system transient disturbance and DC fault, accurately determine the fault area of the line, sharply improve accuracy of determination and shorten detection time.

Keywords: wavelet transform; feature selection; transient current energy difference (TCED); fault diagnosis; multi-terminal ultra-high voltage direct current transmission

(编辑 吴楠)

(上接第 77 页)

Modeling and simulation analysis of UHVDC transmission system based on PSCAD

XU Duo¹, WU Feng¹, SHI Linjun¹, PENG Yan², HUANG Hongyang²

(1. School of Energy and Electrical, HOHAI University, Nanjing 211100, China; 2. State Grid

Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: When studying the interaction between the ultra high-voltage direct current (UHVDC) system and the AC system, the accurate electrical quantity changes of DC fault are important. In order to accurately simulate and analyze the characteristics of fault changes in UHVDC transmission systems, on the PSCAD/EMTDC simulation platform, taking Binkin DC transmission system as an example, a 800 kV, 8 000 MW bipolar UHVDC transmission system model is built. This model mainly details the reactive power compensation equipment, filtering device, DC line and DC control system in the DC transmission system. For the transmission and reception AC systems, the Thevenin equivalents of the actual AC systems on both sides are made at the converter bus, and a practical system transmission model with a DC system as the main and a simplified AC system is built. The commutation failure of typical faults in the DC system is simulated and analyzed. The main electrical changes in UHVDC system before and after the failure of commutation failure are analyzed. The feasibility of the model is verified by comparing with the waveform of the actual fault recorder. The changes of active power and reactive power flowing into the receiving AC system on the inverter-side converter bus are emphasized. The research conclusion provides technical support for analyzing the impact of UHVDC commutation failure faults on the actual AC system.

Keywords: commutation failure; ultra high-voltage direct current (UHVDC) transmission system model; DC control system; Thevenin equivalent; PSCAD/EMTDC

(编辑 方晶)