

计及柔性直流的城市电网多源无功控制及 短路电流修正策略

唐晓骏^{1*}, 罗红梅¹, 陈萌¹, 霍启迪¹, 冯煜尧², 冯楠²

(1. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192;

2. 国网上海市电力公司, 上海市 虹口区, 200437)

Multi-source Reactive Power Control and Short-circuit Current Correction Strategy for Urban Power Grid Considering VSC-HVDC

TANG Xiaojun^{1*}, LUO Hongmei¹, CHEN Meng¹, HUO Qidi¹, FENG Yuyao², FENG Nan²

(1. State Key Laboratory of Grid Security and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute), Haidian District,

Beijing 100192, China; 2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Hongkou District, Shanghai 200437, China)

Abstract: There are a series of problems in urban power grids, such as limited power supply capacity and insufficient reactive power reserves. Concerning reactive power control, VSC-HVDC is incorporated into the coordinated control system of traditional reactive power support sources (generator, capacitor bank, and switching capacitor) of the urban power grid by using the advantages of VSC-HVDC dynamic reactive power transfer in a fast and flexible way. The advantages of the fast response of flexible direct transient voltage control and the low cost of traditional VSCs are fully exploited. A multi-source reactive power CO control strategy for an urban power grid was proposed, and its effectiveness was verified in an actual power grid simulation. Considering the risk of over-standard short-circuit current caused by VSC-HVDC connected to an urban power grid, the calculation results of the remote fault scenario of VSC-HVDC are conservative according to the existing short-circuit current calculation methods. This paper presents a simplified calculation method for short-circuit current considering the influence of VSC-HVDC access, which can meet the needs of short-circuit calculation accuracy in the case of remote faults of urban power grids and support the engineering calculation of short-circuit current in actual power grids.

Keywords: VSC-HVDC; urban power grid; reactive power control; short-circuit current

摘要: 城市电网存在着供电能力有限、无功储备不足等问题,合理的接入柔性直流可以有效地缓解上述问题。在无功控制方面,提出城市电网多源无功协调控制策略,利用柔性直流动态无功调出迅速、灵活可控的优点,将柔性直流纳入城市电网传统无功支撑源(发电机、调相机、投切电容等)协调控制体系,充分发挥柔直暂态电压控制响应迅速、传统无功源稳态电压控制低成本优势,在实际电网仿真中验证控制策略的有效性。考虑柔性直流接入城市电网后可能带来的短路电流超标风险,针对现有的短路电流计算方法对柔性直流远端故障场景计算结果偏保守问题,提出一种考虑柔性直流接入影响的电网短路电流简化计算方法,满足城市电网远端故障时的短路计算精度的需求,支撑实际电网的短路电流工程计算。

关键词: 柔性直流; 城市电网; 无功控制; 短路电流

0 引言

柔性直流输电作为一种新型直流输电技术,具有快速独立地控制与交流系统交换的有功和无功功率、控制接入点交流电压、潮流灵活反转等优势,可灵活运行于有功/无功功率的4个象限,且无需无功补偿装置,甚至可以根据需要向系统提供无功支援。

有功支撑能力方面,柔性直流能够独立的进行电力传输和对电能质量的控制。柔性直流输电系统可在允许范围之内对有功进行独立的控制。与此同时柔性直流输电不需要通过交流系统的无功电压支撑能力来维持输出电压和频率,与传统直流输电所需要的最小短路容量要求不同,这种特性有助于柔性直流输电系

基金项目: 国家电网公司科技项目(改善大型城市电网电压支撑能力技术措施研究与示范应用, 52094016000Y)。

Science and Technology Foundation of SGCC (Research and Demonstration Application of Technical Measures to Improve Voltage Support Ability of Large-scale Urban Power Grid, 52094016000Y)。

统对弱电网或孤网进行送电。

无功支撑能力方面,柔性直流输电不仅不需要交流侧提供无功补偿,还能起到静止同步补偿器(STATCOM)的作用,即向交流系统提供动态无功支撑以稳定交流母线电压。这意味着故障时柔性直流既可以提供有功功率紧急支援又可以提供无功功率紧急支撑,从而有效提高城市电网的稳定运行水平。本文基于柔性直流输电技术无功支撑方面的特点,将柔性直流纳入城市电网传统无功支撑源,并设计城市电网暂态电压无功紧急控制策略,以实现故障后城市电网的电压无功紧急控制,解决故障后分区电压持续偏低问题。

在短路电流方面,目前城市电网短路电流水平普遍较高,其中柔性直流将提供一定的短路电流。在传统的短路电流计算程序中,远端故障时柔性直流提供的短路电流计算过程复杂,同时结果偏保守。本文提出一种考虑柔性直流接入影响的电网短路电流计算简化方法,用于实际电网的短路电流计算,在简化算法的同时提高柔性直流接入点远端故障时电网短路计算结果的精度。

1 柔性直流应用于城市电网构想

1.1 城市电网面临的问题

随着建设迅速发展,城市电网负荷水平及调控难度越来越高,尤其是电动汽车、5G通信等技术普及,使得城市电网负荷水平连年攀升。电网调控方面,负荷持续增长、低碳减排背景下大量常规机组关停,城市电网“空心化”趋势愈发明显,造成分区解环运行的城市电网各分区有功互济能力被不断压减,电压支撑能力愈发受限,给城市电网的紧急状况下的电压稳定控制带来巨大考验。

当前城市电网主要面临以下问题:

- 1) 城市电网负荷迅速增长,峰谷负荷差异较大,有功分区互济、无功紧急支援能力愈发薄弱。
- 2) 土地资源的稀缺,环保政策等现实因素使得城市电网新增交流输电通道、常规电源等方案基本不切实际,常规方案化解城市电网有功、无功电压问题困难。
- 3) 城市电网网架结构相对密集,造成短路电流超标风险较高,约束了城市电网的进一步升级建设。

1.2 柔性直流应用于城市电网方案构想

柔性直流可以独立的传输电力和控制电能质量,

为城市电网有功功率灵活调控提供了技术基础。柔性直流可以进行动态无功的支撑,当交流系统故障发生时,不需要交流对其提供无功支撑。在短路电流方面,当交流系统发生故障时,柔性直流注入短路电流水平相对较小。柔性直流技术应用于城市电网,为化解城市电网面临的风险问题提供了新的解决思路。应用于城市电网的柔性直流输电系统的结构示意图如图1所示。

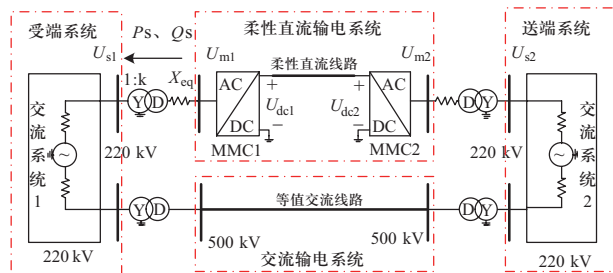


图1 应用于城市电网的柔性直流系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VSC-HVDC system applied to urban power grid

2 计及柔性直流的城市电网多源无功控制策略

2.1 计及柔性直流的城市电网多源无功控制策略方案设计

发生暂态故障冲击时,发电机、调相机、柔性直流通常会依据自身的电压无功控制特性自行检测端口电压或无功功率交换变化而自行动作,缺少相互之间的协调和配合。

正常运行条件下,柔性直流与交流系统间通常采用定无功功率模式,以减小与交流系统间的无功功率交换。发生严重故障时,从柔性直流设备自身角度来看可以通过两种手段增加对交流系统的无功电压支撑,一是检测到预想故障冲击或无功交换超过某一门槛值时,迅速将换流站无功输出调整至最大值,向交流系统提供动态无功支持;二是换流站迅速从定无功功率控制模式切换至定交流母线电压模式,控制指定的交流系统母线电压至设定值,以防止分区电网电压崩溃或持续低电压。

同步旋转坐标系下交流电压 U_s 及柔性直流同交流系统交换功率 P 和 Q 可分别表示为

$$\begin{cases} U_s = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \\ P = \frac{3}{2}(u_{sd}i_d + u_{sq}i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(u_{sd}i_q - u_{sq}i_d) \end{cases} \quad (1)$$

式中： u_{sd} 、 u_{sq} 分别为同步旋转坐标系下交流电压 U_s 在d-q轴电压分量； i_d 、 i_q 分别为柔性直流换流站输出电流在d-q轴电流分量。

柔性直流换流站输出电流 i_d 分量同交流电压 U_s 同相位，故 $u_{sd}=U_s$ ， $u_{sq}=0$ ，式（1）可简化为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} u_{sd} i_d \\ Q = \frac{3}{2} u_{sd} i_q \end{cases} \quad (2)$$

在正常控制方式下，柔性直流采用定无功功率控制，无功功率控制定值为 Q_{ref1} ，依据式（2）转换为q轴电流 i_{ref1} ，此时控制流程图如图2所示。

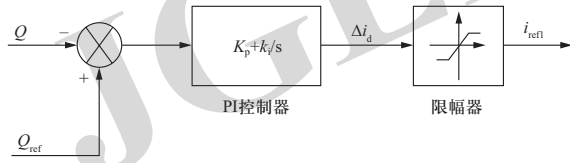


图2 定无功功率控制流程图

$$Q = Q_{ref1} = \frac{3}{2} u_{sd} i_{q,ref1} \quad (3)$$

由此可见，定无功功率控制方式下，柔性直流换流站同交流系统无功功率交换量不随交流系统电压变化而改变。

当柔性直流采用最大输出无功功率控制方式时，柔性直流无功电流参考值及输出无功功率 Q_{max} 表示为

$$i_{q,ref2} = i_{q,max} \leq i_{max} \quad (4)$$

$$Q_{max} = \frac{3}{2} u_{sd} i_{q,ref2} \quad (5)$$

当柔性直流采用定交流电压控制方式时，控制流程图如图3所示。

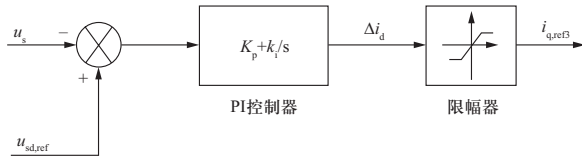


图3 定交流电压控制流程图

$$i_{q,ref3} = K_{U_{sp}} (U_{s,ref} - U_s) + K_{U_{si}} \int (U_{s,ref} - U_s) dt \quad (6)$$

$$Q = \frac{3}{2} u_{sd} \left\{ K_{U_{sp}} (U_{s,ref} - U_s) + K_{U_{si}} \int (U_{s,ref} - U_s) dt \right\} \quad (7)$$

式中： $K_{U_{sp}}$ 为定交流电压控制器比例系数； $K_{U_{si}}$ 为积分系数； $U_{s,ref}$ 为交流电压参考值； U_s 为交流电压实际值。

发电机和调相机方面，其通常会根据机端电压水

平的变化实时控制其无功功率输出，在暂态故障清除后随着母线电压的恢复迅速降低发电机和调相机无功输出，图4为故障后容量300 Mvar调相机的无功输出曲线，可以看出故障清除后其无功输出迅速降低至180 Mvar左右，远低于其额定输出能力。当分区电网因故障后持续低电压或其他调压手段不足时，发电机和调相机未能充分发挥作用。

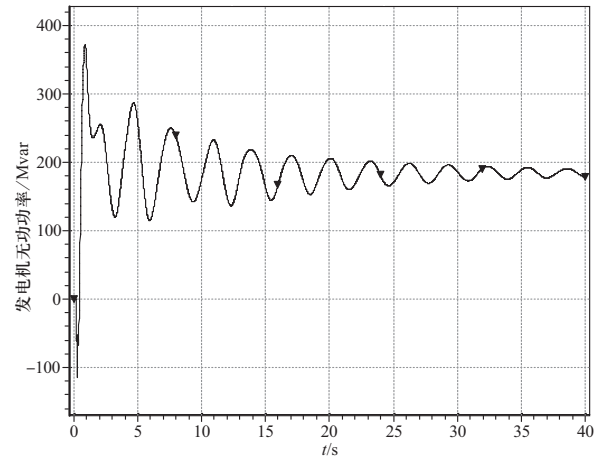


图4 典型故障下调相机无功输出特性

Fig. 4 Reactive power output characteristic of the phase modifier under typical faults

本文基于稳控装置设计城市电网暂态电压无功紧急控制策略，以实现故障后城市电网的电压无功紧急控制，解决故障后分区电压持续偏低问题。

其基本思路为：针对故障冲击后分区电压恢复情况，选择关键枢纽母线电压作为监控对象，选择调相机、发电机、柔性直流及快速开关控制的常规电容/电抗为控制手段，实现对故障后分区电压的紧急控制，以避免持续低电压和电压失稳。协调控制方法的动作逻辑如图5所示，当检测到关键母线电压低于设定门槛值时，结合各子站电压无功可控资源，决策后向调相机/发电机子站发送强励信号，向柔性直流逆变器发送无功调整指令或控制方式切换指令，向变电站子站发送快速投切电容/电抗指令，以快速恢复关键母线电压。

鉴于快速投切电容、电抗的各种限制因素，以及柔性直流等昂贵电力电子设备运行的经济性，考虑调相机具有容量高，造价相对较低，无功功率调出迅速等优点，故而控制元件的选择顺序建议为调相机、发电机、柔性直流、快速投切电容/低抗。

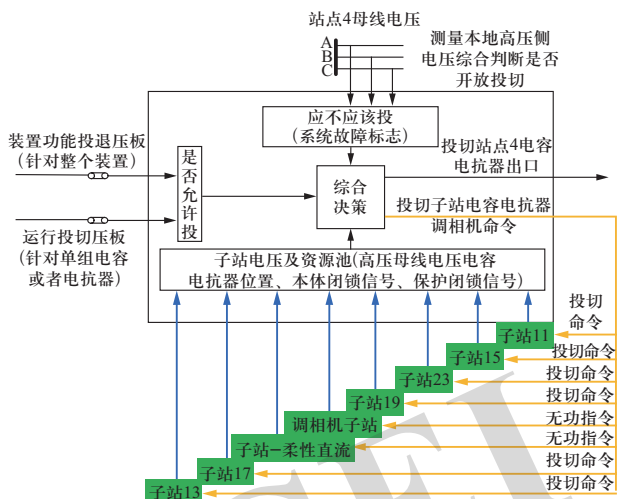


图5 协调控制方法的动作逻辑

Fig. 5 Action logic of coordinated control method

2.2 多源无功控制策略在实际城市电网应用算例

本文以某城市电网PSD-BPA仿真数据为基础,进行多源无功控制策略在实际城市电网应用中的分析。如图6所示,某城市电网500 kV网架由4、5、6、7等500 kV母线及相连线路组成。城市电网有3个220 kV供电分区:1)以站点4一台主变同站点6两台主变联合供电的供电分区A;2)以站点6两台主变和站点7两台主变联合供电的供电分区B;3)以站点9两台主变、站点8两台主变联合供电的供电分区C。

以该城市电网为基础,构建基于柔性直流互联的城市分区电网,在每一分区内建设一台换流站,供电分区A对应换流站1,供电分区B对应换流站2,供电分区C对应换流站3,每台换流站额定容量1000 MW。接入城市电网的三端柔性直流架构见图6。

以该城市电网供电分区A为研究对象,分析严重故障冲击下采用电压无功紧急控制策略的效果。正常

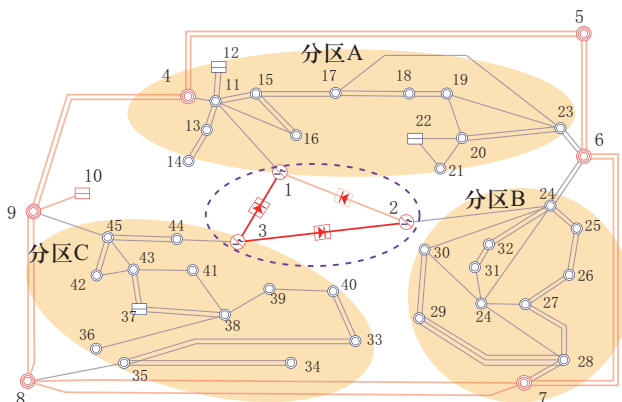
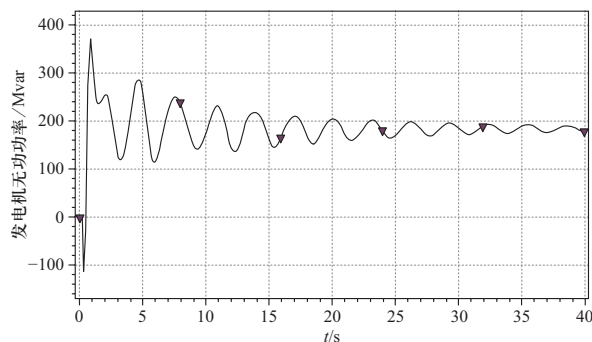


图6 城市电网结构

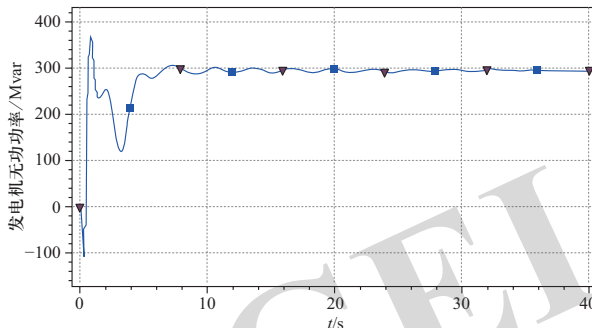
Fig. 6 Structure of urban power grid

方式下柔性直流站点1送站点2有功功率300 MW,送站点3有功功率300 MW,三换流站无功控制方式均为定无功功率控制,控制定值0 Mvar。故障形式为站点6主变N-2三永短路故障。

控制元件的选择顺序为调相机、发电机、柔性直流、快速投切电容/低抗,通过仿真分析,故障后紧急控制系统通过调相机的励磁控制即可达到提高母线电压恢复情况的效果。如图7所示,调相机(额定容量300 Mvar)初始运行于无功输出0 Mvar。配置无功控制策略前,故障后其自然响应增加无功输出至稳态工况,输出无功功率190 Mvar;采取文中所提无功控制策略后,其故障后稳态无功输出显著增加,无功输出达到调相机的额定容量300 Mvar。



(a) 采用无功控制策略前调相机无功功率



(b) 采用无功控制策略后调相机无功功率

图7 紧急控制系统配置前后调相机无功输出

Fig. 7 Reactive power of phase modifier before and after emergency control system is configured

电压无功紧急控制策略配置前、配置后,故障情况下柔性直流、发电机的动态无功输出如图8—图9所示,关键母线电压曲线如图10所示。

通过上述仿真分析可见:

1) 故障后通过电压无功紧急控制,调相机较原有控制模式向交流系统提供了更多的无功功率支撑,相应降低了发电机、柔性直流的无功输出,提高了设

备运行经济性。

2) 故障后关键母线电压恢复水平较原有控制模式下显著提高。

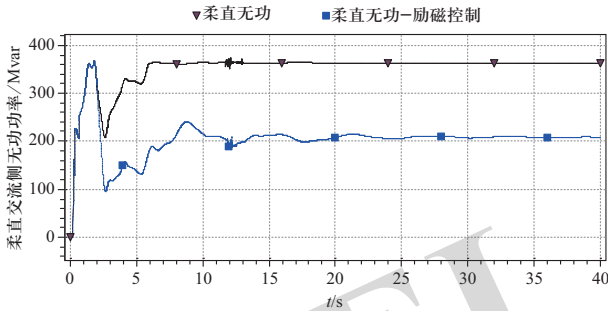


图8 紧急控制系统配置前后柔性直流无功输

Fig. 8 Reactive power of VSC-HVDC before and after emergency control system is configured

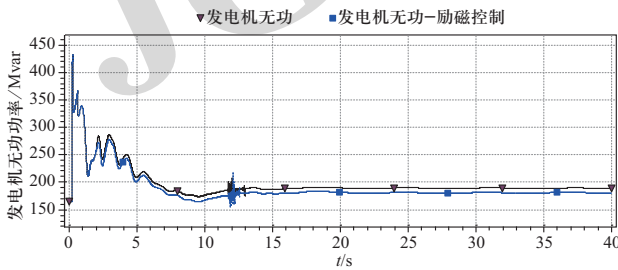


图9 紧急控制系统配置前后区内发电机无功输出

Fig. 9 Reactive power of power plant before and after emergency control system is configured

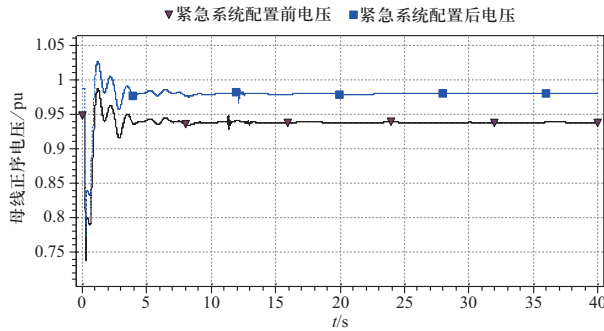


图10 紧急控制系统配置前后母线电压对比

Fig. 10 Bus voltage before and after emergency control system is configured

3 计及柔性直流的城市电网远端故障后短路电流的计算方法

3.1 远端故障后柔直提供短路电流的计算方法介绍

柔性直流输电提供的短路电流可以由传统算法得到，但在实际工程应用中过于繁琐，同时现有的计

算程序又存在缺陷。为了克服现有技术的缺陷，本文提出了一种考虑柔直影响的短路电流计算简便方法。

考虑柔直影响的短路电流计算修正方法包括以下步骤：

1) 采用短路电流计算程序BPA-SCCP，计算柔性直流接入点短路故障时柔性直流注入短路点的短路电流 $I_{VSC,f}$ 。

2) 采用短路电流计算程序BPA-SCCP，将柔性直流连接方式改为交流线路连接方式，计算步骤1)同一位置发生短路故障时交流线路注入短路点的短路电流 I_f 。

3) 计算采用柔直连接和交流线路连接两种方式下注入短路点短路电流的比值 k ：

$$k = \frac{I_{VSC,f}}{I_f} \quad (8)$$

4) 交流线路连接方式下，采用短路电流计算程序BPA-SCCP，计算接入点远区发生短路故障时的短路电流 $I_{f,far}$ ，以及该交流线路中提供的短路电流 I'_f 。

5) 根据步骤3)中计算得到的柔直接入点发生短路故障时两种连接方式下短路电流的注入比例，计算接入点远区发生故障时柔性直流提供的短路电流 $I'_{VSC,f}$ ：

$$I'_{VSC,f} = k \times I'_f = \frac{I_{VSC,f}}{I_f} \times I'_f \quad (9)$$

6) 根据步骤4)~5)的计算结果，计算柔性直流连接方式下接入点远区短路故障时的短路电流 $I'_{f,far}$ ：

$$I'_{f,far} = (I_{f,far} - I'_f) + I'_{VSC,f} \quad (10)$$

式中： $I_{f,far}$ 为交流线路连接方式下，接入点远区发生短路故障时的短路电流； I'_f 为柔直连接替换为交流连接时，该交流线路中提供的短路电流，均由步骤4)得到； $I'_{VSC,f}$ 为接入点远区发生故障时柔性直流提供的短路电流，由步骤5)得到。图11为短路电流计算简化法流程示意图。

3.2 仿真计算

本文采用PSD-BPA搭建了与柔性直流连接的经典九节点模型。通过仿真验证，远端故障时考虑柔性直流接入影响的电网短路电流计算修正方法。

采用BPA-SCCP短路电流计算程序，当母线2处采用柔直连接（如图12所示），母线2的三相短路电流值为9.768 0 kA，其中柔直提供的短路电流是8.141 4 kA。

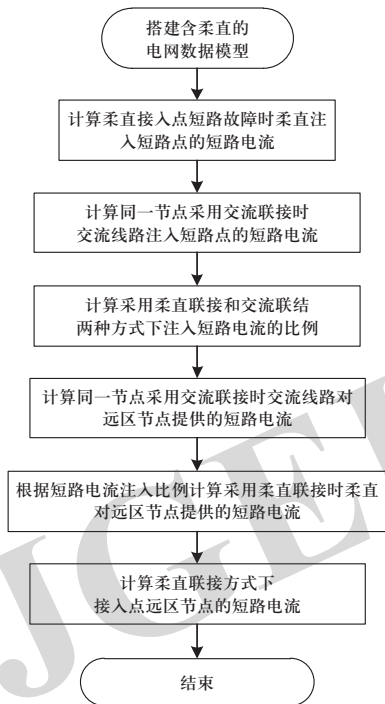


图 11 短路电流计算简化法流程示意图

Fig. 11 Schematic diagram of simplified method for short-circuit current calculation

表 1 九节点柔直连接方式下，母线2短路电流水平

Table 1 Short-circuit current level of busbar 2 under nine-node VSC-HVDC connection

线路名称	短路电流/kA
母线2-母线A	0.788 3
母线2-母线C	0.838 3
母线2-柔直1	4.070 7
母线2-柔直2	4.070 7
总计	9.768 0

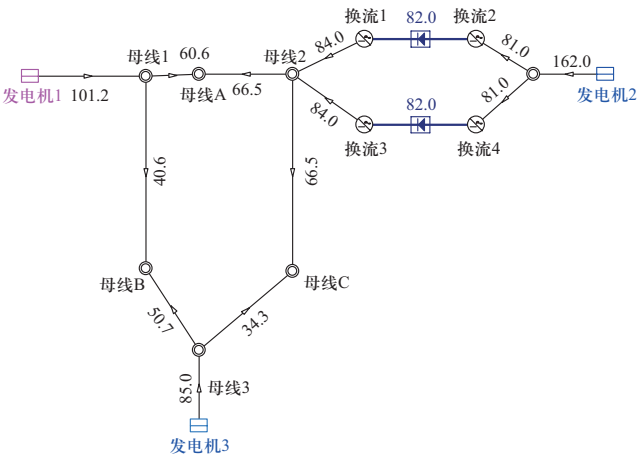


图 12 九节点模型与柔直连接的电网结构图

Fig. 12 Grid structure diagram of a nine-node model connected with VSC-HVDC

将柔性直流连接方式改为交流线路连接方式（如图13所示），计算同一位置发生短路故障时交流线路注入短路点的短路电流。

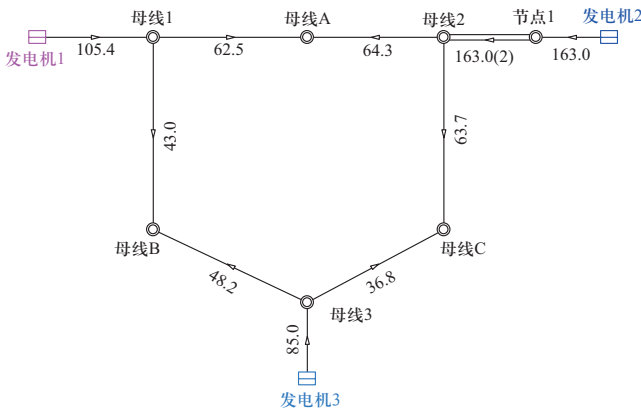


图 13 九节点交流连接方式下电网结构图

Fig. 13 Grid structure diagram of the nine-node model AC connection

母线2处采用交流线路连接，母线2的三相短路电流值为3.150 3 kA，其中节点1-母线2双回线路提供的短路电流为1.657 0 kA。

表 2 九节点模型交流连接方式下，母线2短路电流水平

Table 2 Short-circuit current level of busbar 2 under the nine-node model AC connection mode

线路名称	短路电流/kA
母线2-母线A	0.692 4
母线2-母线C	0.800 9
母线2-节点1	0.828 5
母线2-节点1	0.828 5
总计	3.150 3

计算采用柔直连接和交流线路连接两种方式下注入短路点短路电流的比值 k 。

$$k = \frac{I_{VSC,f}}{I_f} = \frac{8.1414}{1.657} = 4.9133$$

交流线路连接方式下，采用短路电流计算程序BPA-SCCP，计算接入点远区发生短路故障时的短路电流 $I_{f, far}$ ，以及该交流线路中提供的短路电流 I'_f 。

选取距离母线2较远的母线B作为研究节点。计算结果为母线2采用交流线路连接，母线B的三相短路电流值 $I_{f, far} = 2.2815$ kA，其中节点1-母线2双回线路提供的短路电流是 $I'_f = 0.4334$ kA。

根据计算得到两种连接方式下接入点发生短路故障时短路电流的注入比，从而计算接入点远区发生故障时柔性直流提供的短路电流 $I'_{VSC,f}$ 。

$$I'_{VSC,f} = k \times I'_f = \frac{I_{VSC,f}}{I_f} \times I'_f = 4.9133 \times 0.4334 = 2.129$$

计算柔性直流连接方式下接入点远区短路故障时的短路电流 $I'_{f, far}$ 。

$$I'_{f, far} = (I_{f, far} - I'_f) + I'_{VSC,f} = (2.2815 - 0.4334) + 2.129 = 3.978$$

3.3 实际电网仿真计算

本文以YE柔直工程为例进行仿真计算。YE柔直接入电网，其容量为2×2500 MW。在PSD-BPA程序中，建立含YE柔直网架数据，包括潮流数据和稳定数据，系统基准容量取100 MVA，设备参数均取以系统基准容量为参考的标么值。具体电网结构如图14所示。

采用BPA-SCCP短路电流计算程序，基于方案的计算方法，负荷按照100%恒阻抗考虑，考虑柔性直流系统，采用全开机方式进行短路电流计算分析。

YE断面采用柔直连接（如图15所示）。ELQ的三相短路电流值为37.967 kA，其中柔直提供的短路电流是3.578 kA。

SE的三相短路电流值为18.6 kA，其中柔直提供的短路电流是3.642 kA。

表 3 YE柔直连接方式下ELQ站短路电流水平
Table 3 Short-circuit current level of ELQ station under the VSC-HVDC connection mode between Y and E

线路名称	短路电流/kA
ELQ-北TE I回	1.789
ELQ-北TE II回	1.789
ELQ-EDL I回	6.875
ELQ-EDL II回	6.748
ELQ-EDL III回	6.771
ELQ-EX I回	4.142
ELQ-EX II回	4.142
ELQ-EX III回	4.250
ELQ-HZP	0.561
ELQ I号主变	0.456
ELQ II号主变	0.444
总计	37.967

表 4 YE柔直连接方式下SE站短路电流水平
Table 4 Short-circuit current level of SE station under the VSC-HVDC connection mode between Y and E

线路名称	短路电流/kA
SE-南EB I回	1.821
SE-南EB II回	1.821
SE-EYX I回	3.712
SE-EYX II回	3.724

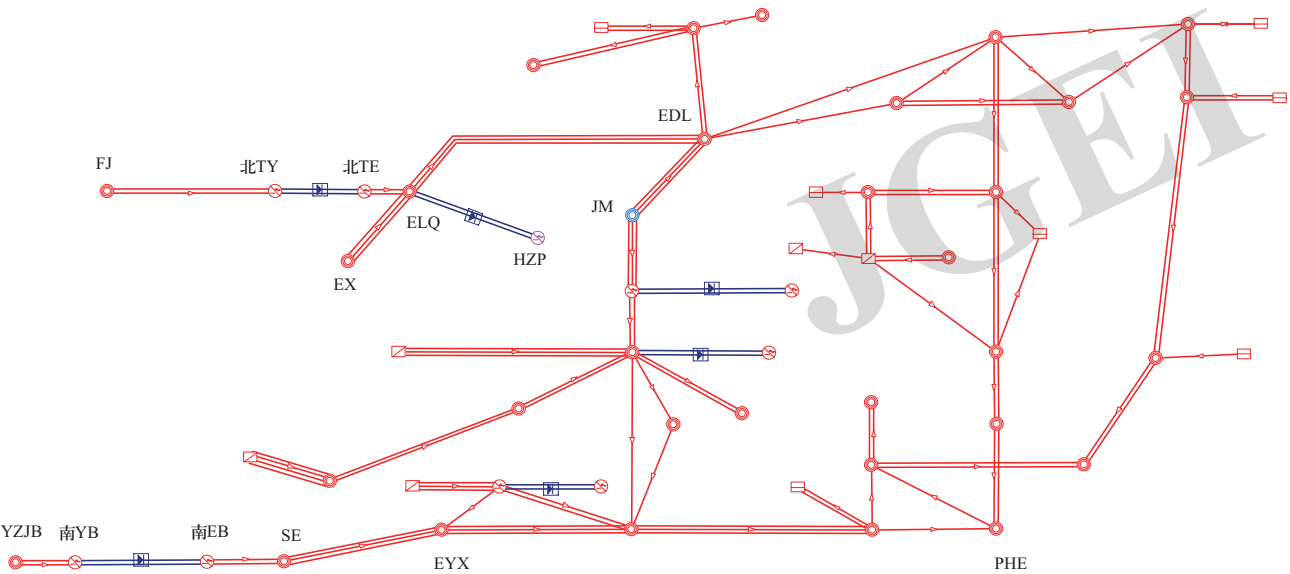


图 14 含YE柔直网架的电网结构图
Fig. 14 Grid structure diagram of grid with Y and E VSC-HVDC

续表

线路名称	短路电流/kA
SE-EYX III回	3.714
SE I号主变	1.898
SE II号主变	1.913
总计	18.603

将柔性直流连接方式改为交流线路连接方式（如图16所示），计算同一位置发生短路故障时交流线路注入短路点的短路电流。

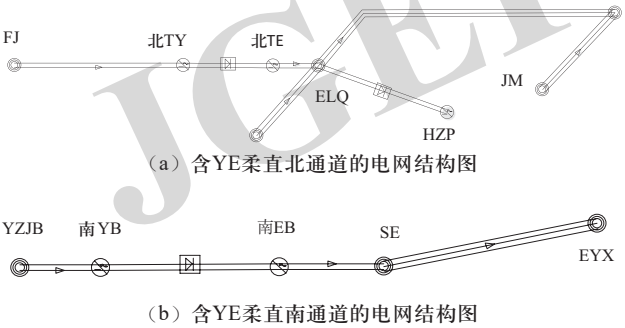


图 15 含YE柔直南北通道网架的电网结构图
Fig. 15 Grid structure diagram of the north and south passages of VSC-HVDC

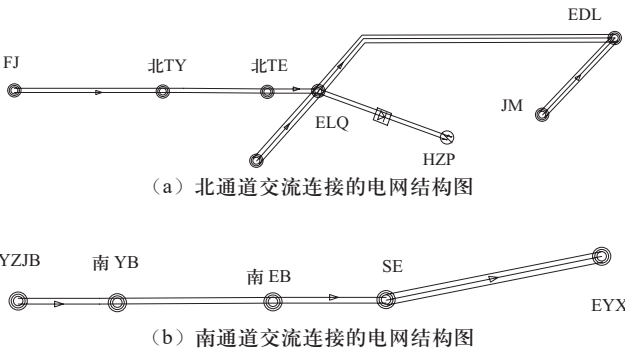


图 16 南北通道交流连接的电网结构图
Fig. 16 Grid structure diagram of the north-south channel AC connection

YE断面采用交流线路连接，ELQ的三相短路电流值为40.107 kA，其中ELQ-FJ双回线路提供的短路电流是5.721 kA。

表 5 YE交流连接方式下ELQ站短路电流水平
Table 5 Short-circuit current level of ELQ station under the AC connection mode

线路名称	短路电流/kA
ELQ-FJ I回	2.754
ELQ-FJ II回	2.967

续表

线路名称	短路电流/kA
ELQ-EDL I回	6.841
ELQ-EDL II回	6.714
ELQ-EDL III回	6.737
ELQ-EX I回	4.142
ELQ-EX II回	4.142
ELQ-EX III回	4.250
HZP	0.660
ELQ I号主变	0.456
ELQ II号主变	0.444
总计	40.107

SE的三相短路电流值为24.570 kA，其中SE-YZJB双回线路提供的短路电流是9.674 kA。

表 6 YE交流连接方式下SE站短路电流水平
Table 6 Short-circuit current level of SE station under the AC connection mode

线路名称	短路电流/kA
SE-YZJB I回	4.838
SE-YZJB II回	4.836
SE-EYX I回	3.692
SE-EYX II回	3.705
SE-EYX III回	3.696
SE I号主变	1.895
SE II号主变	1.910
总计	24.570

计算采用柔直连接和交流线路连接两种方式下注入短路点短路电流的比值 k 。

$$k_{\text{north}} = \frac{I_{\text{VSC},f,\text{north}}}{I_{f,\text{north}}} = \frac{3.578}{5.721} = 0.625$$
$$k_{\text{south}} = \frac{I_{\text{VSC},f,\text{south}}}{I_{f,\text{south}}} = \frac{3.642}{9.674} = 0.376$$

交流线路连接方式下，采用短路电流计算程序BPA-SCCP，计算接入点远区发生短路故障时的短路电流 $I'_{f,\text{far}}$ ，以及该交流线路中提供的短路电流 I'_f 。

选取距离ELQ较远的PHE节点作为研究节点。计算结果为YE断面采用交流线路连接，PHE的三相短路电流值 $I_{f,\text{far}} = 51.405$ kA，其中ELQ-FJ双回线路提供的

短路电流是 $I'_{f,north}=0.252$ kA, 其中SE-YZJB双回线路提供的短路电流是 $I'_{f,south}=0.597$ kA。

表 7 交流连接方式下以PHE为节点, ELQ和SE站提供短路电流水平

Table 7 ELQ and SE station provide short-circuit current values in the case of AC connection with PHE as the node

线路名称	短路电流/kA
ELQ-FJ I回	0.121 3
ELQ-FJ II回	0.130 7
SE-YZJB I回	0.298 7
SE-YZJB II回	0.298 6

根据计算得到两种连接方式下接入点发生短路故障时短路电流的注入比, 从而计算接入点远区发生故障时柔性直流提供的短路电流 $I'_{VSC,f}$ 。

$$\begin{cases} I'_{VSC,f,north} = k \times I'_{f,north} = \frac{I_{VSC,f}}{I_f} \times I'_{f,north} = 0.625 \times 0.252 = 0.157 \\ I'_{VSC,f,south} = k \times I'_{VSC,south} = \frac{I_{VSC,f}}{I_f} \times I'_{f,south} = 0.625 \times 0.597 = 0.373 \end{cases}$$

计算柔性直流连接方式下接入点远区短路故障时的短路电流 $I'_{f, far}$ 。

$$\begin{aligned} I'_{f, far} &= (I'_{f, far} - I'_{f,north} - I'_{f,south}) + I'_{VSC,f,north} + I'_{VSC,f,south} \\ &= (51.405 - 0.252 - 0.597) + 0.157 + 0.373 = 51.086 \end{aligned}$$

4 结论

多源无功调节策略优化了以往发电机、调相机等设备无功出力控制缺乏协调配合的情况, 并将柔性直流纳入无功支撑控制体系, 将原有控制模式下无法充分发挥的动态无功支撑能力通过控制系统指令充分挖掘, 提高了调相机、发电机和柔性直流的电压无功调节能力利用效率, 充分发挥柔直暂态电压调节迅速, 调相机、并联电容等传统无功源稳态电压控制低成本的优势, 能够显著改善城市电网分区电压无功紧急控制能力。

计及柔性直流的城市电网远端故障后短路电流的计算方法可针对城市电网, 考虑柔直对城网各站点的短路电流的影响, 得到更符合实际的短路电流结果。为研究城市电网柔直接入后的短路电流水平, 指导城市电网开关设备选型及未来规划运行工作提供了参考。

参考文献

- [1] 张东辉, 冯晓东, 孙景强, 等. 柔性直流输电应用于南方电网的研究[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 1-6.
ZHANG Donghui, FENG Xiaodong, SUN Jingqiang, et al. Research of VSC HVDC application to China southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(2): 1-6(in Chinese).
- [2] 张坤, 常忠廷, 才利存, 等. 全桥柔性直流换流阀短路电流试验方法[J]. 电力电子技术, 2019, 53(2): 1-4.
ZHANG Kun, CHANG Zhongting, CAI Licun, et al. Short circuit current test method for full-bridge flexible director current converter valve[J]. Power Electronics, 2019, 53(2): 1-4(in Chinese).
- [3] 马为民, 吴方劫, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439(in Chinese).
- [4] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14(in Chinese).
- [5] THALLAM R S. Review of the design and performance features of HVDC systems connected to low short circuit ratio AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(4): 2065-2073.
- [6] 刘嘉超, 袁志昌, 李岩, 等. 柔性直流技术在负荷中心分网运行的应用[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 683-688.
LIU Jiachao, YUAN Zhichang, LI Yan, et al. Application of VSC-HVDC technology in synchronous system segmentation of load center[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 683-688(in Chinese).
- [7] 郭小江, 汤涌, 郭强, 等. CIGRE多馈入直流短路比指标影响因素及机理[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 69-74.
GUO Xiaojia, TANG Yong, GUO Qiang, et al. Influence factors and theory for CIGRE MISCR index[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 69-74(in Chinese).
- [8] 阎发友, 马巍巍, 朱琳, 等. 多端柔性直流输电系统新型直流电压控制策略[J]. 智能电网, 2013, 1(2): 17-21.
YAN Fayou, MA Weiwei, ZHU Lin, et al. A novel DC voltage control strategy for multi-terminal VSC-HVDC system[J]. Smart Grid, 2013, 1(2): 17-21(in Chinese).
- [9] 王铁柱, 万磊, 张彦涛, 等. 交流侧单相短路时直流系统提供短路电流的特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1970-1977.
WANG Tiezhu, WAN Lei, ZHANG Yantao, et al. A study of characteristic of short-circuit current contributed by DC

systems with single-phase short-circuit fault on AC side[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1970-1977(in Chinese).

- [10] 易杨, 沈豫, 林章岁. 柔性直流输电系统贡献交流短路电流的特性分析及计算方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2150-2158.

YI Yang, SHEN Yu, LIN Zhangsui. Characteristics and analysis methods of AC short-circuit current contributed by VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2150-2158(in Chinese).

收稿日期: 2021-03-30; 修回日期: 2021-06-02。



唐晓骏

作者简介:

唐晓骏(1979), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等。通信作者, E-mail: tangxj@epri.sgcc.com.cn。

罗红梅(1977), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等, E-mail: luohm@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 张鹏)