

10 GW 级特高压直流接入点的选择 对重庆电网受端系统稳定性的影响

彭卉¹, 张鑫², 李亚军¹, 陶凛¹

(1. 重庆市电力公司, 重庆市 渝中区 400014; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Influence of Selection of Connecting Position for UHVDC Transmission Line With Transmission Capacity of 10 GW on the Stability of Receiving-End System in Chongqing Power Grid

PENG Hui¹, ZHANG Xin², LI Yajun¹, TAO Lin¹

(1. Chongqing Electric Power Corp., Yuzhong District, Chongqing 400014, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Based on the summer peak load operation mode of Chongqing power grid in 2015 and in allusion to the features of high power riding-through Chongqing power grid, possible influences of connecting $\pm 1\ 000$ kV DC transmission line from Zhundong to Chongqing into Chongqing power grid on the stability of receiving-end system in Chongqing power grid are researched in various aspects. The influences of AC transmission line faults occurred in Chongqing power grid on the stability of $\pm 1\ 000$ kV DC transmission system under different connecting position for UHVDC transmission line and the influence of faults occurred in UHVDC system on outward transmission of electric power generated by hydropower stations in Sichuan province as well as the adaptability of connecting-in UHVDC transmission lines under various load modes are analyzed. Based on the analysis, the suggestion that the construction of UHV network should be speeded up is put forward.

KEY WORDS: $\pm 1\ 000$ kV DC power transmission; maximum transmission capability; power system security and stability

摘要: 以重庆电网 2015 年丰大方式数据为基础, 针对大功率穿越重庆电网的特点, 从多个角度研究准东—重庆 $\pm 1\ 000$ kV 特高压直流接入对重庆电网受端系统稳定性可能产生的各种影响。分析直流不同接入点情况下重庆电网交流故障对直流系统稳定性的影响、特高压直流故障对四川水电外送的影响及不同负荷方式下直流接入的适应性, 并根据结果提出应加快特高压网架建设的建议。

关键词: $\pm 1\ 000$ kV 特高压直流输电; 最大传输功率; 系统安全稳定

0 引言

重庆电网从地理位置上位于四川电网与华中

(湖北)电网之间, 除满足当地负荷的需求以外, 也兼具为川电外送通道提供电压支撑的功能, 即大功率穿越重庆电网, 这是重庆电网区别于其他大型城市受端电网的特殊性所在。

另一方面, 随着重庆经济的发展, 负荷水平逐年提高, 而重庆规划的水电电源有限, 且条件较明确的火电电源容量较少, 电网自“十一五”后期出现较大的电力缺额空间, 因此需要加紧本地电源建设和受入外区电力。直流输电作为成熟、可靠的大容量、远距离输电技术, 在我国跨省、区联网工程中发挥了重要作用; “十二五”期间, 为解决重庆电力缺额问题, 将建成准东—重庆 $1\ 100$ kV 直流输电系统, 输电容量为 10 GW。10 GW 直流的投运, 必然对送、受端系统的安全稳定性产生较大影响, 直流系统故障会引起功率转移加大, 受端系统的功率缺额是否能够承受; 换流站附近交流系统故障是否会引发直流系统功率降低, 故障后交直流系统相互作用会产生哪些问题等, 如何选择合适的接入点使得上述问题造成的影响最小, 是 10 GW 级直流输电技术面临的重要课题之一。

本文以 2015 年重庆规划电网为例, 通过仿真从特高压落点选择方案、对输电通道极限影响及负荷的适应性等方面, 全面分析 10 GW 级特高压直流接入对重庆电网稳定性带来的影响, 提出合理的接入方案, 并对如何保证电网安全性提出建议。

1 10 GW 级特高压直流简介

$\pm 1\ 000$ kV 特高压直流输电技术能够实现大范

围内能源优化配置, 适合巨型能源基地实现电力超大容量、超远距离输送, 一般来说, 在单位 kW 设备造价相差不大的情况下, 对于相同输送容量的直流工程, 提高电压比提高电流的综合效果好, 既有利于降低能耗, 又可以避免研制更大通流能力换流阀、缩短换流阀片的研制周期。

直流电压等级提高至 $\pm 1\ 000\text{ kV}$ 后, 输送功率可提高到 10 GW, 是其他直流输送容量的 1.4~3 倍, 可有效缓解输电走廊选择和换流站选址带来的压力, 因此采用 10 GW 级特高压直流输电优势明显^[1-2]。

$\pm 1\ 000\text{ kV}$ 特高压直流换流阀组接线方式与 $\pm 800\text{ kV}$ 直流类似, 由 2 个 500 kV 双 12 脉动换流阀组串联组成, 电气结构如图 1^[3]所示。

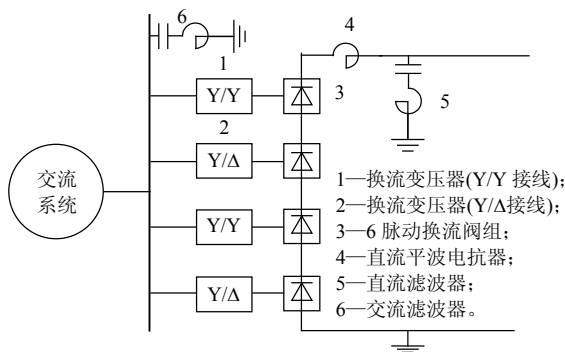


图 1 特高压直流换流站基本接线方式

Fig. 1 Structure of $\pm 1\ 000\text{ kV}$ UHVDC converter station

2 准东—重庆特高压直流接入点选择

2.1 概述

传统的直流接入系统分析往往只关注当前接入直流和所接入受端子系统故障产生的影响^[3-4], 如交流通道能否承担直流故障期间的功率转移, 直流系统在送、受端交流故障切除后能否稳定和可靠运行, 突出表现为接入点附近交流发生故障或直流双极闭锁时, 出现大范围的功率转移可能引起的系统功角失稳; 交流故障切除后, 随着交流系统特别是直流换流母线电压的波动, 直流输送功率也会相应发生波动, 可能产生的交流系统电压、功角的摆动, 系统稳定性的恶化等^[4-6]。

由于重庆所处地理位置的特殊性, 重庆电网具有典型受端电网特征的同时, 又兼有川电外送输电通道的作用, 在准东—重庆直流接入点选择过程中, 需要考虑重庆电网的特点, 在分析重庆本地电网故障和直流故障影响的同时, 还需要考虑由于直流接入引起的电网输电能力变化, 即如何选择合理的接入点, 使得川电外送能力最大化^[7-8]。

2.2 重庆电网计算用系统概况与接入点选择

计算中采用 2015 年重庆电网丰大和枯大方式数据, 其中节点数为 600 个, 发电机数 44 台, 负荷节点 94 个, 支路数 1 934 条, 计算工具采用 PSD-BPA 潮流和暂态稳定计算程序, 计算中负荷模型采用华中电网统一模型, 即 40% 马达+60% 恒阻抗, 发电机采用 III 型异步电动机模型。

丰大基础数据中, 准东—重庆特高压直流额定电压 1 100 kV, 额定直流电流 4 750 A, 输送功率 10 GW, 四川水电送重庆 11 GW, 重庆高负荷和正常负荷水平分别为 21 和 18 GW, 具体接线见图 2。

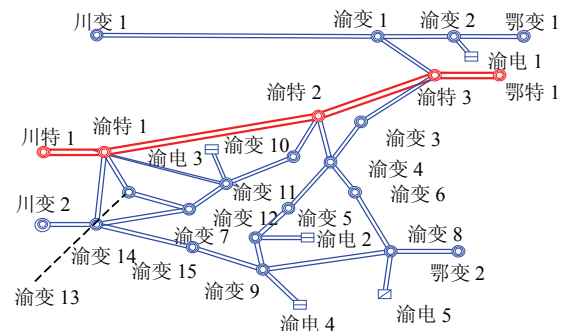


图 2 2015 年重庆电网结构

Fig. 2 Power grid diagram of Chongqing in 2015

由于准东—重庆特高压直流重庆侧换流站位置并未完全确定, 而接入点的选择对重庆 500 kV 主网架有着重大影响, 因此拟定如下 6 种方案进行对比分析: 方案 1, 接入渝特高压 1 站 1 000 kV 侧; 方案 2, 接入渝特高压 1 站 500 kV 侧; 方案 3, 接入渝特高压 2 站 1 000 kV 侧; 方案 4, 接入渝特高压 2 站 500 kV 侧; 方案 5, 接入渝变电站 4; 方案 6, 接入渝变电站 5。

由图 2 可以看出, 川渝通道主要由川特高压 1—渝特高压 1 双回线和川变电站 1—渝变电站 1、川变电站 2—渝变电站 14 共计 4 回 500 kV 线路构成; 渝鄂通道主要由渝特高压 3—鄂特高压 1 双回线和渝变电站 2—鄂变电站 1、渝变电站 8—鄂变电站 2 共计 4 回 500 kV 线路构成, 超过 55% 的断面潮流经特高压线路穿过重庆电网由四川送至湖北, 在计算分析中, 重点考虑以上 2 个断面。

2.3 特高压直流接入点选择对重庆本地电网的影响分析

换流站处的短路容量或等值阻抗是衡量直流接入后系统强弱的有效指标, 通常利用指标“短路比”来衡量换流站母线的特性。

$$S_{CR} = S_{SC} / P_{dN} \quad (1)$$

式中: S_{SC} 为换流母线处的短路容量; P_{dN} 为换流站

的额定直流功率。以 HVDC 换流站的额定直流功率和换流母线的交流电压为基准时，式(1)可表示为

$$S_{CR} = 1/Z_L \quad (2)$$

式中 Z_L 为交流系统阻抗的标么值。短路比越小系统越弱，反之越强。系统的强弱与稳定性直接相关，系统越强则越稳定，反之不稳定。

根据式(1)计算不同接入方案短路比如表 1 所示，由表 1 可以看出，所有方案短路比都大于 3，属于坚强受端系统。扫描不同方案下直流落点附近交流线路故障，包括重庆电网 1 000 kV 线路 N-1 故障、500 kV 线路 N-1 故障。故障扫描结果显示，重庆本地电网发生上述故障不会引起直流闭锁，故障后直流系统能够恢复正常运行，不会引起交流系统功角或电压失稳现象。

表 1 不同接入方案下短路比

Tab. 1 Short-circuit ratio under different connection

| 方案序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 短路比 | 4.77 | 3.40 | 4.82 | 3.34 | 3.59 | 3.06 |

2.4 特高压直流接入点选择对渝鄂通道输电能力影响分析

重庆电网处于四川和湖北之间，是四川水电外送的唯一交流输电通道，当四川外送直流线路发生故障时，又是重要的潮流转送通道，在分析准东—重庆特高压直流的接入影响不能仅局限于重庆电网本身，必须分析对川电外送的影响，考虑到四川电力外送量为确定值，因此着重分析不同接入方案下渝鄂通道所能承受的潮流极限。

四川电网在 2015 年丰大方式下通过溪洛渡—浙西、锦屏、向家坝—上海 3 条直流向华东分别输送 7.5、6.0、4.8 GW 电力，当上述直流发生闭锁故障时，将有大量潮流穿过重庆电网涌入渝鄂通道，计算分析表明，上述 3 条直流闭锁故障是引起系统失稳的主要故障，其中溪洛渡—浙江直流单极闭锁故障时，需要由交流通道转送的潮流最大，因此以溪洛渡—浙西单极闭锁故障作为潮流计算的限制故障，针对 2.1 节中 6 种接入方案仿真计算，正常负荷水平下渝鄂通道潮流极限如表 2 所示。其中方案 3 渝鄂通道极限条件下，重庆、四川、湖北部分机组功角曲线如图 3 所示。

表 2 不同方案下渝鄂通道极限(正常负荷水平)

Tab. 2 Maximum Yu-E transmission capability under different connection at normal load level

| 方案序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 潮流极限/MW | 6 567 | 6 763 | 7 960 | 7 659 | 7 868 | 7 666 |

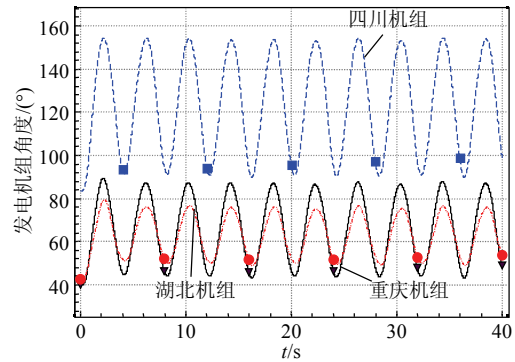


图 3 溪洛渡单极闭锁故障重庆、四川、湖北机组功角曲线(方案 3)

Fig. 3 Curve of power-angle unit in Chongqing, Sichuan, Hubei power grid after Xiluodu unipolar block(scheme 3)

从上述计算结果可以看出，不同的直流接入方案对渝鄂通道潮流极限影响具有较大的差别，其中接入方案 3 最高，接入方案 1 最低。造成上述现象的主要原因是重庆电网主要负荷集中在 1 小时经济圈，当直流接入点在重庆特高压 1 站时，需要由 1 000 kV 线路及重庆本地 500 kV 线路转送，加重了特高压线路的负担，降低了抵御大规模潮流冲击的能力；而接入点在渝特高压变电站 2 时，更有利于电力的就地消纳，使潮流分布更加合理，提高了系统的安全性^[8-10]。

3 准东—重庆特高压直流适应性分析

3.1 重庆不同用电负荷情况下特高压直流适应性

重庆市经济处于快速增长阶段，特别是由于重庆地区气候炎热，因此 7、8 月份负荷水平较高，因此需要在特高压接入影响分析中应针对高负荷水平做进一步分析，采用 2.4 节中分析方法，计算高负荷水平下渝鄂通道潮流极限如表 3 所示。

表 3 不同方案下渝鄂通道极限(高负荷水平)

Tab. 3 Maximum Yu-E transmission capability under different connection at high load level

| 方案序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 潮流极限/MW | 7 015 | 7 063 | 7 960 | 7 721 | 8 108 | 7 960 |

对比正常负荷水平下渝鄂通道潮流极限可以发现，在高负荷水平下，渝鄂通道极限相比正常水平有所提高，这主要是由于负荷水平提高，重庆电网机组开启数量增加有关。

重庆电网多数主力机组都配置了电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)，有效提高了电力系统对机电振荡模式的阻尼，能够抑制自发低频振荡的发生，减小系统中由系统波动引起的联络线功率波动，加速功率振荡的衰减，可以有效提高电力系统稳定性，因而提高了渝鄂通道的潮流极限。

在高负荷方式下, 方案 5 渝鄂通道潮流极限最高, 方案 1 最低, 与正常负荷方式下类似, 从而验证了 2.4 节中的结论合理性。方案 5 高于方案 3 主要原因在于, 提高重庆负荷水平后, 落点为负荷中心的方案 5 更有利于电力消纳, 使渝鄂通道潮流分布更加合理。其中方案 5 渝鄂通道极限条件下, 重庆、四川、湖北部分机组功角曲线如图 4 所示。

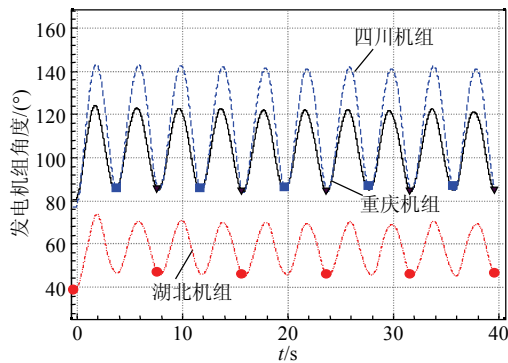


图 4 溪洛渡单极闭锁故障重庆、四川、湖北机组功角曲线(方案 5)

Fig. 4 Curve of power-angle unit in Chongqing, Sichuan, Hubei power grid after Xiluodu unipolar block(scheme 5)

3.2 2015 年枯大方式下特高压直流接入影响分析

上 2 节的分析结果表明, 准东—重庆特高压直流的接入虽然填补了重庆电网的电力缺额, 但也在一定程度加重了重庆电网送出通道的负担, 由于重庆电网在枯水期的电力缺额远高于丰水期, 需要对直流接入引起的安全稳定问题加以重视。

由于枯水期四川电网发电量下降, 需要重庆电网转送的电力大幅下降, 溪洛渡—浙西、锦屏、向家坝—上海 3 条直流输电功率也有所降低, 因此, 准东—重庆特高压直流的接入对川渝电力送出影响远弱于丰大方式。仿真结果表明, 不同方案下, 重庆电网直流落点附近交流线路故障, 包括重庆电网 1 000 kV 线路 N-1 故障、500 kV 线路 N-1 故障、同塔双回 N-2 故障以及溪洛渡—浙西、锦屏、向家坝—上海 3 条直流单极闭锁故障, 不会引起交流系统功角或电压失稳现象。

4 结论和建议

本文通过仿真计算, 研究了准东—重庆 10 GW 级直流接入点选择对重庆电网稳定性及川渝电网外送能力的影响。研究表明, 重庆本地电网具备接入 10 GW 级直流的能力, 直流落点附近交流故障不会引起直流闭锁等问题; 但在丰大方式下, 由于四川水电外送直流功率较大, 当溪洛渡—

浙西、锦屏、向家坝—上海 3 条直流发生闭锁故障时, 会引起渝鄂通道发生动态失稳。

因此, 在 2015 年丰大方式下, 需要根据不同的负荷水平来限制渝鄂通道潮流送出量, 避免因直流闭锁而引发的全网动态失稳; 此外电力系统稳定器的加入可在一定程度上阻止低频振荡, 提高电力系统的暂态稳定性。当然要从根本上解决动态失稳问题, 需要加快川渝系统电网建设, 增加潮流送出通道, 从而适应四川水电大规模送出的需要。

参考文献

- [1] 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: 4-5.
- [2] 张文亮, 周孝信, 郭剑波, 等. $\pm 1000\text{kV}$ 特高压直流在我国电网应用的可行性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 1-7. Zhang Wenliang, Zhou Xiaoxin, Guo Jianbo, et al. Feasibility of $\pm 1000\text{ kV}$ ultra HVDC in the power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 1-7(in Chinese).
- [3] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 37-40.
- [4] 王梅义. 大电网事故分析与技术应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 4-10.
- [5] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985: 7-10.
- [6] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 2-4.
- [7] 张鑫, 周勤勇. 大功率穿越条件下重庆电网协调发展关键技术研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [8] 齐旭, 曾德文, 史大军, 等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 1-6. Qi Xu, Zeng Dewen, Shi Dajun, et al. Study on impacts of UHVDC transmission on power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 1-6(in Chinese).
- [9] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1-4. Wu Jingru, Xu Yongxi. Development prospect of UHV AC power transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 1-4(in Chinese).
- [10] 毛晓明, 吴小辰. 南方交直流并联电网运行问题分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 6-13. Mao Xiaoming, Wu Xiaochen. Analysis on operational problems in South China AC-DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 6-13(in Chinese).



彭卉

收稿日期: 2011-04-20.

作者简介:

彭卉(1979), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统规划工作, E-mail: phspeedcn@sina.com;

张鑫(1981), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统分析、电压稳定研究工作, E-mail: zxin@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑 马晓华)