

江苏特高压交直流输电交互影响研究

朱鑫要¹, 汪惟源², 汪成根¹

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024)

摘要:江苏电网特高压交直流发展迅速, 未来将通过特高压受入大量电力; 同时由于特高压交直流落点之间电气距离较近, 特高压交直流电网之间的交互影响可能会对江苏电网的安全稳定运行带来重要影响。为了研究特高压交直流输电工程的建设对江苏电网安全稳定性的影响, 文中基于规划电网, 采用电力系统仿真软件 BPA 对特高压交直流电网故障情况下的交互影响进行了计算分析, 并根据计算结果给出了提高电网安全稳定水平的建议措施。

关键词:特高压交流; 特高压直流; 规划电网; 交互影响

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)02-0039-04

近年来江苏电网特高压发展迅速, 淮沪特高压北环工程、±800 kV 晋北—南京特高压直流工程进入全面建设阶段, ±800 kV 锡盟—泰州也将开工建设。特高压交直流送电江苏, 将在一定程度上缓解电力紧缺问题。但特高压交流、直流输电系统近距离落点同一电网给电网的安全稳定运行带来新的挑战, 特别是对于这种远距离、大容量、交直流输电同时馈入的电网, 其运行特性更加复杂^[1,2]。为发现江苏电网未来可能存在的薄弱环节, 保障电网稳定运行, 根据江苏规划电网, 基于 BPA 软件, 研究了特高压直流与特高压交流相互影响, 并针对可能出现的问题给出了相应建议措施。

1 计算电网简介

未来江苏电网将拥有锦苏、锡盟—泰州、晋北—南京 3 回特高压直流、龙政超高压直流和淮沪北半环特高压交流, 成为典型的特高压交直流混联受端电网。未来江苏电网特高压交直流落点分布如图 1 所示。

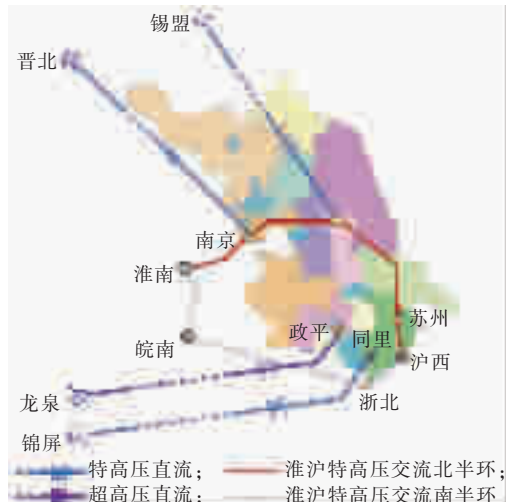


图 1 江苏电网交直流混联示意图

在交流特高压方面, 目前淮沪特高压交流南半环(1000 kV 淮南—皖南—浙北—沪西) 已建成投入运

行; 淮沪特高压交流北半环(1000 kV 淮南—南京—泰州—苏州—沪西) 也已开工建设, 将于近期建成投运。

在直流输电方面, 锦苏特高压直流和龙政超高压直流均已建成投运。根据规划, 晋北—南京特高压直流、锡盟—泰州特高压直流也将于近年建成投运; 其中, 锡盟—泰州特高压直流将创新性地采用特高压直流分层接入方式。锡盟—泰州特高压直流近 10 000 MW 落地功率的各 50% 电力将分别接入 1000 kV 和 500 kV 交流电网。锡盟—泰州特高压直流工程分层接入交流系统示意图如图 2 所示。

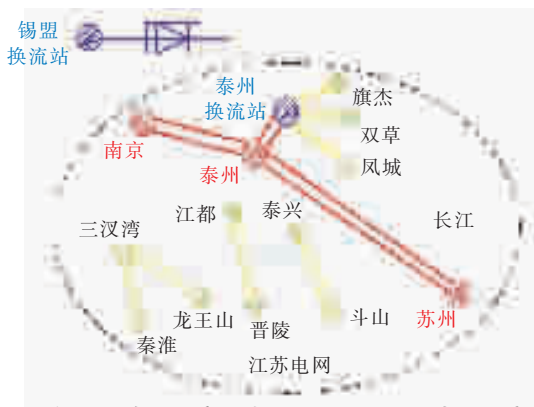


图 2 锡盟—泰州特高压直流工程分层接入电网示意图

晋北—南京特高压直流、锡盟—泰州特高压直流投运后, 江苏电网将通过 3 回特高压直流受入超过 23 000 MW 的电力。同时由图 1 可知, 江苏电网特高压交直流落点之间的电气距离较近、且受电容量大, 特高压交直流输电之间的交互影响可能会对江苏电网的运行带来重大影响。本文研究基于规划电网数据进行, 江苏境内的交直流特高压电网结构如图 1 所示, 其中 1000 kV 南京站主变 1 台、泰州站和苏州站主变均为 2 台, 各特高压主变容量均为 3000 MV·A。江苏 4 回 500 kV 过江通道如图 2 所示。

2 江苏特高压交直流混联电网潮流分析

根据规划数据, 接入江苏的 4 回直流落地功率分

别为：晋北—南京特高压直流落地电力约 7450 MW、锡盟—泰州特高压直流落地电力约 9600 MW(其中约 4800 MW 接入 1000 kV 电网)，锦苏特高压直流落地电力约 6750 MW、龙政超高压直流落地电力约 2850 MW,具体如图 3 所示。

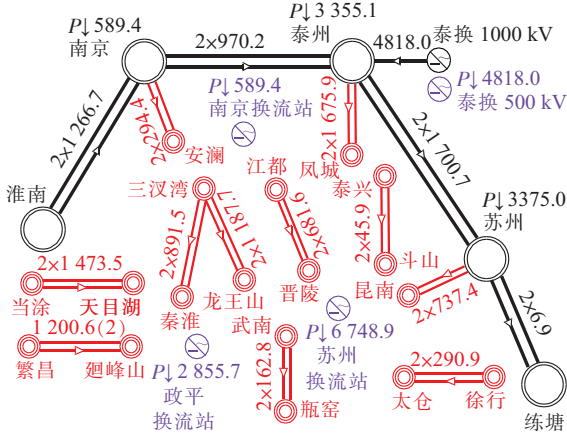


图 3 江苏电网关键断面潮流图(单位 MW)

由图 3 可知,“皖电东送”1000/500 kV 断面(1000 kV 淮南—南京双线,500 kV 当涂—天目湖双线、繁昌—廻峰山双线)共向江苏电网馈入电力约 6600 MW,对缓解江苏电力紧缺问题起到了重要作用,其中 500 kV 当涂—天目湖双线潮流约 2950 MW、接近其 3000 MW 的稳定限额。此外,晋北—南京特高压直流和锡盟—泰州特高压直流接入江苏电网后,江苏江北电网电力富裕,1000 kV 过江通道泰州—苏州双线南送潮流约 3400 MW,淮沪特高压交流“北半环”有效缓解了江苏电网 500 kV 过江断面的潮流南送压力。

3 江苏特高压交直流交互影响分析

3.1 特高压交流故障对特高压直流的影响

交流系统故障对直流输电运行的影响主要为:交流系统故障导致换流站交流母线电压降低或线电压过零点偏移,进而导致直流换相失败;随后,若交流系统故障及时切除,待交流系统电压恢复后直流输电可恢复正常运行;若故障未能及时切除或故障切除后系统电压未能及时恢复,则会导致直流输电发生持续的换相失败,进而导致直流闭锁^[3]。

直流输电系统逆变侧接线及电压波形示意如图 4 所示。在换相结束后晶闸管还需承受一定时间(熄弧角)的反向电压以恢复关断能力,若熄弧角过小,则会导致晶闸管在还未完全恢复关断能力时便又承受正向电压而恢复导通,进而造成换相失败^[3]。

以阀 V₅ 向 V₁ 换相时为例,简要说明换相失败的基本机理。

阀 V₅ 向 V₁ 换相期间(α 至 α+μ),交流系统 a 相和 c 相之间满足:

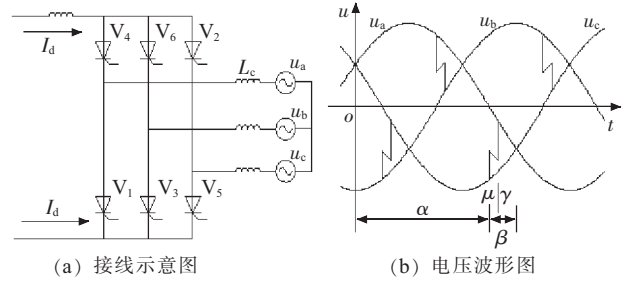


图 4 逆变侧接线及电压波形示意图

$$L_c \frac{di_1}{dt} - L_c \frac{di_5}{dt} = \sqrt{2} U_L \sin \omega t \quad (1)$$

式(1)中:U_L为交流系统线电压;i₁和 i₅分别为流过阀 V₁和 V₅的电流。

在换相起止时刻,i₁值分别为 0 和 i_d,而 i₅值分别为 i_d和 0。对式(1)在换相起止时刻之间(α 至 α+μ)进行积分,可得直流电流的表达式:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} U_L}{2\omega L_c} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (2)$$

进而可求解得到换相角 μ 的表达式:

$$\mu = -\alpha + \arccos(\cos \alpha - \frac{2\omega L_c I_d}{\sqrt{2} U_L}) \quad (3)$$

可见,交流系统发生故障导致交流系统线电压降低,会导致换相角增大,进而造成熄弧角减小。当熄弧角减小至小于晶闸管恢复关断能力所需的最小值时,便会引起换相失败。

根据仿真计算,1000 kV 淮南—南京—泰州—苏州—练塘双线发生三永 N-2 故障,或 1000 kV 南京、泰州、苏州主变发生三永 N-1 故障后,江苏境内晋北—南京特高压直流、锡盟—泰州特高压直流、锦苏特高压直流发生换相失败,闭锁情况如表 1 所示。

表 1 江苏境内交流特高压故障导致特高压直流换相失败和闭锁情况

| 故障设备 | 锡盟—泰州 | | | | | | | |
|---------|-------|------|-------------|------|------|------|------|------|
| | 晋北—南京 | | 1000 kV 并网极 | | | | 锦苏直流 | |
| | 换相失败 | 闭锁情况 | 换相失败 | 闭锁情况 | 换相失败 | 闭锁情况 | 换相失败 | 闭锁情况 |
| 淮南—南京双线 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 |
| 南京—泰州双线 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 |
| 泰州—苏州双线 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 |
| 练塘—苏州双线 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 | 否 | 否 |
| 南京主变 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 | 否 | 否 |
| 泰州主变 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 | 否 | 否 |
| 苏州主变 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 | 否 | 否 |

由表 1 可知,在规划电网中,1000 kV 淮南—南京—泰州—苏州—练塘双线发生三永 $N-2$ 故障,或 1000 kV 南京、泰州、苏州主变发生三永 $N-1$ 故障后,江苏境内晋北—南京特高压直流、锡盟—泰州特高压直流、锦苏特高压直流会发生换相失败,但在故障切除后上述 3 回特高压直流均可恢复,不会发生直流闭锁。

3.2 特高压直流故障对特高压交流的影响

直流系统发生故障造成直流输电闭锁后,作为受端系统,江苏电网将存在较大的有功缺额、频率下降,若系统保有足够的备用发电容量,则系统频率将最终恢复正常。同时直流闭锁后,受端系统还将存在较大的无功过剩、电压上升,若换流站无功补偿设备及时切除,则系统电压可恢复正常;若换流站无功补偿设备未切除,则系统将运行在较高的电压水平。直流系统发生故障闭锁后,直流故障对交流系统的影响机理如图 5 所示。

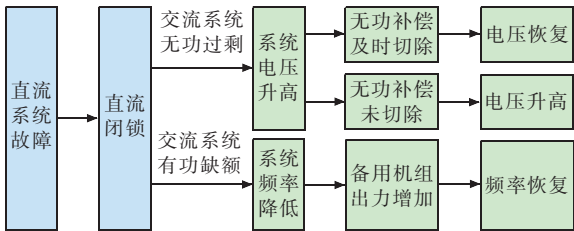
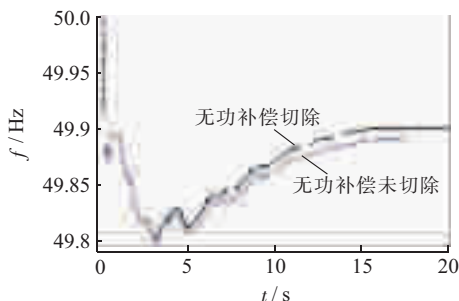


图 5 直流故障对交流系统的影响机理

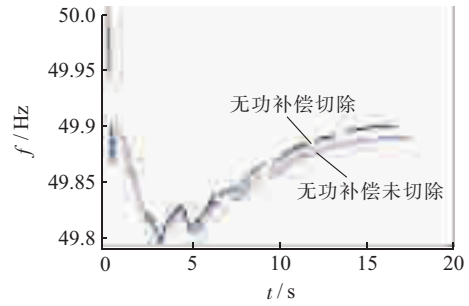
根据仿真计算,晋北—南京、锡盟—泰州和锦苏 3 回特高压直流某回发生双极闭锁后,若无功补偿设备均正常退出,系统频率和电压均可保持稳定。

以晋北—南京特高压直流双极闭锁为例,分析特高压直流闭锁对特高压交流的影响。晋北—南京特高压直流双极闭锁后,近区 500 kV 母线频率和电压波形分别如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知,晋北—南京特高压直流双极闭锁后,安澜变和三汉湾变 500 kV 母线频率快速下降,降幅最大约 0.19 Hz,随后频率逐渐回升,并稳定在 49.91 Hz 左右,系统频率稳定。由图 7 可知,晋北—南京特高压直流双极闭锁后,安澜变和三汉湾变 500 kV 母线电压迅速上升,峰值分别达到约 580 kV 和 560 kV,若南京站无功补偿未切除,则安澜变和三汉湾变 500 kV 母线电压将最终稳定在 565 kV 和 550 kV 左右,电压过高;



(a) 安澜变 500 kV 母线



(b) 三汉湾变 500 kV 母线

图 6 晋北—南京直流双极闭锁后近区 500 kV 母线频率

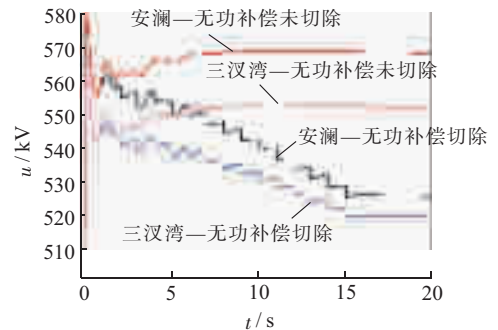


图 7 晋北—南京直流双极闭锁后近区 500 kV 母线电压

若南京站无功补偿逐步退出,则安澜变和三汉湾变 500 kV 母线电压最后分别稳定在 525 kV 和 520 kV 左右,系统电压稳定。

3.3 特高压直流相互影响

未来江苏电网将拥有 3 回特高压直流落点,当某回直流发生故障闭锁后,通过交流系统耦合,其他换流站交流母线电压亦将发生波动,并最终影响其运行。根据仿真计算,晋北—南京、锡盟—泰州和锦苏 3 回特高压直流某回发生双极闭锁后,其他 2 回均不会发生换相失败。仍以晋北—南京特高压直流双极闭锁为例,分析江苏电网落点的特高压直流之间的交互影响。晋北—南京特高压直流双极闭锁后,泰州换流站和苏州换流站交流母线电压和直流功率波形分别如图 8 和图 9 所示。

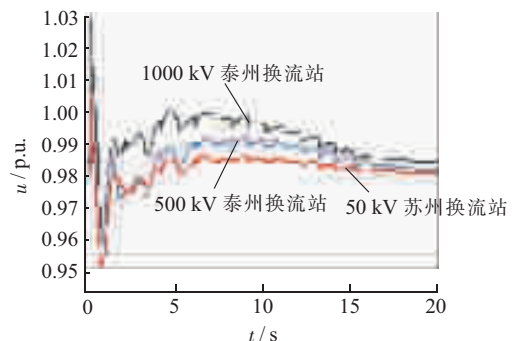


图 8 晋北—南京直流双极闭锁后泰州和苏州换流站母线电压

由图 8 和图 9 可知,晋北—南京特高压直流双极闭锁后,泰州和苏州换流站交流母线电压波动均未低

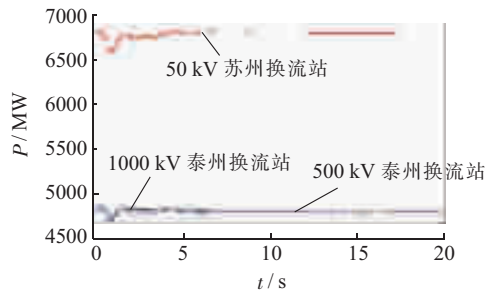


图9 晋北—南京直流双极闭锁后泰州和苏州换流站落地功率

于 0.95 p.u., 锡盟—泰州特高压直流和锦苏特高压直流均未发生换相失败, 直流功率经一定时间振荡后恢复稳定。

4 江苏特高压交直流协调控制展望

由上述分析可知, 江苏特高压交直流混联电网基本可满足安全稳定运行的要求。

根据国家电网公司规划, 江苏电网未来将拥有多回特高压直流落点; 在特高压交流方面, 除淮沪特高压交流北半环外, 未来还将通过特高压交流线路与华北和华中电网互联。如图 10 所示。现有研究表明, 通过对直流输电和交流系统的协调控制可有效提高系统运行的稳定性^[4-7]。为进一步提高江苏电网运行的安全性, 下一步可推进特高压交直流协调控制提高系统稳定性的相关研究。

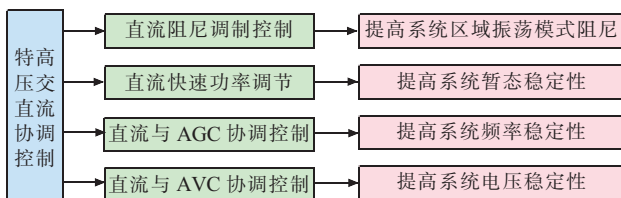


图 10 特高压交直流协调控制提高系统稳定性框图

5 结束语

分析结果表明, 在规划电网和预想故障形式下, 江苏电网境内特高压交流设备故障, 不会造成江苏境内落点的 3 回特高压直流闭锁; 江苏境内落点的 3 回特高压直流某回因自身设备原因发生双极闭锁后, 不会造成电网频率或电压失稳, 也不会引起其他 2 回特高压直流换相失败。特高压交直流系统交互影响机理复杂, 后续将开展特高压交直流协调控制的相关研究, 以进一步提高电网安全稳定运行水平。

参考文献:

- [1] 朱红萍, 罗隆福. 直流调制策略改善交直流混联系统的频率稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 36-43.
- [2] 董宸, 周霞, 李威, 等. 提升特高压电网输电能力的方法[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5): 1-4.
- [3] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利水电出版社, 1990.
- [4] 毛晓明, 张尧, 管霖, 等. 南方交直流混合电网区域振荡的协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 55-59.
- [5] 黄震, 郑超, 庞晓艳, 等. 四川多回± 800 kV 直流外送系统直流有功功率协调控制[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 52-58.
- [6] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 哈郑直流受端华中电网基于响应的交直流协调控制措施[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1773-1778.
- [7] 陈江澜, 张蓓, 兰强, 等. 特高压交直流混合电网协调电压控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 21-27.

作者简介:

朱鑫要(1987), 男, 河南开封人, 工程师, 从事电力系统分析工作;
汪惟源(1975), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 从事电力系统规划与自动控制工作;
汪成根(1981), 男, 安徽安庆人, 工程师, 从事电力系统安全稳定分析工作。

Analysis of Interaction Between UHVAC and UHVDC for Jiangsu Power Grid

ZHU Xinyao¹, WANG Weiyuan², WANG Chenggen¹

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Jiangsu, Nanjing 210024, China)

Abstract: The AC and DC ultra-high voltage grid develops rapidly in Jiangsu. Given that bulk electric power would feed into Jiangsu and the electrical distances between the AC and DC ultra-high voltage stations are very close, the impacts of the AC and DC ultra-high voltage may affect the safety and stability of Jiangsu grid significantly. To investigate the impacts of the ultra-high voltage alternating current (UHVAC) and ultra-high voltage direct current (UHVDC) constructions on the safety and stability of Jiangsu power grid, basing on the planning grid, the interactions under UHVAC and UHVDC faults are studied using BPA software in this paper. Meanwhile, the suggestions to improve the safety and stability of Jiangsu power grid are proposed.

Key words: ultra-high voltage alternating current (UHVAC); ultra-high voltage direct current (UHVDC); planning grid; interaction