

± 800 kV 特高压直流双极闭锁故障对高密度风电地区电压影响分析

常喜强¹ 樊艳芳² 张 锋¹ 王 衡¹ 郑少鹏³ 魏 威⁴ 钟 显²

(1. 国网新疆电力调度控制中心 新疆 乌鲁木齐 830006; 2. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047; 3. 国网新疆电力科学研究院 新疆 乌鲁木齐 830016; 4. 国网新疆乌鲁木齐电力公司 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:近年来,交直流混联系统飞速发展,其规模庞大、结构复杂,导致电网运行的安全性、可靠性更加难以驾驭。伴随着风电、光伏等间歇性能源在直流送端的不断接入,交直流系统的运行特性也愈加复杂,给当前电网带来了一些新问题。其中直流闭锁故障对电压稳定性影响是限制电网电能输送的主要因素,闭锁故障后电网电压问题存在突发性和隐蔽性的特点,难以在事故前期洞察其征兆,无法及时采取有效措施。因此,分析了并网风电场电压波动原理及交直流混联系统的安全运行特点。当特高压直流发生闭锁故障时,通过采取不同的切机控制措施,将引起的交直流混联系统电压的差异,并针对新疆某地区风电场的电压分布特性进行研究分析,提出改善电压稳定能力的措施。通过模拟直流闭锁故障进行分析,对提高交直流混联系统的电压稳定性及减小电压波动对风机脱网影响具有重要的参考价值。

关键词:高密度风电; 特高压直流; 电压影响; 电压稳定; 双极闭锁

Abstract: Recently, the AC-DC hybrid systems develop rapidly with large scale and complex structure, which makes the security and reliability of power grid being more difficult to be controlled. With the wind power, solar energy and other intermittent energy come to the sending end of DC, the operating characteristics of AC-DC systems have become more complicated, and bring other new problems. DC blocking faults which affect the voltage stability is a major factor limiting power transmission, and because of its sudden occurrence and concealment, it is difficult to see through their signs clearly in the earlier stage of an accident and unable to take effective measures in time. Therefore, the principles of voltage fluctuations in the integrated wind farms and the operating characteristics of AC-DC hybrid system are analyzed. When blocking faults occur in UHVDC transmission system, the differences about voltage in AC-DC hybrid system will be analyzed through different control measures according to the voltage distribution characteristics of a wind farm in Xinjiang, and the measures for improving the voltage stability are proposed. Therefore, through simulating DC blocking faults, the analyses provide an important reference to improve the voltage stability of AC-DC hybrid system and reduce the impacts of voltage fluctuations on the off-grid wind turbines.

Key words: high-density wind power; HVDC; voltage influence; voltage stability; bipole tripping

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0005-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.002

0 引言

直流输电系统可远距离、大功率输电。利用直流输电,其不受同步运行稳定性问题的制约,对保证两端交流系统稳定运行性起了很大作用;同时避免交流系统容量过大带来的一系列稳定性问题。由直流功率传输特性可知,直流系统需要消耗大量的无功功率、直流系统故障导致功率大量转移等因素,将

基金项目:国家自然科学基金项目(51467019)

对交流系统产生一定冲击,使得混联电网暂态稳定问题突出,尤其是暂态电压稳定问题^[1-2]。

当前,针对直流系统闭锁故障对交流系统的影响进行了大量的研究分析。文献[3]以±500 kV林枫直流双极闭锁故障为对象,分析了闭锁故障对交流系统潮流及电压的影响,并对交直流运行、直流仿真程序模型提出了改进建议。文献[4]提出了特高压直流送端电网“网源协调”的调压策略,通过优化网内常规能源机组出力,可提升系统暂态下无功支撑能力,有利于扰动下系统电压的稳定。文献[5]

指出提高交直流送端电网的短路电流水平可以减小直流闭锁对电压波动性的影响。文献[6]分析了电网电压的薄弱片区,提出了进行无功潮流优化及建立电压稳定性分析模型的措施,优化电网无功补偿和电网电压调整控制策略。

当前主要是针对直流闭锁故障,提出改善电网电压的控制措施,以及合理配置无功补偿设备与优化稳控策略的研究。而对于直流发生闭锁故障后,电压特性的对比分析研究则相对较少。以新疆天中特高压直流为例,对直流发生双极闭锁仿真分析,得出不同运行工况和稳控策略下电压的分布,并对哈密高密度风电地区电压进行深入分析。对于实际运行的交直流混联系统闭锁故障提高系统电压稳定性和减小风电场电压波动有重要的意义。

1 风电并网电压波动原理分析

风电作为间歇性能源,其出力跟随风速变化。当前大部分风电场主要分布在较为偏远的地区,一般位于网络的尾端。该位置网架结构薄弱,抗扰动性差。风电并网后,风机输有功的同时,还需吸收一定的无功。随接入风机容量的增大,电网电压的影响也更显著,并可导致系统的瓦解^[7-8]。风电并网引起电网电压波动的本质是由于风机出力的波动性导致。风电并网等效网络如图1所示。

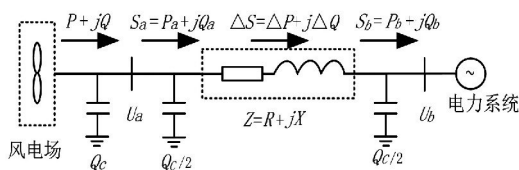


图1 风电并网等效网络

由图1等效网络可知:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_b + \left(\frac{S_b}{\dot{U}_b} \right)^* Z \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= U_b + \frac{P_b - jQ_b}{U_b} (R + jX) \\ &= \left(U_b + \frac{P_b R + Q_b X}{U_b} \right) + j \left(\frac{P_b X - Q_b R}{U_b} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

对于通常情况下,由于

$$U_b + \frac{P_b R + Q_b X}{U_b} \gg \frac{P_b X - Q_b R}{U_b} \quad (3)$$

所以公式(2)化简为

$$U_a \approx U_b + \frac{P_b R + Q_b X}{U_b} \quad (4)$$

由功率的流向可知:

$$P_b = P - \Delta P \quad (5)$$

$$Q_b = Q_c + 2Q_{c/2} - Q_c - \Delta Q \quad (6)$$

由分析可知:当风电场的有功出力增加时,线路无功损耗 ΔQ 也增大;当风电场所吸收的无功 Q_c 与线路无功损耗 ΔQ 之和大于机端并联电容所提供的无功 Q_c 和输电线路的充电功率 $2Q_{c/2}$ 之和时, Q_b 是小于0的。若 $P_b R + Q_b X < 0$, 则有 $U_a < U_b$, 那么,随着风功率的随机波动,同理也 $U_a > U_b$ 情况。通过分析风电场接入电网后对并网点的电压影响,由理论分析知,风电场并网点的电压主要是由:风电场的有功出力波动、风电场自身的功率因数(无功特性)、风功率输送线路参数(阻抗值)及所并网点的电网情况等因素影响。

2 交直流混联系统运行特性分析

2.1 交直流混联系统输电特性

交直流混联系统既可发挥交流联网的优势,又可利用直流输电传输功率可快速调节的特点来改善系统的稳定,有利于综合发挥交流和直流输电的优势。但注意的是交直流系统间输送能力要有一个恰当比例。交流线路故障时,能借助于直流系统的功率调制等快速调节功能,保证系统稳定;直流线路故障时,其甩至与之并联的交流线上的功率应该不超过系统暂态稳定所能承受的程度。可见,采用“强直弱交”的联网运行方式将不利于系统的稳定^[9-10]。

2.2 交直流混联系统安全运行的特点

特高压直流输电对比交流输电,其功率和运行方式有较强的可控性。运行中,直流系统输送有功功率大、吸收的无功多,一旦直流系统发生故障时,导致功率转向交流系统,大量的有功和无功将引起电压和频率的波动^[11]。因此,对于交直流系统不同的故障,可采取的安全措施如下:①直流闭锁故障引起的潮流转移对交流系统形成冲击,系统应保持稳定,对于电源直接送出的直流线路单极闭锁故障,可采取切机措施;②对于电源直接送出的交流线路,发生三永短路故障,可考虑采取切机措施。受端换流站交流侧发生短路故障,虽然可能会出现换相失败,

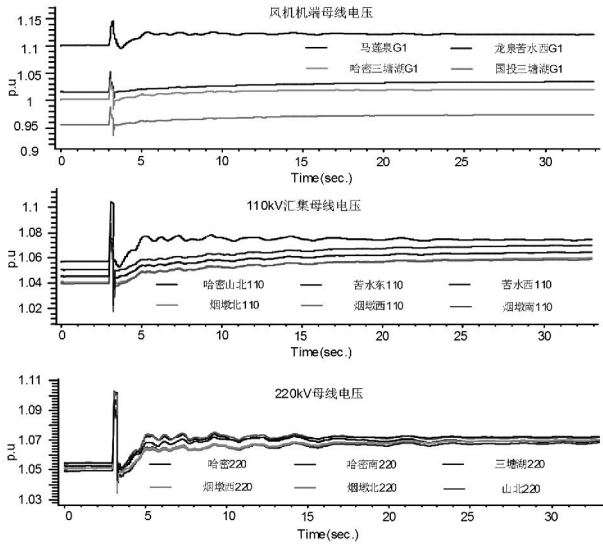


图4 直流故障稳控动作后高密度风电地区电压变化
端电压变化幅度为 0.017 1 ~ 0.017 5 p.u ,110 kV
母线电压变化幅度为 0.017 1 ~ 0.018 3 p.u 220 kV
母线电压变化幅度为 0.016 2 ~ 0.182 p.u。

4.2 天中直流输送 5 000 MW 时电压分析

当天中直流输送功率 5 000 MW 时,根据电力
组织情况其潮流运行如图 5 所示。

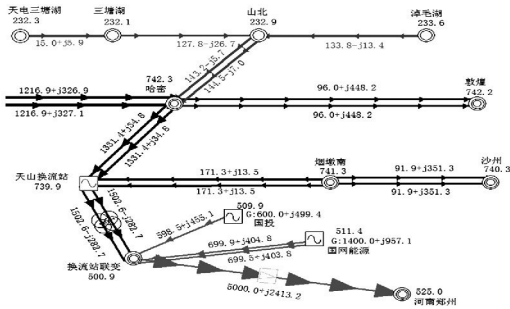


图5 电力组织潮流示意图

当天中直流发生双极闭锁时,据新疆 750 kV
实际交流系统不平衡功率量 1 200 MW 稳控应切除
3 800 MW 网内上网机组。此时考虑电力组织潮流
中直流配套电源不同的保留情况,构成直流配套电
源全切(稳控策略 1)与保留 2 台机组(稳控策略 2)
运行的稳控策略。

1) 稳控策略 1: 配套电源 2 000 MW 机组全切 +
切哈密风电 800 MW + 切疆内火电机组 1 000 MW。
此时高密度风电地区电压波形如图 6 所示。

根据图 6 仿真结果显示,直流闭锁故障前,风
电机端电压维持范围为 0.95 ~ 1.08 p.u ,110 kV 母
线电压维持范围为 1.012 ~ 1.029 p.u 220 kV 母
线电压维持范围为 1.03 ~ 1.038 p.u。当发生直流闭
锁故障后,该地区电压均出现上升趋势,其中风机机
端电压变化幅度为 0.073 ~ 0.106 p.u ,110 kV 母

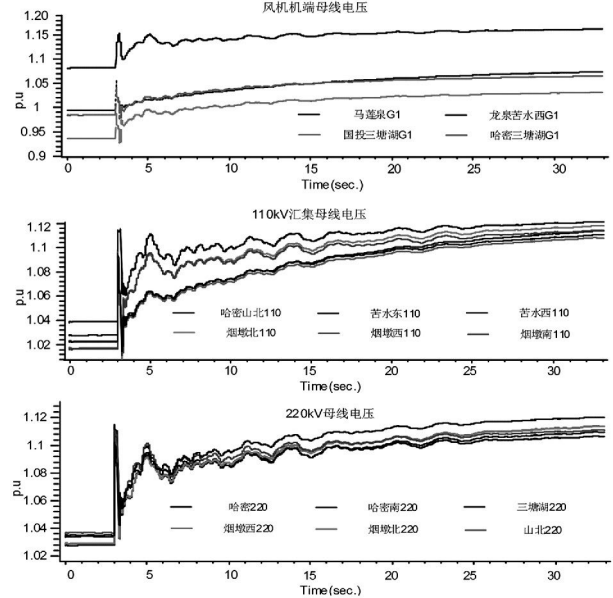


图6 直流故障稳控 1 动作后高密度风电地区电压变化
端电压变化幅度为 0.072 ~ 0.09 p.u ,110 kV 母
线电压变化幅度为 0.073 ~ 0.091 p.u 220 kV 母
线电压变化幅度为 0.068 ~ 0.082 p.u。

2) 稳控策略 2: 切部分配套电源 1 000 MW 机组
+ 切哈密风电 800 MW + 切疆内火电机组 2 000
MW。此时高密度风电地区电压波形如图 7 所示。

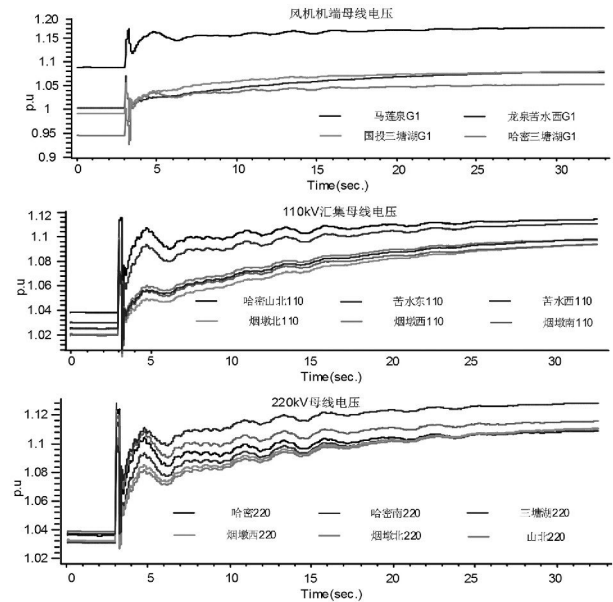


图7 直流故障稳控 2 动作后高密度风电地区电压变化
根据图 7 仿真结果显示,直流闭锁故障前,风
电机端电压维持范围为 0.95 ~ 1.08 p.u ,110 kV 母
线电压维持范围为 1.012 ~ 1.029 p.u 220 kV 母
线电压维持范围为 1.03 ~ 1.038 p.u。当发生直流闭
锁故障后,该地区电压均出现上升趋势,其中风机机
端电压变化幅度为 0.073 ~ 0.106 p.u ,110 kV 母

表2 电压波动幅度对比分析

运行方式	风电场机端母线	110 kV 母线	220 kV 母线	对比说明
直流外送 2 000 MW/p.u	0.017 1 ~ 0.017 5	0.017 1 ~ 0.018 3	0.016 2 ~ 0.182	其中三塘湖风电场压升最大为 0.017 5 ,110 kV 烟墩南母线压升最大为 0.018 3 ,220 kV 烟墩北母线压升最大为 0.182。
直流外送 5 000 MW 稳控策略 1/p.u	0.072 ~ 0.09	0.073 ~ 0.091	0.068 ~ 0.082	其中三塘湖风电场压升最大为 0.09 ,110 kV 烟墩北母线压升最大为 0.091 ,220 kV 烟墩北母线压升最大为 0.082。
直流外送 5 000 MW 稳控策略 2/p.u	0.073 ~ 0.106	0.073 ~ 0.086	0.075 ~ 0.092	其中三塘湖风电场压升最大为 0.106 ,110 kV 烟墩北母线压升最大为 0.086 ,220 kV 三塘湖母线压升最大为 0.092。

电压变化幅度为 0.073 ~ 0.086 p.u ,220 kV 母线电压变化幅度为 0.075 ~ 0.092 p.u。

根据上述不同运行工况的稳控策略作用下 ,电压波动范围对比分析如表 2 所示。

当直流输电系统不同的传输功率工况下 ,直流发生双极闭锁稳控策略作用后 ,由表 2 的对比分析可知: ①无论何种工况下三塘湖风电场母线电压波动幅度均较大; 110 kV 母线电压波动幅度较大均出现在烟墩区域 ,但不同厂站电压波动幅度差异; 220 kV 母线电压波动幅度较大出现在不同的区域。②对比直流配套电源切机情况 ,全切机组较部分机组保留而言 ,系统整体稳态压升幅度较高 ,易对系统产生较大影响。对疆内机组而言 ,过多切除机组易造成交流通道功率大规模的转移 ,进而带来系统稳定性问题。③无论何种工况运行下直流故障稳控策略作用后 ,都易导致哈密高密度风电地区机端暂态电压过高 ,风机存在潜在的脱网威胁。

5 结 论

通过对哈密地区天中直流发生闭锁故障 ,对不同的工况下仿真分析电压分布特性得出如下结论:

- 1) 直流大功率运行配套电源全投入时 ,当直流发生闭锁故障后 ,稳控策略保留部分配套电源运行 (1 ~ 2 台机组) 有利于电压稳定。同时辅以无功控制利于系统稳定;
- 2) 考虑不同稳控策略的影响 ,直流闭锁故障后需综合考虑风电、疆内火电和配套电源的稳控策略 ,避免防止疆内过多切除火电导致线路过载 ,同时避免风电过多切除导致高电压的问题 ,将进一步导致风电大规模脱网;
- 3) 对于直流闭锁故障稳控策略后 ,风电集群接

入区域电压波动较大 ,尤其是烟墩区域、出现电压波动幅度较大 ,需要提升风机的耐高压 (1.15 p.u) 能力 ,进一步提升风电稳定运行能力。

因此 ,针对哈密高密度风电、交直流混联系统的稳定运行及电压分布特性研究 ,有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社 2004: 1 - 17.
- [2] 刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 128 - 135.
- [3] 常喜强, 樊艳芳, 钟显, 等. 高密度风电接入地区电压波动因素分析与研究 [J]. 四川电力技术, 2014, 37(6): 5 - 9.
- [4] 李国栋, 皮俊波, 郝力, 等. ±500 kV 林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析 [J]. 电网技术, 2014, 38(4): 877 - 881.
- [5] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 网源稳态调压对暂态无功支撑能力的影响研究 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 115 - 122.
- [6] 王衡, 姚秀萍, 常喜强, 等. 特高压直流故障对风电场送出可靠性的影响及改进措施 [J]. 电工电气, 2014(5): 29 - 32.
- [7] 王成祥, 王志勇, 宋兴光. 南方电网无功电压运行特性的分析与探讨 [J]. 电力设备, 2006, 7(5): 62 - 64.
- [8] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠. 风力发电引起的电压波动和闪变 [J]. 电网技术, 2003, 27(12): 62 - 66.
- [9] 丁明, 李宾宾, 韩平平. 双馈风电机组运行方式对系统电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2010, 34(10): 26 - 31.
- [10] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗祖. 电网和电网技术发展的回顾及展望——试论三代电网 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1 - 11.

(下转第 19 页)

[29] 胡书举,李建林,许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.

[30] 姚俊,廖勇,庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 91-96.

[31] 蔺红,晁勤. 电网故障下直驱式风电机组建模与控制仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 189-195.

[32] 文玉玲. 风电场短路特性及对电网继电保护影响的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2009.

[33] 苏常胜,李凤婷,武宇平. 双馈风电机组短路特性及对保护整定的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 86-91.

[34] 杨国生,李欣,周泽昕. 风电场接入对配电网继电保护的影响与对策[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 87-91.

[35] Comech M P, Montanes M A, Garcia M G. Overcurrent Protection Behavior Before Wind Farm Contribution [C]. The 14th IEEE Mediterranean Electro technical Conference, MELECON, Acacia 2008: 762-767.

[36] Jang S I, Choi J H, Kim J W, et al. An Adaptive Relaying for the Protection of a Wind Farm Interconnected with Distribution Networks [C]. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Dallas 2003: 296-302.

[37] 文玉玲,晁勤,吐尔逊·伊布拉音. 关于风电场适应性继电保护的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 47-51.

[38] 何世恩,董新洲. 大规模风电接入对继电保护的影响与

对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.

[39] 张保会,王进,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 1-6.

[40] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 1-6.

[41] 李生虎,贾树森,孙莎莎. 风电系统距离 III 段保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 31-35.

[42] 何世恩,索南加乐,杨铨,等. 适应于酒泉风电送出的 750kV 线路纵联保护原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 87-91.

[43] Pradhan A K, Joos G. Adaptive Distance Relay Setting for Lines Connecting Wind Farms [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 206-213.

[44] 樊艳芳,钟显,常喜强,等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.

作者简介:

钟显(1989), 硕士研究生, 主要研究方向为集群风电并网技术及其继电保护;

樊艳芳(1971), 副教授、硕士生导师, 主要研究方向为新能源并网技术及电力系统保护与控制研究;

常喜强(1976), 高级工程师, 主要从事电力系统分析与控制、调度自动研究;

魏威(1985), 学士, 主要从事电网调度与控制工作;

苏洪兴(1990), 学士, 主要从事电力系统继电保护工作。

(收稿日期: 2015-04-28)

(上接第9页)

[11] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[12] 颜伟,张海,兵田甜. 交直流系统的动态无功优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(29): 43-46.

[13] 陈树勇,逢博,陈得治,等. 新疆电网多送出直流输电系统运行特性分析[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 102-107.

[14] 樊艳芳,钟显,常喜强,等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.

作者简介:

常喜强(1976), 高级工程师, 从事电力系统分析与控制、调度运行控制工作;

樊艳芳(1971), 副教授、硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

张锋(1978), 高级工程师, 从事电力系统分析与控制、调度运行控制工作;

王衡(1984), 工程师, 从事电力系统分析与控制工作;

郑少鹏(1985), 工程师, 从事电力系统分析与控制工作;

魏威(1985), 学士, 主要从事电网调度与控制工作;

钟显(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2015-06-24)