

风电外送对直流系统的影响

辛超山, 吕盼

(国网新疆经济技术研究院 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 随着西北地区大规模能源基地的建成与 ± 800 kV 特高压直流输电系统的投运, 西北电网已形成了特高压直流输电与超高压交流输电共存运行的主网架结构。特高压交直流系统的相互影响已成为新疆电网这种特殊电力系统研究中最关注的问题之一。针对大规模双馈风电场交直流外送系统, 构建了3种交直流运行方式的网络拓扑结构; 研究了3种情况, 即风电场风速变化、风电场故障、换流母线故障时送端系统对直流系统的影响。基于 PSCAD/EMTDC 软件, 搭建了仿真模型, 并进行了仿真分析, 得到了仿真实验数据和曲线; 由仿真结果得到以下结论: 风电场处于不同的风速类型时, 对火电所需容量需求不同; 不同的交直流输电运行方式下, 风电场故障对直流系统的影响程度不同, 换流站交流母线故障对直流系统影响差异不大。

关键词: 交直流混联系统; 大规模双馈风电场; 运行方式; 短路故障

Abstract: With the completion of large-scale energy base in northwest China and ± 800 kV UHVDC system being put into operation, the Northwest Power Grid has formed the main grid structure that HVDC transmission and HVAC transmission coexist in the operation. The interaction between AC system and DC system has become one of the most concerned issues in Xinjiang power grid. Aiming at AC-DC transmission of large-scale DFIG-based wind farms and based on PSCAD/EMTDC software, the network topology for three AC and DC operating modes is built. Through the simulation and analysis, the influence of the changes in wind speed, wind farm fault and AC bus fault of converter station on DC system is studied. It is obtained from the simulation results that, when the types of wind are different, the requirements of thermal power capacity are different. The impact degree of wind farm fault on DC system is different and the impact of AC bus fault of converter station on DC system is similar under different AC/DC transmission modes.

Key words: AC/DC hybrid system; large-scale DFIG-based wind farm; operating mode; short-circuit fault

中图分类号: TM721.3 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0055-06

0 引言

中国的发电能源主要分布在西北、东北等地区, 新疆与甘肃的风能资源充足, 在风力发电方面有很大的发展潜力, 而这些地区的用电负荷相对较低, 无法就地消纳大规模的风电。为了提高资源的利用, 根据国家规划, 在新疆、甘肃等地建立了数个大规模风电场, 总装机容量达到了 GW 级, 将这些大容量的风电远距离输送至电力负荷集中的东部地区^[1]。由于高压直流输电具有输送容量大、距离远、非同步联接等优势^[2], 高压直流输电技术在西电东送工程中占据了重要的地位。

目前, 关于双馈风电场的研究已经达到了成熟的阶段, 文献[3]搭建了双馈风力发电机组的空气动力学模型、风力机模型、变频器模型, 但该模型由

于容量较小, 用于大规模风电场并网时较为复杂, 计算速度慢。文献[4]针对双馈变速风电机, 根据双馈变速风电机控制特点, 在控制环节中加入了频率调节, 在系统频率变化时, 双馈风电机组通过吸收或者释放转子中的一部分动能来, 相应增加或者减少有功出力, 从而实现风电机组的频率控制。许多学者对直流系统的建模进行了研究, 文献[5-8]对交直流系统搭建了仿真模型, 分析了交流系统与直流系统之间的相互作用。近年来大规模风电直流外送备受关注, 文献[9]对风电的几种直流外送方案进行了比较, 得出了风火打捆并网后直流外送对系统电压及频率的稳定性影响较小。文献[10-11]提出了大规模风电多端直流外送的方案, 给出了相应的控制策略, 并验证了方案的可行性。

针对含大规模双馈风电场的交流系统, 经不同

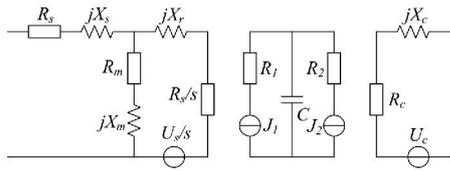


图 3 发电机等效电路

根据图 3 在旋转坐标系下,所建立的双馈发电机模型为

$$\begin{cases} u_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} + R_s i_{sd} \\ u_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} - \omega_s \psi_{sd} + R_s i_{sq} \\ u_{rd} = \frac{d\psi_{rd}}{dt} - s\omega_s \psi_{rq} + R_r i_{rd} \\ u_{rq} = \frac{d\psi_{rq}}{dt} - s\omega_s \psi_{rd} + R_r i_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

式中,角标 s, r 分别为定子侧和转子侧; d, q 分别为 d 轴分量和 q 轴分量; ψ 代表磁链; i 代表电流; L_s, L_r 代表定、转子侧电感(包含互感); L_m 定转子间的互感。

2.2 控制系统

双馈风力发电机组的控制系统主要目的是捕获最大的风能利用率,使风电电能质量达到最佳状态。其主要的控制思想是矢量控制,即通过补偿方式消除电压电流 d 轴和 q 轴分量之间的耦合,实现有功无功的解耦控制。主要分为网侧变频器控制和转子侧变频器控制,分别如图 4 和图 5 所示。

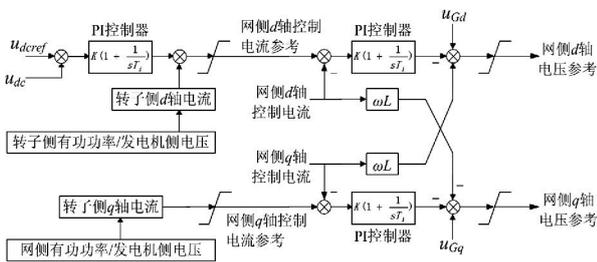


图 4 网侧控制框图

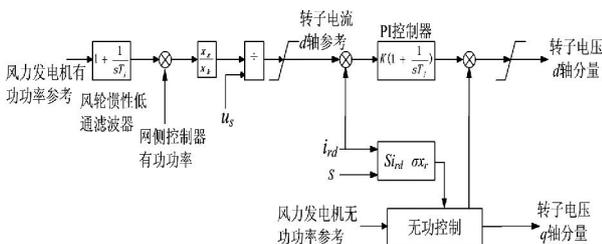


图 5 发电机侧控制框图

2.3 风电场建模

由于大规模风电场占地面积较大,即使每台风机的型号及参数完全一致,所处位置风速的差异也会导致每台风机输出功率不同。因此除了对风力发电机参数的等值,还需对风速等值。大规模风电场模型结构如图 6 所示。

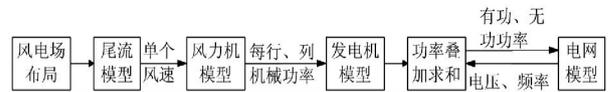


图 6 风电场模型结构

对风速的等值可简单表示为

$$\begin{cases} P_{Weq} = \sum P_{Wi} \\ P_{Wi} = f(v_i) \text{ 单台风机} \\ P_{Weq} = f(v_{eq}) \text{ 等值机} \end{cases} \quad (2)$$

因此可得等值后风速为

$$v_{eq} = f^{-1}(\sum P_{Wi}) \quad (3)$$

对风力发电机参数的等值采用常用的容量加权法^[14],常用于同类型风电机组构成的风电场中,其前提条件是风电场内所有风力发电机组通过出口变压器接于同一母线上。引入加权系数得

$$\delta_i = S_i / \sum_{i=1}^N S_i \quad (4)$$

式(2)~式(4)中,角标 i 为第 i 台风机的参数, S 为风机容量。利用容量加权法对风力发电机的主要参数等值得

$$\begin{cases} X_{meq} = \frac{1}{\sum \delta_i / X_{mi}} \\ R_{seq} = \frac{a_s}{a_s^2 + b_s^2} X_{seq} = \frac{b_s}{a_s^2 + b_s^2} \\ a_s = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i R_{si}}{R_{si}^2 + X_{si}^2} \quad b_s = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i X_{si}}{R_{si}^2 + X_{si}^2} \\ R_{req} = \frac{a_r}{a_r^2 + b_r^2} X_{req} = \frac{b_r}{a_r^2 + b_r^2} \\ a_r = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i R_{ri}}{R_{ri}^2 + X_{ri}^2} \quad b_r = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i X_{ri}}{R_{ri}^2 + X_{ri}^2} \\ T_{Jeq} = \sum \delta_i T_{Ji} \end{cases} \quad (5)$$

式中, s, r 为定子和转子的参数; e_q 为等值参数。

3 直流系统建模

换流器是直流系统的核心设备,其稳态时数学模型^[15]如下。

$$\begin{cases} U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi T} E \\ I_d = \frac{U_{dor} \cos\alpha - U_{doi} \cos\beta}{3X_{Tr}/\pi + R_d + 3X_{Tr}/\pi} \\ U_d = U_{d0} \cos\alpha - 3X_{Tr} I_d / \pi \\ P_{ac} = U_d I_d \\ \beta = \pi - \alpha \\ \gamma = \beta - \mu \end{cases} \quad (6)$$

式中,角标 r 代表整流侧; i 代表逆变侧; α 为整流器触发角; β 为逆变器触发超前角; γ 为熄弧角; μ 为换相角; T 为换流变压器变比; U_{d0} 为空载直流电压; U_d 为直流侧电压; I_d 为直流电流; P_{ac} 为直流输送功率。

所研究系统用于电力直流外送,需保证输送功率恒定,因此,采用整流侧定电流控制,逆变侧定 r 角控制。这种控制方式的优点在于:整流侧控制直流系统的电流不产生大幅度的变化,逆变侧控制直流系统电压保持额定电压附近,从而既保障了输送功率的稳定性,又具有经济性。此外,为了防止交流系统故障对直流系统造成的影响,配置了低压限流装置(VDCOL)、最小电流限制控制 α_{\min} 定控制。

4 交直流相互影响机理

当交流系统发生故障时,故障类型和电气距离的不同会导致换流站交流母线电压跌落程度的不同。当电压下降不严重时,换流站能够通过触发角和熄弧角的调节,保证直流系统运行于稳定状态。当电压下降严重时,熄弧角减至很小,不能够完成换相过程,发生换相失败,若故障及时消除,且交流系统电压能够恢复正常,则直流系统可以逐渐恢复稳定。若故障无法消除,会发生连续的换相失败,从而导致直流闭锁,直流输送有功功率减小,送端有功功率增大,受端有功功率减小,使潮流大范围的转移,有可能造成系统崩溃。

当直流系统发生闭锁故障时,直流输送有功功率降为零,导致换流站无功补偿大量剩余,使交流母线电压瞬间增大。若能够及时切除无功装置,交流母线电压恢复正常,若无法及时切除无功功率,交流系统电压升高,严重时有可能导致电压崩溃。

5 仿真分析

基于 PSCAD/EMTDC,在图 2 所示 3 种运行方

式下,分别对风电场风速变化、风电场故障、换流母线故障等情况下仿真,比较不同运行方式下送端系统对直流输电的影响。

5.1 风速变化时送端对直流系统影响

仿真阵风、渐变风、随机风的风速变化范围为 4 m/s 时所需火电临界容量,得到表 1 至表 3 的数据。

表 1 阵风时风电与火电临界容量比值

运行方式	风电容量 /p. u.	火电容量 /p. u.	比值
方式 1	0.5	1.07	1:2.14
方式 2	0.5	1.32	1:2.64
方式 3	0.5	1.22	1:2.44

表 2 渐变风时风电与火电临界容量比值

运行方式	风电容量 /p. u.	火电容量 /p. u.	比值
方式 1	0.5	1.11	1:2.20
方式 2	0.5	1.35	1:2.70
方式 3	0.5	1.25	1:2.50

表 3 随机风时风电与火电临界容量比值

运行方式	风电容量 /p. u.	火电容量 /p. u.	比值
方式 1	0.5	1.35	1:2.70
方式 2	0.5	1.60	1:3.20
方式 3	0.5	1.50	1:3.00

当风速变化时,风电场有功出力随着风速变化而变化,当火电容量不够充足时,风速变化导致的风电场有功功率波动会影响到直流系统输送功率的稳定性。从表 1、表 2、表 3 可以看出,无论风电场处于何种风速,交直流系统运行于方式 1 下所需火电容量最小。阵风与渐变风条件下,相同的风速变化范围导致的风电场输出有功功率差异不大,而随机风下风电场的频率波动较大。比较表 1 至表 3 可以看出,当风电场风速类型不同时,为保证直流输电输送有功功率恒定,所需火电容量不同,噪声风所需火电容量最大,渐变风、阵风较小。因此,当火电容量不足够大时,噪声风对直流输电传输功率的影响最大。

5.2 风电场故障对直流系统影响

分别设置 3 种运行方式下的风电场 PCC 母线在 1 s 时发生 3 相短路故障,持续时间为 0.15 s,得到系统响应如图 7 所示,其中,左侧为方式 1、中间为方式 2、右侧为方式 3。

从图 7 中可以看出,当风电场 PCC 母线处发生短路瞬间,风电场 PCC 点母线电压降至零,Crowbar 保护不投入,风机脱网,导致换流站交流母线换相电压降低,直流侧电压跟随换相电压降低,直流电流瞬间降低,整流站触发角 α 处于最小值状态,使 α 角保持在 5° ,直流电压的降低,使直流电流急剧上升,为了防止直流电流在电压降低时的过大,依靠低压限流控制的作用使直流电流保持在 0.5 p.u.。故障消除后,交直流系统能够恢复到稳定运行状态。风电场的短路故障对与之不相联的直流系统影响几乎可忽略不计。

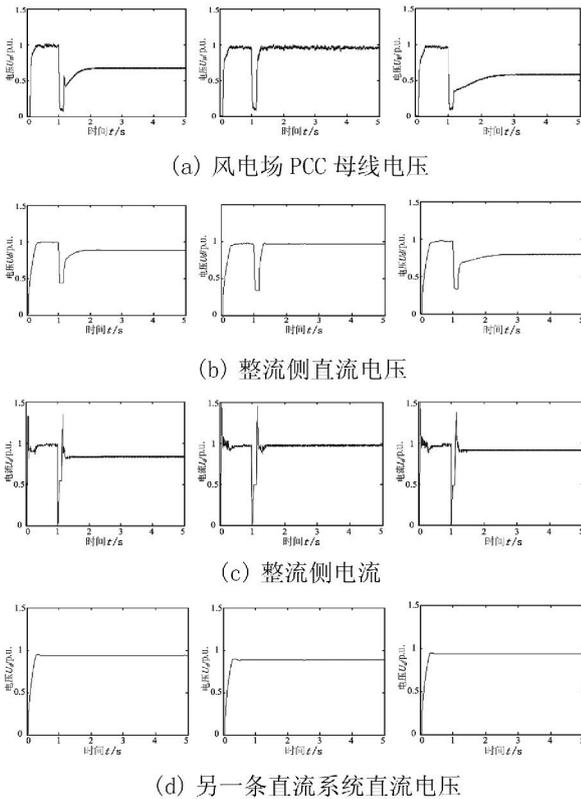


图 7 风电场 PCC 短路时系统响应曲线

比较 3 种运行方式,风电场发生故障后,运行在方式 2 下的交直流系统能够恢复到故障前的运行状态,并且恢复到稳定状态所用的时间较最短,大规模风电场的故障对方式 2 的交直流系统影响最小。这是由于方式 2 下,两个交直流输电系统均采用非并联运行方式,将电能输送至 4 个不同受端系统,交流系统与直流系统间的相互耦合作用可忽略不计。

5.3 换流母线故障对直流系统的影响

将前面所述故障分别设置于整流侧交流母线与逆变侧交流母线,仿真结果如图 8、图 9 所示。

在图 8 和图 9 中,整流侧发生故障时,换流母线

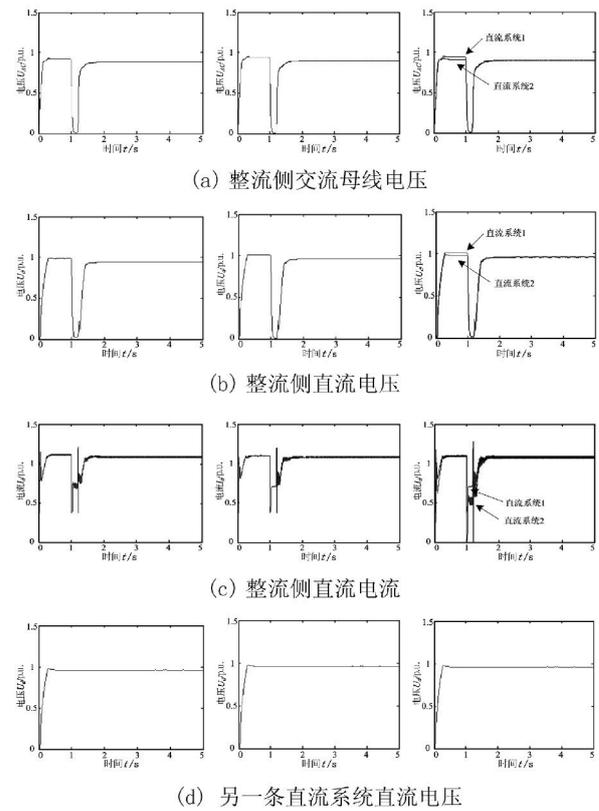


图 8 整流侧交流母线短路系统响应图

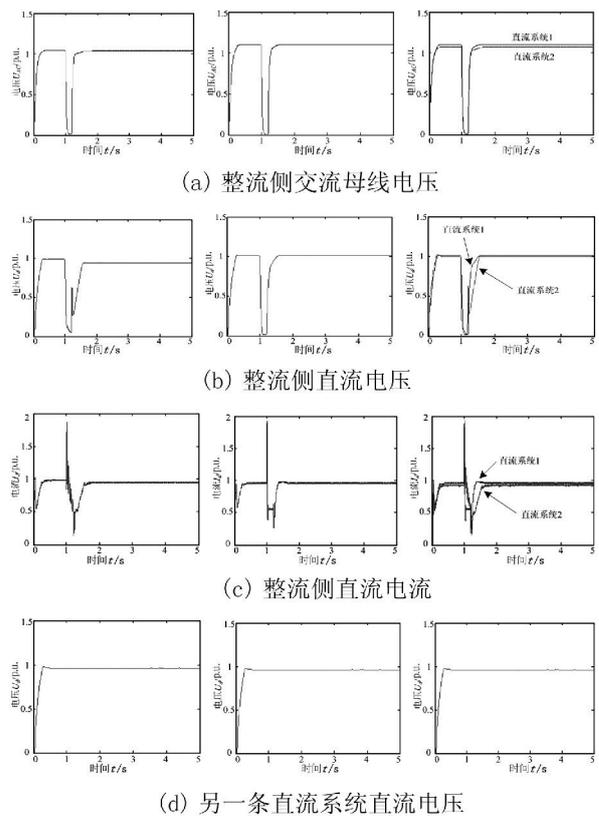


图 9 逆变侧交流母线短路系统响应图

电压降至零,根据式(6)可得,直流电压下降,从而引起直流电流下降,定电流控制从整流侧转到逆变

侧,使得直流输送功率下降;逆变侧发生故障时,使逆变器的反电动势降低,从而增大了直流电流,可能发生换相失败。逆变侧交流母线故障对直流系统的影响比整流侧的大。

整流侧交流母线发生故障时,3种运行方式下故障对直流系统的影响程度几乎相同;逆变侧交流母线发生故障时,方式2下的交流母线故障对直流系统影响最小。在方式3下,交直流非并联运行时故障对直流系统的影响较小。换流站故障母线对另一条直流系统的几乎没有影响。

6 结 论

通过对大规模双馈风电场及交直流混联系统的建模,仿真并详细分析了不同交直流系统运行方式下,含大规模双馈风电场的送端系统对直流系统的影响,得出以下结论。

(1) 为保证直流输送功率的稳定性,风电场无论处于何种风速类型时,运行于方式1下交直流输电系统对火电容量需求最小。

(2) 在不同交直流系统的运行方式下,送端系统故障对直流系统的影响不同。当风电场PCC母线故障时,运行在方式2下的交流系统故障对直流系统的影响最小,当整流侧交流母线故障时,3种运行方式下的交流故障对直流系统影响程度差异不大。

(3) 发生于某条直流输电系统交流母线的故障对另外一条直流系统的影响较小。

通过仿真与分析得到了上述结论,能够为大规模双馈风电场直流外送的调度及控制提供相应的帮助。对于交直流输送比例不同时的稳定极限问题还需继续研究。

参考文献

[1] Wind Power Installed Capacity Statistics in China, 2009. [Online]. Available: <http://www.cwea.org.cn/main.asp>.

[2] Szechtman M, Wess T, Thio C V. First Benchmark Model for HVDC Control Studies [J]. *Electra*, 1991, 135(4): 54-67.

[3] 李晶,宋家骅,王伟胜,等. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(6): 100-105.

[4] 曹军,王虹富,邱家驹. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(13): 78-82.

[5] 陈水明,余占清,谢海滨,等. 互联系统电磁暂态交互作用研究, I: 直流侧设备电磁暂态模型[J]. *高电压技术* 2011, 37(2): 395-403.

[6] 陈水明,黄璐璐,谢海滨,等. 互联系统电磁暂态交互作用研究, II: 交流侧系统等值及稳态调试[J]. *高电压技术* 2011, 37(3): 537-547.

[7] 陈水明,黄璐璐,谢海滨,等. 互联系统电磁暂态交互作用研究, III: 交流侧对直流侧的影响[J]. *高电压技术* 2011, 37(5): 1082-1092.

[8] 陈水明,黄璐璐,谢海滨,等. 互联系统电磁暂态交互作用研究, IV: 直流侧对交流侧的影响[J]. *高电压技术* 2011, 37(7): 1590-1597.

[9] 郭小江,马世英,申洪,等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(15): 107-115.

[10] 陈霞,林卫星,孙海顺,等. 基于多端直流输电的风电并网技术[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(7): 60-67.

[11] 孙文博,徐华利,付媛,等. 应用于大型风电基地功率外送的多端直流输电系统协调控制[J]. *电网技术*, 2013, 37(6): 1596-1601.

[12] 蔺红,晁勤. 并网型直驱式永磁同步风力发电系统暂态特性仿真分析[J]. *电力自动化设备*, 2010, 30(11): 1-5.

[13] 张新燕. 风电并网运行与维护[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

[14] A. Shafiu, O. Anaya-Lara, G. Bathurst, et al. Aggregated Wind Turbine Models for Power System Dynamic Studies[J]. *Wind Engineering*, 2006, 30(3): 171-186.

[15] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[16] 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.

作者简介:

辛超山(1989) 硕士,从事电网规划相关工作。

(收稿日期: 2014-10-09)