

特高压直流对交流系统稳定性的研究

张东明¹, 姚秀萍^{1,3}, 王维庆^{1,2}, 常喜强³, 王海云^{1,2}

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;

3. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要: 针对大规模风电集中外送, 重点从特高压直流对风电、火电打捆联网系统的安全稳定问题展开研究。建立了直流输电系统模型以及风电机组模型; 分析了不同风电机组对交直流系统的稳定性以及直流闭锁故障对系统影响的仿真分析。在此基础上分析了风电、火电打捆联网直流外送系统带来的一系列问题, 为大规模新能源的规划和运行提供了建设性依据。

关键词: 直流输电; 风力发电; 风电打捆; 电力系统稳定性

Abstract: Aiming at the large-scale wind power transmission, the problems about the security and stability of the integrated system of thermal-generated power bundled with wind power caused by UHVDC are researched. The DC transmission system model and the wind turbine model are established. The influence of different wind turbines on the stability of AC/DC system and the impact of DC blocking fault on AC system are discussed. Based on the analysis, a series of problems brought by the integrated system of thermal-generated power bundled with wind power are considered, which provides the constructive basis for the planning and operation of the large-scale integration of new energy to power grid.

Key words: DC transmission; wind power generation; thermal-generated power bundled with wind power; power system stability

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0001-03

0 引言

随着风电机组技术的发展以及国家对可再生能源的重视, 越来越多的大型风电场开始接入电网。风电的进一步发展, 客观上需要扩大风电消纳范围, 大风电必须融入大电网才能显著提高风电消纳能力。因此, 利用直流输电技术解决大规模风电远距离输电需求的输电方案已成为科研工作者的研究热点。

目前, 可行性的大规模风电接入方案不外乎有3种: 风电孤岛直流外送, 风、火电打捆风电直流外送以及风、火电打捆联网直流外送。风电孤岛直流外送系统, 由于缺乏系统支撑, 在风电场出力与直流输电功率之间出现的任何功率不平衡都会引起送端功率的波动, 风电机组受风速影响较大, 发电主动控制能力差, 在不采取有效的频率控制措施条件下, 一般的风速功率都会引起送端系统频率的崩溃。风、

基金项目: 教育部创新团队项目(IRT1285); 国家自然科学基金项目(51267017)

火电打捆直流外送方案通过火电机组调速系统的调节, 送端系统能够维持频率稳定, 但是在电压稳定方面, 由于送端孤岛方案缺乏系统支撑, 送端线路发生故障易引起系统电压崩溃。

下面针对以上两种方案的优缺点, 对风、火电打捆联网直流外送方案进行了仿真计算, 详细分析了风电机组、火电机组、交直流系统之间的相互影响和系统稳定特性。研究结果分析了风、火电打捆联网直流外送方案带出的一系列问题, 为大规模风电接入电网的稳定问题提供了参考依据。

1 风、火电打捆联网直流外送系统建模

1.1 直流输电系统模型

所采用的直流输电系统模型是基于对直流换流器、控制系统和直流线路进行详细模拟的模型, 在交流系统对称和无畸变的情况下可以用来模拟直流输电系统本身的动态特性以及与交流系统之间的相互

作用特性。采用直流输电系统详细模型的交直流电力系统机电暂态仿真原理如图1所示。对直流线路来说,两侧换流器相当于两个电压源,其数值决定于触发控制角和交流侧电压模值,直流线路本身可以采用适当的动态模型。

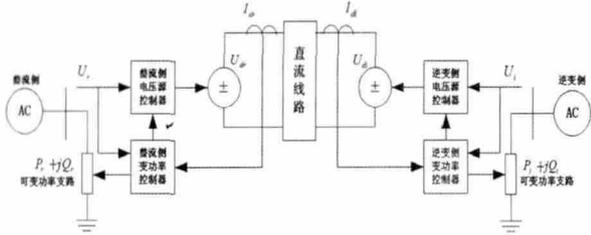


图1 直流输电系统机电暂态仿真原理图

此模型可以通过实际计算关断角 γ 比较准确地确定是否发生换相失败;直流系统在故障后的恢复过程可以得到较好的模拟,而不是事先指定恢复速度;由于模拟了定电流、定电压和定关断角等控制器的实际动态过程,因而可以比较精确地模拟直流系统中的控制模式的切换过程。

1.2 风电机组模型

基于 PSASP 建立了双馈风电系统模型,包括双馈感应发电机模型及其控制系统,图2为双馈感应式风电机组模型,其转子转速可以在较大范围内变化。双反馈风机并网后电机定子频率与电网一致,转子通过变频器与电网相连。

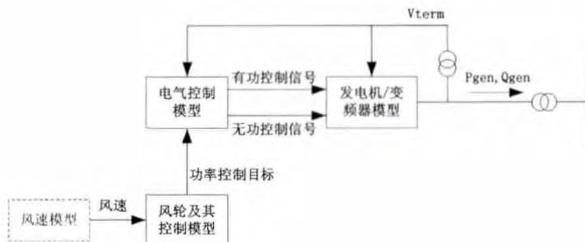


图2 双馈感应式风电机组模型

对于大规模风电场则采用等值风电机组的方法集中模拟风电场出力,从同调机群识别、同调母线聚合以及网络化简3个方面将1个同调风电机组等值为1个风电机组,然后基于加权法实现风电场模型的同调参数聚合,得出等值风电场的相关静态参数如下。

$$\begin{cases} S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N S_i \\ P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_i \\ T_{\Sigma} = \frac{1}{S_{\Sigma}} \sum_{i=1}^N T_i S_i \end{cases} \quad (1)$$

式中 S_{Σ} 、 P_{Σ} 、 T_{Σ} 分别为风电场等值机组容量、有功出力和惯性时间常数; S_i 、 P_i 、 T_i 分别为风电场第 i 台风电机组的容量、有功出力和惯性时间常数。

2 风、火电打捆联网直流外送实际系统稳定性分析

为了提高大规模风电直流外送系统的稳定性,新疆电网采用风、火电打捆联网直流外送方案,如图3所示。该方案将风电和火电构成的送端系统接入电网,可强化对直流系统的支撑能力。

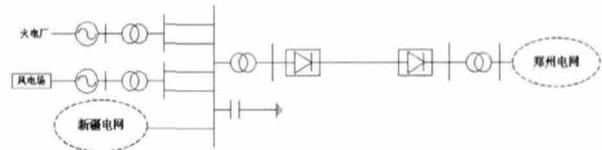


图3 风、火电打捆联网直流外送简化系统

风、火电打捆联网直流外送的送端由大规模风电场和火电厂构成。在该系统中,风电和火电配置的比例为1:2,即风电场出力为3.6 GW,火电厂实际出力为3.6 GW,备用容量为3.6 GW,通过 ± 800 kV/7.2 GW 特高压直流输电系统实现电力外送。风电场、火电厂与换流站之间均通过2回长度为100 km的750 kV交流线路连接。

2.1 风电机组类型对交直流系统稳定性的影响

风电大规模集中接入方式耐受系统电压扰动能力较弱,主要有以下几个方面的问题:一是低电压及多次穿越能力;二是高电压穿越能力;三是故障过程的无功支撑能力。

大规模风电接入系统时,不同类型的风电机组对无功功率的需求不同,而且低电压穿越的能力也不同,将会直接影响接入系统的稳定性。

这里仿真了固定转速风电机组以及双馈风电机组对电网稳定性的影响。根据仿真数据可知,固定转速的风电机组不具有低电压穿越能力,在并入电网后母线电压低于0.85 p.u.,并且持续两个周期后退出运行;双馈风电机组具有低电压穿越能力,对电网稳定性影响较小。如图4给出了风电场和特高压直流送端换流站进区750 kV线路发生三相永久短路故障条件下,双馈风电机组对交直流系统影响的仿真曲线。

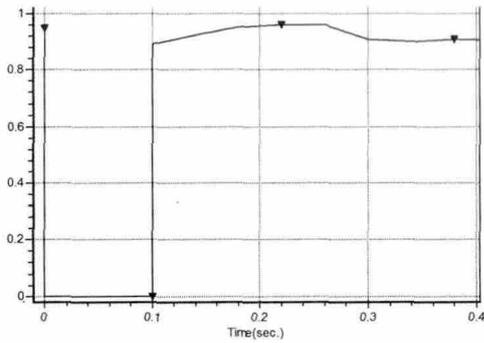


图4 风电机组对交直流系统稳定性影响

风电场附近的线路发生三相永久性短路故障期间,双馈风电机组具有低电压穿越能力,能够躲避故障期间的低电压继续并网运行,故障线路切除后,潮流将转移到其他线路,使得电网电压在一定程度上有所下降,随着交流系统电压的恢复,直流电压在恢复到0.85 p. u. 以上时,直流功率开始恢复。

2.2 直流闭锁故障对交流系统的影响

直流闭锁故障直接影响异步联网,使得送端功率盈余,受端功率缺额;其次就是使得同步联网100%功率转移到并联交流通道上。

随着特高压直流外送功率的增大,直流闭锁故障造成的功率转移量也随之增大,从而导致进区通道出现电压失稳问题,对特高压直流外送功率构成约束,危及联网直流的安全稳定运行。

当直流发生闭锁故障时,导致系统出现暂态过电压,将有可能导致进区交流通道上的风机大量脱网,进一步恶化事故后稳态过电压问题。此外,在从系统故障到故障切除过程中出现的风机吸收无功这一特性,将有可能导致进一步恶化系统故障后的电压稳定问题。

2.3 直流无功控制对交流系统的影响

直流无功控制分为3级:最小滤波器、电压控制、无功平衡。为保证直流可靠运行,至少投入1~2组滤波器,当直流电压偏差越限时,相应投切滤波器,当电压合格时,根据交直流系统无功交换控制滤波器。一般设计送端采用欠补偿,受端采用过补偿,考虑10%过负荷运行。

还仿真了送端送出约为45%(电压535 kV),受端约为60%(电压510 kV)时直流无功控制,如图5所示。

由图5可知,极I电流为零时间170 ms,极II电流为零时间21 ms。故障后约300 ms过程中,交流电压最高达到656 kV,直流功率总体缺额较大。

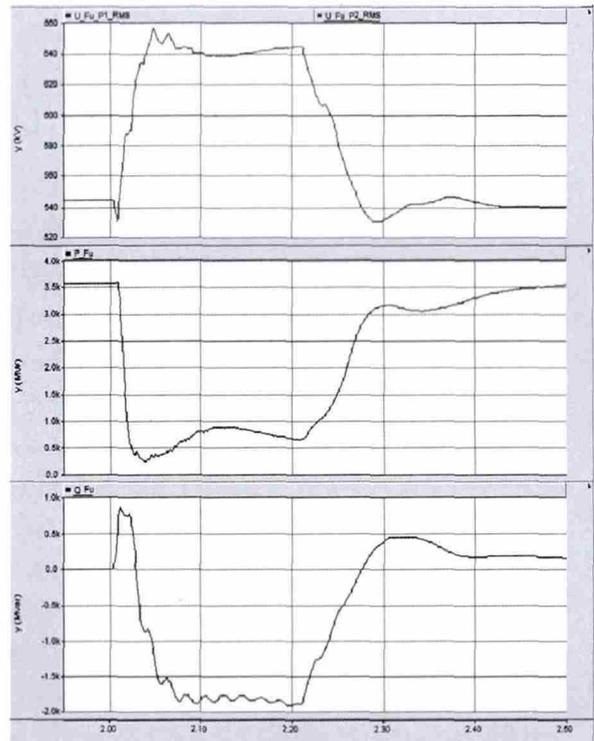


图5 直流无功控制仿真分析图

3 结论

详细分析了风、火电打捆交直流系统的相互影响,仿真并得出:1) 具有低电压穿越能力的风电机组能躲避故障期间的低电压继续并网运行;故障切除后功率会转移到进区线路,使得系统电压一定程度的降低。2) 直流闭锁故障会使系统出现暂态过电压,有可能导致进区交流通道上的风机大量脱网,外加故障过程中风机吸收无功这一特性,会进一步恶化事故后稳态过电压问题。3) 故障时,直流无功控制会使得直流功率缺额总体较大。

根据以上结论还需进一步研究风电和火电的配比关系是否能解决系统的电压、频率稳定性问题,以及直流的各种控制策略,找到一种优化的外送方案,最大程度上解决直流接入面临的电压、频率等系统的安全稳定性问题,从而为特高压直流输电的投入运行提供参考依据。

参考文献

[1] 郭小江,申洪,马士英. 风电机组大规模接入系统后对多点直流外送的影响研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,2009.

(下转第22页)

发生 Hopf 分岔,当励磁系统参考电压比较大时,系统只发生 SNB 分岔,此时 SNB 分岔点作为系统传输功率极限点,并且采用较高的励磁系统参考电压可以避免系统发生振荡失稳。最后通过时域仿真的方法发现,直流系统对两端交流节点电压的影响并不相同,逆变侧由于受直流系统影响比较大,会出现电压畸变现象。

参考文献

[1] 刘明波,程劲辉,程莹. 交直流并联电力系统动态电压稳定性分析[J]. IEEE Transactoins on Power Delivery, 1998, 13(13): 923-931.

[2] 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.

[3] 庄慧敏. 基于分岔理论的交直流电力系统电压稳定性分析方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.

[4] 刘彩霞,周艳平. 分岔理论在电力系统电压稳定性中的应用[J]. 云南水利发电, 2007, 23(3): 87-90.

[5] 彭志炜,胡国根,韩祯祥. 基于分岔理论的电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[6] 刘崇茹,张伯明. 交直流混合输电系统灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 45-49.

[7] 邱革非,束洪春,董俊,等. 联于弱交流系统的 HVDC 输电系统输电能力和电压稳定性的研究[J]. 昆明理工大学学报, 2005, 30(3): 50-55.

[8] 庄慧敏,肖剑. 交直流系统电压稳定性的 Hopf 分岔分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 699-704.

[9] 李康. 基于分岔理论的电力系统动态电压稳定性分析

[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

[10] S. L. Richer, R. A. Decarlo. Continuation Methods: Theory and Application [J]. IEEE Transations on Circuits and Systems, 1983, 13(4): 459-463.

[11] 顾伟. 电力系统最优分岔控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.

[12] 樊纪超. 交直流并联输电系统动态安全域及其割集表示[D]. 天津: 天津大学, 2005.

[13] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[14] 谭涛亮,张尧. 交直流互联系统动态电压稳定的分岔值分析[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 49-56.

[15] 李宏仲. 基于 Hopf 分岔理论的电力系统动态电压稳定研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

[16] 赵兴勇,张秀彬,苏小琳. 电力系统电压稳定性研究与分岔理论[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 87-95.

[17] X. Yang, Y. chen, H. L. Shu. Stability Analysis of AC/DC Power Transmission System based on Bifurcation Theories [C]. Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, 2009: 1-7.

作者简介:

高超峰(1989),男,硕士研究生,研究方向为电力系统电压稳定性;

康积涛(1962),男,教授,研究方向为电力调度自动化、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期: 2013-06-20)

(上接第3页)

[2] 周宏林,杨耕. 大型 DFIG 风电场的 LCC-HVDC 并网及控制[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 8-12.

[3] 姚伟,迟永宁,程时杰,等. 直流输电技术在海上风电场并网中的应用[J]. 中国电力, 2007, 40(10): 70-74.

[4] 汪宁渤. 甘肃酒泉千万千瓦风电基地面临的挑战与应对措施[J]. 电网与清洁能源, 2009, 30(7): 43-47.

[5] 肖创英,汪宁渤,丁坤,等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1-7.

作者简介:

张东明(1987),男,硕士研究生,研究方向为电力系统

稳定与控制;

姚秀萍(1961),女,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术;

王维庆(1959),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统自动化和风力发电机组的智能控制;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向: 电力系统稳定与控制及风力发电技术;

王海云(1973),女,副教授,硕士研究生导师。研究方向为可再生能源发电与并网技术。

(收稿日期: 2013-09-27)