

风电接入系统后的电压稳定问题

金海峰, 吴 涛

(华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 针对风电接入系统后电网电压的稳定将变得更加复杂的问题, 分析并指出负荷特性、风电并网点的选择、系统的无功电源以及风电机组特性等是影响电网电压稳定的主要因素。为提升风电接入系统电网后电压的稳定性以避免电压崩溃的发生, 提出了几种措施, 主要包括充足的风电场无功补偿装置配置, 合理的电源结构配置, 完善的低频/低压减载整定以及风机技术性能的提升等。通过一个实际系统的仿真算例说明了双馈风机的低电压穿越能力对于阻止电压崩溃的有效性。

关键词: 风电机组; 电压稳定; 无功补偿; 双馈风机; 低电压穿越

中图分类号: TM 714.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0082-03

0 引言

电压稳定^[1-3]是指电力系统在给定的稳态运行点遭受一定的扰动后负荷节点的电压能够达到扰动后平衡点的电压值。近 20 年来, 世界范围内发生的多起电压崩溃事故使电压稳定在电力系统规划和运行中受到了越来越多的关注。

在风电高速发展的今天, 我国近 3 年风电装机年均增速约为世界风电装机增速的 4 倍^[4]。风机的电压敏感性及低电压自动脱网特性使风电接入系统后的电压稳定问题面临着新的挑战和研究内容。

传统的电压稳定问题被认为是负荷侧的稳定问题^[5], 即电网末梢的稳定问题。然而, 我国的风资源分布极不均匀, 风资源丰富的地区大都远离负荷中心, 需要汇集后进行集中外送, 在输电走廊紧张的情况下甚至出现百万风电基地与火电打捆外送的情况, 这使大规模的风电接入系统后的电压稳定问题由末梢电网延伸到了主干网架。

本文简要介绍了风电接入系统后引发电压崩溃风险的主要因素, 指出了风电接入后提升系统电压稳定水平的措施, 并通过仿真算例证明了所提措施的正确性, 最后总结了大规模风电接入系统后的电压稳定问题的研究方向。

1 引发系统电压崩溃风险的相关因素

风电机组对电压非常敏感, 所有风机均配备有低电压保护, 即当风电机组的机端电压低于一定值(通常是 0.9 p.u.)时, 风机将自动脱网退出运行。因此, 在系统发生扰动导致风电机组的低电压保护动作时, 风电机组将会加速系统的电压失稳, 甚至引发电压崩溃。

风电接入系统后引发系统电压崩溃风险的因素

主要有 4 个。

1.1 负荷特性

电力系统中的负荷种类多, 特性差异大。电力系统静态仿真时可将负荷粗略地分为恒功率负荷、恒阻抗负荷和恒电流负荷 3 类。恒功率负荷对电压稳定的影响最为严重, 恒电流负荷次之, 恒阻抗负荷对电压稳定的影响最小。

然而对于电压稳定分析进行的长过程仿真而言, 感应电动机等负荷特性就变得很重要, 因此上述分类远不能满足要求。目前世界各国的研究学者已经开始了负荷特性的建模工作^[6-7]。

1.2 风电场并网点的强弱程度

风电接入系统时, 并网点的强弱与并网风电场的容量密切相关, 并网点电气强度越高, 允许接入的风电容量越大, 反之越小。通常情况下, 用短路容量百分比来衡量并网点接纳风电的适宜程度, 它是指风电场装机容量与并网点短路容量的百分比, 如式(1)所示, 不同的电网结构, 不同的控制要求, 短路容量百分比的控制可以不同, 一般情况下, 短路百分比不得高于 10%。

$$\gamma(\%) = \frac{S_{\text{wind}}}{S_{\text{AC}}} \times 100\% \quad (1)$$

其中, S_{wind} 为风电场容量; S_{AC} 为并网点容量。

1.3 系统无功电源的特性

这里的无功电源是广义的概念, 既包括了无功电源, 也涵盖了负荷侧的无功功率补偿装置。总之, 系统中无功电源的容量和响应速度也是影响电压稳定的重要因素。

由于风机的无功/电压调节能力较差, 同时风机的运行对电压又十分敏感, 因此, 风电场变电站内部一般都配备有一定容量的无功补偿装置, 用以补偿风电场内部变压器和风机自身无功消耗, 从而实现风电场并网点处的无功零交换。

1.4 风电机组的特性

现今运行的风电机组类型很多,根据是否变桨有定桨距和变桨距风机之分,根据是否变速又分为恒速和变速风机,另外还有异步风机和同步风机之分,理想的风机要求维护量小,能够根据风速情况进行变速,同时可以实现有功功率和无功功率解耦控制,具有较强的无功功率和电压调节能力。

风机的低电压穿越能力^[8-10]是风机的一项重要特性,直接关系到风电接入系统后的电网稳定。风机的低电压穿越能力是指风机在感受到短时低电压时,风机继续保持与电网的连接而不脱网的能力。图1是故障发生后导致的电压跌落区域分布图,图2是我国的低电压穿越能力要求(纵轴的0.2、1.0为电压的标幺值),即当电压降落程度位于图中曲线以上区域时,风机不能自动脱网,当电压降落程度位于图中曲线以下区域时,风机可自动脱网。

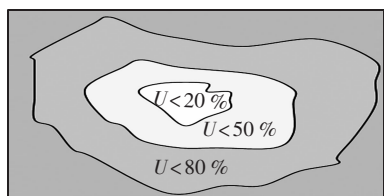


图1 电压跌落区域分布图

Fig.1 Distribution of voltage drop zone

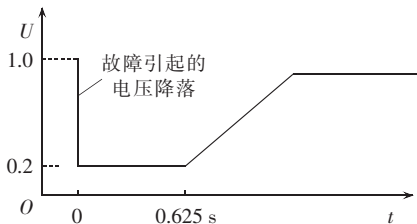


图2 我国低电压穿越能力要求

Fig.2 Requirements of LVRT in China

2 提升电压稳定的措施

2.1 风电场配备足够的无功补偿容量

一般,风电场的变压器损耗约为装机容量的15%~20%,因此风电场的容性无功补偿不得低于这一比例。对于一些恒频、恒速异步风机的风电场,尽管风机自身已经配备了少量的容性补偿装置,但考虑到风机出力较大时仍然需要从系统吸收一定的无功功率,上述容性补偿的比例应适当提高。

另外值得一提的是,对于一些通过较长线路才接入系统汇集点的风电场,当风电场出力较低或出力为零时,长距离输电线的充电无功会引起风电场电压升高至不能承受的数值,需要考虑配备相应的感性无功补偿将风电场电压控制在合适的数值。

2.2 采用响应快速、无功输出对电压依赖性小的无功电源

在整个系统,尤其是风电场所在区域配置无功输出对电压依赖性小的无功电源可对系统电压的恢复

起到动态支撑的作用。由于电容器的输出对电压的变化十分敏感,在电压发生较大幅度的降低时,电容器的作用不大,因此,风电场内部所配备的无功补偿装置中电容器的比例不得太高,建议控制在总补偿容量的50%以内,其余部分采用动态无功补偿装置。

2.3 不断完善的低压减载和低频减载配置方案

风电接入系统后,系统的低压减载和低频减载方案变得复杂,正确的方法是采用全时域仿真分析的方法,针对不同区域的风电接入情况分别制定符合自身特点的配置方案。虽然如此,低压减载和低频减载作为电力系统安全稳定运行的第3道防线^[11-12],仍需要遵循下列基本配置原则:

a. 一般情况下所安排的负荷切除量不能少于该地区负荷的10%,低压切负荷装置可以与低频切负荷装置安排切除相同的负荷;

b. 兼顾切除负荷量充足和避免过量切除负荷量方面的要求,满足不同故障情况下系统稳定性和恢复电压的要求;

c. 合理设置各轮次动作电压和延迟时间,各轮次应逐级动作;

d. 低压减载措施要与其他第3道防线中措施相适应,减少不必要的损失,避免对电网进一步的冲击;

e. 充分考虑风电汇集区域的负荷特性,这些区域负荷切除延时要综合考虑风机的低电压穿越能力。

2.4 采用具有无功输出能力的风电机组

风机的发展主要经过了恒频恒速异步风机、双馈风机和直驱风机3个典型的发展阶段,目前欧洲一些国家通过相关的技术规定^[13-14]逐步实现了风机的技术更新,目前恒频、恒速的异步风机已经退出了市场,主要采用具有无功调节能力的后2种机型。

3 算例

本文以一个实际电力系统的实例,使用 power factory digsilent 软件作为分析工具,研究了风电场接入后的电压稳定仿真,说明了故障后双馈风机^[15]的低电压穿越能力对系统电压恢复的良好作用。

该系统主要以火电机组为主,其中包含一个60 MW的风电场(见图3),经由110 kV线路并入电网,线路长36 km。风电场由30台单机容量为2 MW的双馈异步风机组成,风机机端电压690 V,风电机组配备有低电压穿越模块。

运用 power factory digsilent 软件进行了风电场站内35 kV线路发生三相短路故障时的时域仿真,图4给出了风机机端电压 u_G (标幺值)变化曲线、风

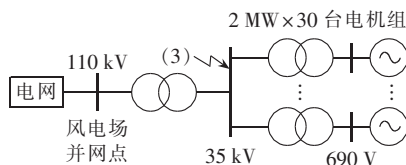


图3 风电场接入系统图

Fig.3 Wind farm connecting to grid

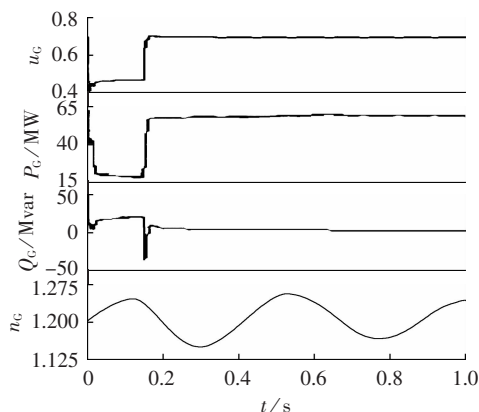


图4 风电场 35 kV 母线三相短路仿真结果

Fig.4 Simulative results of wind farm 35 kV bus three-phase short-circuit

电场有功功率 P_G 、无功功率 Q_G 输出曲线及风电机组转速 n_G (标幺值) 变化曲线。由图 4 可见, 由于风电机组在电压跌落期间 25 Mvar 的无功功率输出, 对电压降落起到了短暂的支撑, 使系统电压更快恢复。

若风电场的风机没有配备低电压穿越模块, 即不具备低电压穿越能力, 则故障后电压的降落将导致风机低电压保护 (一般为 0.9 p.u.) 动作, 风电场的风机将自动脱网, 可能引发更大范围的电压失稳。

4 结论

风电的快速发展和大规模接入电网赋予了电力系统电压稳定新的研究内容。不同的系统面临的电压稳定问题可能有较大的差异, 即使同一个电力系统, 不同的发展时期, 网架结构的差异、负荷特性的差异以及风电接入容量的差异均使系统的电压稳定问题变得不同, 需要区别对待和解决。

为了风电接入系统后的电压稳定应选择技术性能好的风机、尽可能地将风电场分散接入系统、风电场及系统其他节点的无功电源的快速有效响应、完善低压和低频减载装置。另外, 还应深入研究风机建模和进行风电接入系统后的长过程仿真。

参考文献:

- [1] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1994: 34-36.
- [2] BEGOVIC M, PHADKE A. Control of voltage stability using sen-

sitivity analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 114-123.

- [3] KESSEL P, GLAVITCH H. Estimating the voltage stability of a power system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1986, 1(3): 346-354.
- [4] SHI Pengfei. Progress and trends of China wind power[J]. New Energy, 2007, 13(4): 40-42.
- [5] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. New York, USA: McGrawHill, 1993: 17-19.
- [6] PAL M K. Voltage stability conditions considering load characteristics[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 243-249.
- [7] SEN K, STACEY E J. UPFC-Unified Power Flow Controller: theory, modeling, and applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1454-1460.
- [8] HOLDSWORTH L, WU X G, EKANAYAK J B, et al. Comparison of fixed-speed and doubly-fed induction generator wind turbines during power system disturbances[J]. IEE Proc C-Gener Transm Distrib, 2003, 150(3): 343-352.
- [9] WU X G, ARULAMPALAM A, ZHAN C, et al. Application of a STATIC reactive power compensator (STATCOM) and a Dynamic Braking Resistor (DBR) for the stability enhancement of a large wind farm[J]. Wind Engineering Journal, 2003, 27(2): 93-106.
- [10] EKANAYAKE J B, JENKINS N, COOPER C B. Experimental investigation of an advanced static var compensator[J]. Proc IEE, Geneva Transm Distrib, 1995, 142(2): 202-210.
- [11] 韩英铎, 闵勇, 洪绍斌. 复杂扩展式电力系统功率频率动态过程分析[J]. 电力系统自动化, 1992, 16(4): 28-32.
- [12] HAN Yingduo, MIN Yong, HONG Shaobin. Analysis of power-frequency dynamics in large scale muln-machine power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1992, 16(4): 28-32.
- [13] CONCORDIA C, FINK L H, POULLIKKAS C. Load shedding on an isolated system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1467-1472.
- [14] ERLICH I, BRAKELMANN H. Integration of wind power into the German high voltage transmission grid[C]//Proc IEEE PES General Meeting. Tampa, USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [15] UMMELS B C, GIBESCU M, KLING W L, et al. Market integration of wind power in the Dutch liberalised market[J]. Wind Energy Journal, 2006, 9(6): 579-590.
- [16] LEDESMA P, USAOLA J. Doubly fed induction generator model for transient stability analysis[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 388-397.

(编辑: 柏英武)

作者简介:

金海峰(1976-), 女, 河南洛阳人, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统电压稳定及仿真工作(E-mail: jinhaif_kaicy@yahoo.com.cn);

吴涛(1968-), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统稳定。

Voltage stability after grid-connection of wind farm

JIN Haifeng, WU Tao

(North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: The voltage stability becomes more intricate after the wind farm connects with grid and the main influencing factors are analyzed, such as the load characteristics, connection point selection, reactive power sources and unit characteristics. Several countermeasures are proposed to improve voltage stability and avoid voltage collapse, including the sufficient reactive power compensation, proper power source structure, perfect load shedding schedule and enhanced wind turbine performance. Simulation for a real power system indicates that, the LVRT (Low-Voltage Ride Through) capability of doubly-fed induction generators is critical in the prevention of voltage collapse.

Key words: wind turbine generator; voltage stability; reactive power compensation; doubly-fed induction generator; LVRT