

风电并网对电力系统的影响

张乐丰,王增平

(华北电力大学电气与电子工程学院,北京 102206)

摘要:风速具有波动性和间歇性,导致风力发电具有较强的不确定性。为确保电力系统的安全、稳定运行,研究风电并网对电力系统的影响是非常必要的。介绍了国内外风电发展现状,综述了大型风电场并网对电力系统造成的影响及其补救措施。

关键词:电力系统;可再生能源;风力发电;风电并网;电能质量

中图分类号:TM76

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2011)02-0081-04

随着现代工业的飞速发展和化石能源的日趋枯竭,能源和环境问题日益严峻,风电作为一种可再生的绿色能源,已成为世界上发展最快的可再生能源。我国的电网结构相对薄弱,许多建设或规划中的风电场位于电网薄弱地区或者末端,加之风能本身的随机性和波动性,这些对风电并网是一个巨大的挑战。当风电场的容量较小时,这些特性对电力系统的影响并不明显。随着风电场容量在系统中所占比例的增加,风电场对系统的影响就会越来越显着。因此,必需深入研究这些影响,确保电力系统的安全、稳定运行。本文主要综述大型风电场并网对电力系统稳定、运行成本、调度、电能质量等方面造成的影响以及相应的补救措施。

1 风电发展现状

1.1 国外风电发展概况

基于风力发电的巨大优势,风力发电已经成为当今世界新能源开发利用中技术发展最快、最具商业化开发前景的领域。因此,风力发电日益受到各国政府、企业和用户各方面的关注,特别是大规模的风电并网正在成为一种趋势,新型风电场的容量在电力系统中的比重不断增加,风电场在电力系统中的运行价值日益显现。2009年5月在北京召开的第十二届中国北京国际科技产业博览会上,世界风能协会主席阿尼尔·凯恩介绍:“风能增长率在过去的10年里面达到了年均29%”。预计到2020年,世界风力发电总量将占全球发电能源的12%。全球范围内,欧洲和北美地区的风电容量很高,其风力发电产业处于世界领先地位。在丹麦和德国等地,风电容量在电网中的比重可以达到20%~30%,部分地区甚至达到了50%以上。另外,世界风力发电成本下降迅速,从1983年的15.3美分/(kW·h),下降到1999年的4.9美分/(kW·h)。目前统计数据表明,德国的

收稿日期:2010-10-11;修回日期:2010-11-12

风力发电装机容量居世界第一,美国、西班牙分别列第二、第三位。

1.2 我国风电发展概况

中国具有丰富的风能资源,储量居世界首位。据有关专家测算,我国陆上风力资源有2.5亿kW,海上风力资源有7.5亿kW,合计风能达10亿kW。按照目前国内风电项目平均投资成本计算,每千瓦风电投资大概在1万元。巨大的资源开发潜力,必将造就一个蓬勃兴旺的风能产业。我国的风力发电事业在20世纪80年代开始发展,初期大多是安装在边远地区供农牧民使用并独立运行的百瓦级机组。随着一次能源的不断减少和公众对环境问题的高度关注,可再生的清洁能源越来越受到重视。尤其是最近几年,风电产业发展十分迅速。2007年新装机量达3449MW,在新增市场份额中占17.2%,排世界第五位,目前我国风电装机容量已达到1585万kW。

2 大型风电场并网给系统造成的影响及补救措施

2.1 风电并网对电网稳定性的影响

(1)风电并网对电网暂态稳定性的影响。在风电装机比例较大的电网中,由于改变了电网原有的潮流分布、线路传输功率和整个系统的惯量,因此风电接入后电网的暂态稳定性会发生变化。

如果地区电网足够强壮,则系统发生故障后风电机组在故障清除后能够恢复机端电压并稳定运行,地区电网的暂态电压稳定性便能够得到保证;如果地区电网较弱,则风电机组在系统故障清除后无法重新建立机端电压,风电机组运行超速失去稳定,就会引起地区电网暂态电压稳定性的破坏。此时,需利用风电场或风电机组的保护将风电场或风电机组切除以保证区域电网的暂态电压稳定性;或者通过在风电场安装动态无功补偿装置、及利用变速风电机组的动态无功支撑能力,在暂态过程中及故障后

电网恢复过程中支撑电网电压,保证区域电网的暂态电压稳定。文献[1]基于 PSCAD 仿真分析了在各种不同的无功补偿策略下风机并网及系统故障后并网点、机端电压及风机转速的变化,有助于风电并网电力系统合理采用无功补偿方式。文献[2]结合河南方城风电场实际情况,研究了风电场无功补偿容量的确定以及出口功率因数与转子滑差的关系;仿真分析了风电并网对电网产生的冲击影响。当风电场并网且满发,网内某线路发生三相短路故障时,如果没有将风电场及时切除,则网内主要母线的电压将不能恢复稳定。故障发生时,如果可以将风电场及时切除,则网内各主要节点的电压和主要机组的相对功角将呈衰减振荡,最终趋于稳定。

(2)风电机组低电压穿越能力问题。低电压穿越(LVRT)指在风机并网点电压跌落的时候风机能够保持并网,甚至向电网提供一定的无功功率,支持电网恢复电压,直到电网恢复正常,从而“穿越”这个低电压时间。当风电在电网中所占比例较低时,若电网出现故障,风机就实施被动式自我保护而立即解列,不用考虑故障的持续时间和严重程度,从而最大限度地保障风机安全,这种情况是可以接受的。然而,当风电在电网中所占比例较大时,若风机在系统发生故障时仍采取被动保护式解列方式,则会增加整个系统的恢复难度,甚至可能加剧故障,最终导致系统其他机组全部解列。此时对风电机组必须要求风电机组具有相应的低电压穿越能力,且必须采取有效的低电压穿越措施,以维护风场电网的稳定。文献[3]提出了一种适用于电网不对称故障下网侧变流器控制策略,并将其与直流侧 Crowbar 电路配合,实现电网不对称故障下的低电压穿越。

不同国家和地区所提出的低电压穿越要求不尽相同。在德国北部由于风电比例很高,因此电网运营商对风电场/风力机组的低电压穿越要求较高。如果风电场/风电机组没有低电压穿越能力,则故障发生后风电场切除,风机的转速为零,风电场送出线路上有功功率、无功功率发生震荡最终趋于零。如果风电场具备低电压穿越能力,则故障发生以后风电场仍能给系统提供一定的有功支援,从而对维持整个系统的有功平衡提供支援以帮助电网恢复。

2.2 风电并网对系统运行成本和电网调度运行的影响

(1)风电并网对系统运行成本的影响。风力发电的运行成本与火电机组相比很低,甚至可以忽略不计。但是风力发电的波动性和间歇性使风电场的

功率输出具有很强的随机性,目前的预报水平难以满足电力系统实际的运行需要。为了保证风电并网后系统运行的可靠性,需要在原有运行方式基础上,额外安排一定容量的旋转备用以维持电力系统的功率平衡与稳定。可见风电并网对整个电力系统具有双重影响:一方面分担了传统机组的部分负荷,降低了电力系统的燃料成本,另一方面又增加了电力系统的可靠性成本。文献[4]以美国最近完成的风电项目为例,介绍了一种估算风电成本的简易方法,分析了影响风电成本的主要因素,着重阐明了现代技术在降低成本中的作用。文献[5]在现有排污收费标准和美国环境价值标准的基础上以预防污染发生的代价作为环境成本,对风力发电的环境价值以及风电和火电经济性展开分析研究,结果表明风电具有良好的经济性和广阔的发展前景。

(2)风电并网对电网调度运行的影响。风电接入给电网带来的调度问题及额外备用容量的要求完全是由于风的随机及间歇特性引起的。在风电功率无法预测时,电网必须按比较保守的方案为风电留出足够的备用容量以平衡风电功率的波动;而当风电功率可以预测并且有足够的精度时,将风电功率作为负的负荷叠加到负荷预测曲线上,就可以像传统的电力系统调度方式一样根据预测的负荷与风电功率安排常规机组的发电计划,从而优化发电机组的开机组合,降低整个电网运行的费用。文献[6]提出了火电机组名义环境补偿成本,同时考虑了风电备用容量补偿成本,建立了电力市场环境下的风电机组的环境经济调度模型。为了降低风电接入对电网调度的影响及对备用容量的要求,进行风电功率预测是十分必要和迫切的。文献[7]采用小波分析和人工神经网络结合的方法对风力发电功率短期预测进行研究,通过小波变换将信号分解为不同频段的子序列,利用神经网络对各子序列分别建模预测,最后将预测结果叠加。文献[8]建立了风电功率预测的神经网络模型,分析了实测功率数据、不同高度的大气数据对预测结果的影响,建立了基于神经网络的误差带预测模型,实现了误差带预测。

2.3 风电并网对电能质量的影响

风电场并网运行会在一定程度上影响电能质量。主要包括电压、频率、谐波、电压波动和闪变以及电压暂降等几个方面,其影响程度与风电机组的类型、控制方式、风电场布置、所接入系统的短路容量以及线路参数等诸多因素有关。随着风电场的容量越来越大,这种影响也越来越大。文献[9]从不同方面介绍了风电并网对电能质量的影响。文献[10]

对几种并网技术所带来的电能质量问题的控制策略进行了总结。

(1)频率。风电场与常规电源的最大区别在于其输出功率的间歇性,间歇性波动的风电功率使风电场所接入系统的潮流经常处于一种重新分配的过程,除影响电压外,也在一定程度上影响系统的频率。对一个地区,如果风力发电容量超过地区总装机容量的某一比例,就有必要采取措施,增加调频容量。文献[11]提出了一种用飞轮辅助风力发电的方案,研究了风力发电—飞轮系统功率和频率综合控制方法,建立了相应的 Simulink 仿真模型,用实际风速对飞轮平稳风力发电机输出功率波动、参与电网频率控制进行了仿真。结果表明,在飞轮辅助下,风力发电—飞轮系统可以按要求输出平稳的功率,并且可以像传统发电机组一样参与电网频率控制。

(2)无功电压。电压偏差问题属于电网的稳态问题。大幅度波动的风速引起风电机组出力波动较大,所以风电功率的波动导致电网内某些节点电压偏差超出国家标准规定的限值。这种情况下可以采取在风电场装设一定的无功补偿装置或切除部分风电机组等措施,来改善电压水平或使注入电网的风电功率减少,进而减缓风电注入对系统的影响。另外,加强网架结构、采用具有电压无功控制能力的双馈变速风电机组,都可以更好地改善风电接入地区电网的电压水平与电压稳定性。实际运行过程中,在风电功率波动大、无功需求量大且变化相对较快时,单依靠电容器组快速投切不能满足控制的要求,这时就需要在风电场内安装能够在风速波动时提供快速的无功支撑,有利于电网和风电场的无功电压调节的动态无功补偿装置。文献[12,13]对无功控制的方法进行了研究。

(3)谐波。不论何种类型的风电机组,发电机本身产生的谐波是可以忽略的,谐波电流的真正来源是风电机组中的电力电子元件,谐波干扰的程度取决于变流装置以及滤波系统的结构状况,而且与电网的短路容量以及机组的输出功率有关,即与风速大小相关。对于固定转速风电机组,在持续运行过程中没有电力电子元件的参与,几乎不会产生谐波电流。实际需要考虑谐波干扰的是变速恒频风电机组,就是因为运行过程中变速恒频风电机组的变流器始终处于工作状态。运用 PWM 开关变流器和合理设计的滤波器可以使谐波畸变最小化。文献[14]利用小波变换对电网谐波进行研究,仿真结果表明该方法可以实现有源电力滤波器的谐波检测环节对电力系统的稳态和时变谐波电流进行检测的功能。

(4)电压波动和闪变。风电机组并网运行引起的

电压波动及闪变,源于波动的功率输出。由风速动力特性诱发的有功功率波动取决于当地的风况和湍流强度,频率不定;与此不同,风电机组输出功率的波动主要由风速快变、塔影效应、风剪切、偏航误差等因素引起,其波动频率与风力机的转速有关。固定转速风电机组引起的闪变问题相对较为严重,某些情况下已经成为制约风电场装机容量的关键因素。通常情况下,变速风电机组引起的闪变强度只相当于固定转速风电机组的 0.25%。文献[15]对 IEC 闪变仪进行了仿真,并增加校正环节对闪变测试系统在低频段的输出进行了校正。结果表明校正后的系统在低频段具有较高的精度,能够满足风电并网引起的闪变的测试要求。

(5)电压暂降。风电并网带来的电压暂降通常是由风电机组的突然启动引起的,以感应电机作发电机的固定转速风电机组投入运行时引起的电压暂降较为严重。为了减小风电机组投入操作引起的电压暂降,可以通过风电场中心管理系统来控制风电机组启动时的电压和出力,避免同时投入多台机组。这种控制思想适用于所有类型风电机组的风电场。

文献[16]提出了一种求取含风电场系统电压稳定裕度概率分布的算法。该算法在计算电压稳定裕度与风速之间的灵敏度矩阵的基础上,求取各风电场风速分布的中心距以及各阶半不变量,利用 Gram-Charlier 级数反变换得到电压稳定裕度的概率分布。

2.4 风电并网对其他方面的影响

(1)对网损的影响。风力发电影响系统的潮流分布,又因为电网的损耗主要取决于系统的潮流,因此风力发电的接入必将影响到电网的损耗。风电并网可能增大也可能减小系统网损,这取决于风力发电在系统中的位置、容量与负荷量的相对大小以及网络的拓扑结构等因素。

(2)对继电保护的影响。风电并网对线路保护灵敏度和保护范围也会产生影响。如果一个风力发电机接在距线路末端 X 处,当线路末端发生短路故障后,它将向故障点送出短路电流,减小了线路保护 K 检测到的故障电流值,从而降低了保护 K 的灵敏度。如图 1 所示。

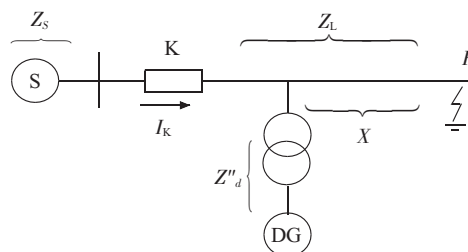


图 1 本线路故障时风力发电对保护的影响

在线路的某些位置,速断保护根本无法启动,形成速断保护死区,使线路故障不能及时切除。若风力发电并网位于速断保护死区,在不改变保护系统的情况下,只能由后备过流保护动作切除故障,增加了故障对电网的影响。若调减速断保护整定值,则可能造成速断、过流保护和其他控制装置之间无法协调,导致保护误动作。文献[17]以一个实例探讨风电场接入电网后系统继电保护配置的原则。风电场接入系统,系统继电保护的配置应根据所接入系统的电网结构,接入风电场的规模,通过细致的计算分析来决定。

文献[18]仿真模拟了输电线路发生三相接地故障时风电场的短路电流,与没有风电场时输电线路发生三相短路相对比,分析了风电场接入后保护的动作为,指出了应改变相应继电保护及安全自动装置的配置以提高保护动作的可靠性。

3 结束语

(1) 近年来,虽然我国风电发展迅速,但是风力发电量占总发电量的比例仍然很小。应投入更多的精力来研究和大规模并网型风电场,以满足经济发展和改善环境的需要。

(2) 风电并网给系统带来很多问题,对电网规划、运行、保护等各方面提出了新的要求。应加强技术研发,不断开发新型的电力电子元件,最大限度地降低风电并网给系统带来的不利影响。

(3) 优化电网结构、采用无功补偿装置、完善对风电接入点的监测都是改善风电并网运行状况的有效措施。

参考文献:

- [1] 李义岩,袁铁江,晁勤.基于PSCAD风电并网电力系统无功补偿策略研究[J].低压电器,2009(19):12-15.
- [2] 田春笋,李琼林,宋晓凯.风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J].电力系统保护与控制,2009,37(19):46-51.
- [3] 赵紫龙,吴维宁,王伟.电网不对称故障下直驱风电机组低

- 电压穿越技术[J].电力系统自动化,2009,33(21):87-91.
- [4] 伊雪峰,姚兴佳.风电成本及影响因素分析[J].农村能源,1996(1):30-32.
- [5] 俞海森,周海珠,裴晓梅.风力发电的环境价值与经济性分析[J].同济大学学报,2009,37(5):704-707.
- [6] 袁铁江,晁勤,吐尔逊·伊不拉音,等.电力市场环境下含风电机组的环境经济调度模型及其仿真[J].电网技术,2009,33(6):67-71.
- [7] 王丽婕,冬雷,廖晓钟,等.基于小波分析的风电场短期发电功率预测[J].中国电机工程学报,2009,29(28):30-33.
- [8] 范高锋,王伟胜,刘纯,等.基于神经网络的风电功率预测[J].中国电机工程学报,2008,28(34):118-123.
- [9] 高玉洁.风电场接入电网后的电能质量问题分析[J].南方电网技术,2009,3(4):68-72.
- [10] 张国新.风力发电并网技术及电能质量控制策略[J].电力自动化设备,2009,29(6):130-133.
- [11] 孙春顺,王耀南,李欣然.飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J].中国电机工程学报,2008,28(29):111-115.
- [12] 朱凌志,陈宁,王伟.兼顾接入地区无功需求的风电场无功控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(5):80-85.
- [13] 陈海焱,陈金富,段献忠.含风电机组的配网无功优化[J].中国电机工程学报,2008,28(7):40-45.
- [14] 苏义鑫,周阳宁,陈敏.小波变换在电力系统谐波检测中的应用[J].中国水运,2009,19(2):101-102,106.
- [15] 赵海翔,陈默子,戴惠珠.风电并网引起闪变的测试系统仿真[J].太阳能学报,2005,26(1):28-33.
- [16] 王海超,戴剑锋,周双喜,等.含风电场电力系统电压稳定裕度模型[J].清华大学学报,2006,46(7):1185-1188.
- [17] 梁玉枝,崔树平,王冬梅.对风电场接入电网后系统继电保护配置的探讨[J].华北电力技术,2009(9):1-4.
- [18] 聂宗铭,余洋.恒速恒频风电场并网对现有继电保护的影响分析[J].电力科学与工程,2009,25(7):12-15.

作者简介:

- 张乐丰(1986-),男,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化;
- 王增平(1964-),男,河北辛集人,教授,主要从事微机保护、变电站综合自动化等方面的研究工作。

Influences of Wind Power Integration on Power System

ZHANG Le-feng, WANG Zeng-ping

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Due to the features of being fluctuant and intermittent of wind speed, wind power generation has great uncertainty. In order to ensure the safety and stability of power system, it is very necessary to study the influences of wind power integration on power system. The situation at home and abroad of wind power is introduced, and the summaries of the influences of large-scale wind farms integration on power system and the remedial measures are also proposed in this paper.

Key words: power system; renewable energy; wind power generation; wind power integration; power quality