

高密度风电接入地区电压波动因素分析与研究

常喜强¹ 樊艳芳² 钟 显² 段天元² 李泽燃² 张 锋¹

(1. 国网新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002;

2. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 依托新疆哈密地区网架结构, 针对高密度风电、光伏等新能源接入后哈密地区电网无功电压波动问题, 基于风电有功出力随机变化、大规模风电及光伏脱网、电铁冲击负荷变化以及动态无功补偿装置(SVC) 控制不协调等因素, 仿真分析哈密地区电网电压的波动情况, 诊断高密度风电接入地区无功电压存在的风险, 并提出改善电压波动的措施。研究结果阐明风电送出点短路容量偏小, 风电出力波动易造成电压波动越限; 动态无功补偿装置(SVC) 控制不协调易引起弱风电送出系统振荡。因此, 通过高密度风电接入地区电压运行风险分析, 对提高高密度风电接入地区电压稳定水平及减小对风机脱网的影响具有一定的参考价值。

关键词: 高密度风电; 光伏; 电气化铁路; SVC; 间歇性能源; 电压波动

Abstract: Depending on grid structure in Xinjiang Hami and aiming at the reactive and voltage fluctuation problems in the region with the access of high density wind power, solar and other new energy, the voltage fluctuations in Hami region are analyzed and the reactive voltage risk in high density wind region is diagnosed, based on the factors such as the random change of active wind output, the large-scale wind power and photovoltaic tripping, the shock load change of electrified railway and the control incoordination of dynamic reactive power compensation device (SVC). Then, the measures to improve the voltage fluctuations are proposed. The research results show that the short-circuit capacity of wind power at sending point is too small, and the wind power output fluctuations could easily make voltage fluctuations exceed the limit. And the incoordination of dynamic reactive power compensation device makes the weak wind power system swing. Therefore, the factor analysis for voltage fluctuations in the high density wind region will provide a reference for improving the voltage stability and reducing the impact on wind turbine generator tripping.

Key words: high density wind; photovoltaic; electrified railway; static var compensator (SVC); intermittent energy; voltage fluctuation

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)06-0005-05

0 引 言

近年来, 大规模间歇性能源(如风电、光伏等) 集中接入电网, 并网后给大电网的稳定、运行带来极大的挑战, 尤其是对系统电压波动的影响。一方面, 风力发电场(或光伏电站) 会吸收过多的无功功率, 冲击性负荷(如电铁) 易产生电压不平衡、谐波, 如不采取相应的控制措施, 可能对电网的电压稳定造成影响; 另一方面, 动态无功补偿装置的协调控制问题也极易造成电压的波动^[1-4]。

目前, 针对间歇性能源并网引起电压波动问题, 主要集中于理论方面进行了初步研究。文献[5-6]考虑稳态下的风电场波动, 未考虑故障的暂态过程对电压

波动影响; 文献[7-8]考虑含有光伏的电网中, 研究了光伏的不确定性和无功优化协调控制策略对电压波动的影响, 但未考虑多种间歇性能源的交互影响; 文献[9]分析风电与电铁牵引负荷集中接入地区电网的交互影响, 提出电铁牵引站装设 SVC 装置有效改善电压的波动; 文献[10-11]针对大规模并网风电场电压稳定问题, 分析了 SVC 的控制策略研究、振荡机理, 且以并网风电和电网交换功率为控制目标进行 SVC 的协调控制, 改善电压波动。

可见, 现有研究主要依托于单一间歇性能源, 提出了一系列改善电压稳定的措施。对于含有多种间歇性能源集中接入地区, 电网运行本身存在一定的复杂性, 尤其是在高密度风电地区, 光伏、电铁等间歇性能源共存, 对高密度风电地区电压波动问题则

需进一步的探讨研究。

依托新疆哈密地区网架结构,该地区形成了哈密北、十三间房及哈密南三大风电集群区域。针对高密度风电地区电网无功电压波动问题,考虑风电有功出力变化、风机及光伏大规模脱网、电铁冲击负荷及动态无功补偿装置(SVC)控制不协调等因素,仿真分析不同因素对该地区电压波动的影响,诊断该地区无功电压存在的风险,并提出改善电压波动的措施,对提高高密度风电接入地区电压稳定水平有一定的参考价值。

1 哈密高密度风电地区电网规模

1.1 哈密高密度风电地区网架结构

根据 2014 年新疆电网建设,哈密地区网架结构已形成含有 ± 800 kV、750 kV、220 kV 电压等级的主网架,其中 110 kV、35 kV 电压等级构成覆盖该地区的输、配电网络。并且, ± 800 kV 哈郑(天中)特高压直流、750 kV 新疆与西北主网联网一、二通道及哈密高密度风电,构成了疆电外送的送端电网,图 1 为哈密局部电网示意图。

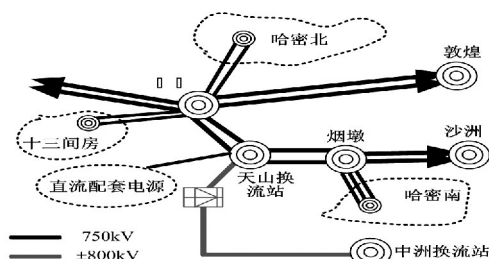


图 1 局部电网示意图

1.2 哈密高密度风电地区电源规模

如图 1 所示,目前哈密地区高密度风电汇集于哈密北、十三间房及哈密南三大风电集群区域。依托直流配套电源建设,截至 2014 年年底,哈密地区风电总装机容量达 7 580 MW,并在哈密东南部地区形成大规模的光伏并网,光伏总装机容量达 970 MW,哈密南部地区天山换流站直流配套电源火电 6 台机组将在 2014 年年底陆续投入运行,哈密地区火电总装机容量达 4 850 MW。图 2 为哈密地区电源装机容量。

2 电压运行波动机理分析

电压波动主要取决于系统的短路容量以及系统

无功的动态补偿容量。在网架结构及规划电源都已确定前提下,为了适应风电出力波动对电压的影响,需要风电场配置动态无功补偿(SVC 或 SVG)并跟踪风电出力的变化进行无功调控,同时,辅以主网无功控制手段的协同动作,进而将风电出力变化对电压波动的影响降到最低。

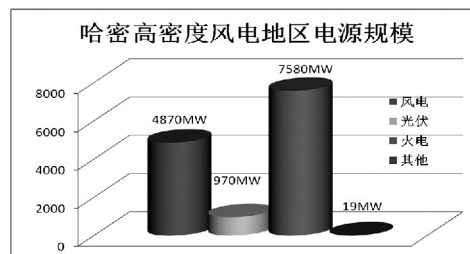


图 2 哈密地区电源规模

2.1 短路容量对电压运行波动分析

短路容量是指电力系统在规定的运行方式下,关注点三相短路时的视在功率,它是表征电力系统供电能力强弱的特征参数,其大小等于短路电流与短路处的额定电压的乘积,即

$$S_{sc} = \sqrt{3} U_{av} I_{sc} \quad (1)$$

从式(1)可知,短路容量与电力系统的运行方式有关,并且反映了该点的某些重要性能:①该点带负荷的能力和电压稳定性;②该点与电力系统电源之间联系的强弱;③该点发生短路时,短路电流的水平。随着电力系统容量的扩大,系统短路容量的水平也会增大。

根据《电能质量——电压波动与闪变》标准,电压波动 d 定义为

$$d = \frac{\Delta U}{U_N} \quad (2)$$

式中, ΔU 电压方均根值曲线上相邻两个极值电压之差; U_N 为系统的标称电压。

当已知三相负荷的有功和无功功率的变化量分别为 ΔP_i 与 ΔQ_i 时,电压波动 d 为

$$d = \frac{R_L \Delta P_i + X_L \Delta Q_i}{U_N^2} \quad (3)$$

式中, R_L 、 X_L 为电网阻抗的电阻、电抗分量。在高压电网中,一般 $R_L \ll X_L$, 则

$$d = \frac{\Delta Q_i}{S_{sc}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, S_{sc} 为考察点(较小方式下)的短路容量。由式(4)可见,系统的短路容量越大,电压损失越小,更利于电压的稳定;由于计算短路容量时,电压选取等

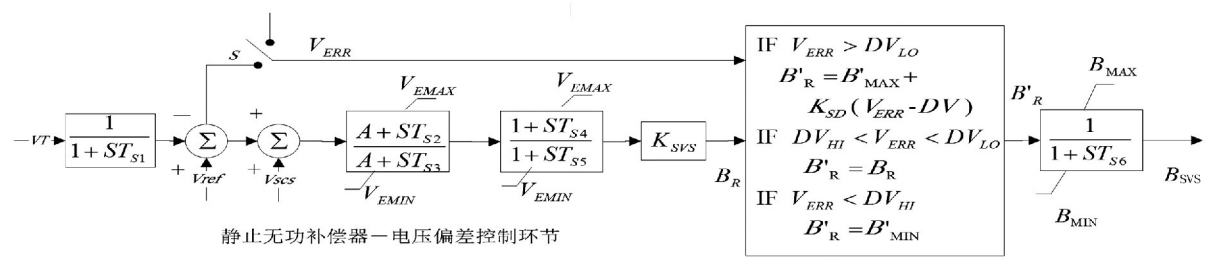


图 3 模拟 SVC 外特性的数学模型框图

级为线路平均电压,由式(1)、式(4),系统的短路容量水平取决于系统的短路电流水平。

2.2 SVC 控制不协调对电压波动分析

动态无功补偿 SVC 具有吸收和发出无功电流的能力,用于提高电力系统的功率因数,稳定系统电压,抑制系统振荡等功能。模拟 SVC 外特性的通用静止无功补偿器模型,如图 3 所示。

图 3 中 K_{SIS} 为连续控制比例增益系数, K_{SD} 为间断控制比例增益系数。电压偏差 DV 是连续控制和间断控制的电压变化门槛值。 $DV = 0$, 为连续控制; $DV > 0$, 为间断控制,如果不考虑连续控制可用将 $DV = 0$ K_{SIS} 很大,或 DV 设为很小的值。在应用 SVC 仿真中发现,控制增益设置及多个 SVC 之间的协调控制是功率振荡的重要原因,进而引起电压的波动。

3 仿真分析

根据 2014 年新疆哈密高密度风电地区网架结构,针对高密度风电、光伏等间歇性电源接入后哈密地区电网无功电压波动问题,基于电压波动机理,考虑风电有功出力随机变化、风电及光伏大规模脱网、电铁冲击负荷变化以及动态无功补偿装置(SVC)控制不协调等因素,仿真分析哈密地区电网电压的波动情况。

3.1 短路容量引起电压波动分析

利用 PSASP 仿真可知哈密地区部分风电汇集母线短路电流如表 1 所示。

由于三塘湖麻黄沟东最小短路容量为 900 MVA,而麻黄沟地区的风电装机容量已经达到了 650 MW,短路比不到 1.4,属于极弱电网,不利于风电上网稳定运行,在如此小的短路电流之下,风电出力波动必将引起接入厂站较大的电压波动。

3.2 风电有功出力随机变化对电压影响

哈密北部地区麻黄沟西变电站,汇集接入的电

场由于风速变化发生 100 MW 的功率波动时,220 kV 麻黄线功率曲线和麻黄沟西电压变化的仿真曲线如图 4 所示。

表 1 风电场汇集母线短路电流

220 kV 母线名称	最小短路 /kA	短路容量 /MVA
麻黄沟西	1.89	753
麻黄沟东	2.26	900
山北	5.02	2 000
淖毛湖	1.92	765
十三间房	1.67	665
三道岭	3.64	1 450
石城子	5.01	1 996
思甜	4.96	1 976
烟墩北	3.37	1 342

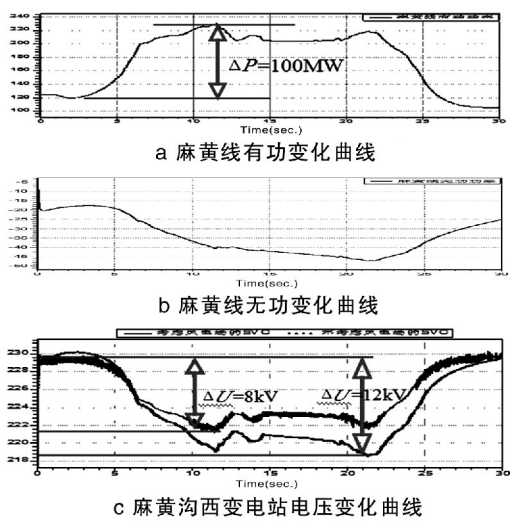


图 4 麻黄沟西有功变化引起电压波动

从图 4 可以看出,当麻黄沟西接带汇集接入的风电场因为风速变化引起出力变化超过 100 MW 时,不考虑 SVC 作用时造成 12 kV 的电压波动。考虑 SVC 作用后造成 8 kV 的电压波动。SVC 有效地抑制了电压波动的幅度,但是从图中可以看出 SVC 参与调节后,麻黄沟西变电站的 220 kV 母线电压出现了轻微的振荡现象。

3.3 大规模风电、光伏脱网对电压影响

风电、光伏通过换流器并网,当电网发生扰动,出

于换流器的电力电子器件安全等考虑,风电、光伏自身的保护往往将电力切除,给电网带来一定程度扰动,尤其是并网规模的增大,这种扰动将给电网运行带来更大的运行风险。按照不同运行工况下,当风电机组、光伏电源脱网容量分别为:工况1脱网437 MW、工况2脱网733.6 MW、工况3脱网1 040.6 MW,分别仿真3种脱网工况对系统220 kV电压的影响,仿真结果如图5所示。

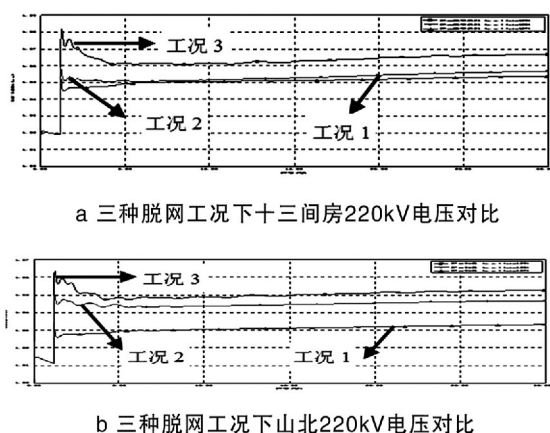


图5 大规模风电、光伏脱网电压波动

由仿真结果图5(a)、(b)可知,随着新能源脱网容量的逐渐增大,母线电压的攀升幅度也依次增大。当新能源脱网437 MW时,十三间房220 kV母线电压超过220 kV电压上限242 kV;随着脱网容量的逐渐加大,当脱网达到1 040 MW时,十三间房、麻黄沟以及山北220 kV母线电压幅值都已增大,并超过242 kV电压上限,给电网设备安全带来隐患;对比分析不同程度的脱网可知,哈密地区新能源脱网地区电网潮流较轻,充电无功增大,哈密电网220 kV母线电压增长幅度较大,近区750 kV母线电压影响较小。

3.4 电铁冲击负荷对电压影响

目前哈密地区中西部的220 kV十三间房变电站接带了3个牵引站(黑山牵引站、了墩牵引站、红台牵引站)。仿真时每个牵引站考虑接带20 MW的冲击负荷,功率因数为0.9。负荷设置为:列车驶入时该供电段时负荷先由0 MW逐步上升到20 MW,列车驶出该供电段时负荷从20 MW逐步下降到0 MW。该冲击负荷下220 kV十三间变电站和石城子变电站电压曲线如图6所示。

从图6可以看出,电气化铁路负荷(每个牵引站20 MW)的变化引起该变电站电压波动约4 kV。

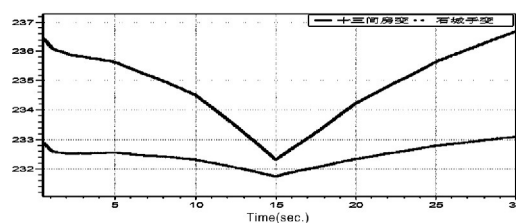


图6 电铁冲击负荷对电压影响

3.5 动态无功补偿装置控制不协调对电压影响

电压波动主要取决于系统的短路容量、系统的动态补偿容量。为了适应风电出力波动对电压的影响,需要风电场配置动态无功补偿(SVC或SVG)并跟踪风电出力的变化进行无功调控。根据SVC运行情况,针对单个SVC和多个SVC运行进行仿真,仿真结果如图7所示。图7(a)所示为控制增益 $K_{SES}=5$ 时,为典型设置;图7(b)所示为多个SVC之间的协调控制时,控制增益 K_{SES} 远大于典型值时,引起系统振荡功率,进而引起电压的波动较大。

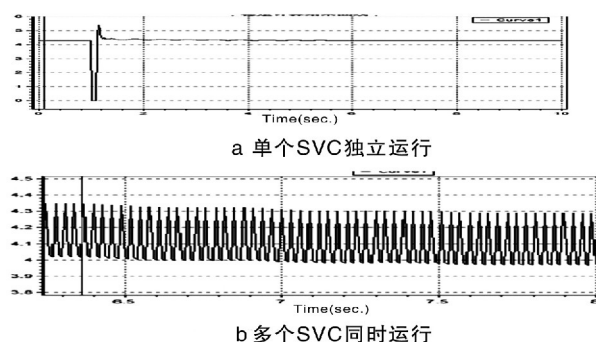


图7 无功补偿装置控制不协调对电压影响

4 改善电压波动的相关措施

根据上述仿真分析可知,短路电流偏小的情况下,风电有功出力的随机波动、大规模新能源的脱网以及无功装置控制不协调极易引起高密度风电地区电压的波动。因此,可采取如下措施改善电压波动问题。

(1) 针对风电场有功随机变化对电压的影响,加强风电场有功功率控制管理,确保风电场有功每分钟变化率满足《风电场接入电网技术规定》的要求,即装机容量30~150 MW风电场有功功率每分钟有功变化不超过装机容量的20%;

(2) 针对高密度风电地区短路容量偏小的问题,提高该地区短路容量,加强网架机构建设,提升哈密地区风电消纳能力;

(3) 针对动态无功补偿装置(SVC),一方面确保风电场动态无功补偿装置的可用度和动态响应能力,开展风电机组、风电场内动态无功补偿、电网无功补偿装置综合协调控制研究,统一控制策略,协调控制,避免在弱风电送端系统产生功率振荡;另一方面,开展动态无功补偿装置建模工作,通过仿真计算合理确定设置相关控制参数,将动态无功补偿装置纳入哈密地区无功电压控制综合协调系统中,实现动态无功补偿装置之间在站间、区域内的协调控制。

5 结 论

通过对哈密高密度风电地区无功电压影响分析,可得出如下结论。

(1) 哈密高密度风电地区由于接入大规模风电、光伏、电气化铁路,引起该地区电压波动的主要因素有风电有功出力的随机变化、规模化新能源脱网、电铁冲击性负荷及 SVC 控制不协调;

(2) 由于哈密高密度风电地区接入风电、光伏以及电气化牵引站的厂站多处于电网末端(十三间房、山北地区),网架结构较薄弱,短路电流偏小;并且在外界电压因素扰动下,由于电网调节能力有限,极易造成电压波动超限(超过 11 kV);

(3) 针对改善高密风电地区电压波动问题,一方面,由于短路电流偏小,可加强风电场有功功率控制管理,确保风电场有功每分钟变化率满足《风电场接入电网技术规定》的要求;另一方面,由于动态无功补偿装置(SVC)参数设置不合理及控制不协调,造成系统功率振荡,进而引起电压波动问题,可进一步采取仿真建模研究,确定相关合理的参数,协调多个 SVC 之间控制的同时,与哈密地区无功控制系统相协调,实现站间、区域内的电压稳定控制。

因此,针对高密度风电接入地区,分析该地区风电、光伏、电铁及动态无功补偿装置(SVC)等因素对电压的影响,对提高高密风电地区电压稳定及减小风机脱网具有一定的应用研究价值。

参考文献

- [1] 陈昌松,段善旭,蔡涛,等.基于模糊识别的光伏发电短期预测系统[J].电工技术学报,2011,26(7):83-89.
- [2] CAI Xia-wang, ZONG Xiang-lu, YING Qiao. A Consideration of the Wind Power Benefits in Day-ahead

Scheduling of Wind-coal Intensive Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(1):236-245.

- [3] 孙元章,吴俊,李国杰.风力发电对电力系统的影响[J].电网技术,2007,31(20):55-62.
- [4] 赵争鸣,雷一,贺凡波,等.大容量并网光伏电站技术综述[J].电力系统自动化,2011,31(12):101-107.
- [5] 张永武,孙爱民,张源超,等.风电无功补偿容量配置及优化运行[J].电力系统及其自动化学报,2012,23(6):150-156.
- [6] Muhammad Jafar, Marta Molinas. A Transformer Less Series Reactive/Harmonic Compensator for Line-commutated HVDC for Grid Integration of Offshore Wind Power[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronic, 2013, 60(6):2410-2419.
- [7] Ruifeng Yan, Saha, T. K. Voltage Variation Sensitivity Analysis for Unbalanced Distribution Networks Due to Photovoltaic Power Fluctuation[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2012, 27(2):1078-1089.
- [8] Yashodhn P. Agalgaonkar, Bikash C. Pal, Rabih A. Jar. Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous Regulators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):182-192.
- [9] 张新伟,晁勤,常喜强,等.风电场与电气化铁路集中接入地区电网稳定性研究[J].电力系统自动化,2011,33(1):62-65.
- [10] 赵欣,高山,张宁宇. SVC 接入位置对次同步振荡的影响机理与 SVC 控制策略研究[J].中国电机工程学报,2013,33(25):107-114.
- [11] 赵利刚,房大中,孔祥玉,等.综合利用 SVC 和风力发电机的风电场无功控制策略[J].电力系统保护与控制,2012,40(2):45-53.

作者简介:

常喜强(1976),高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制;

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,微电网稳定控制研究;

钟显(1989),硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

段天元(1989),硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

李泽燃(1988),硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

张锋(1978),工程师,研究方向为电力系统分析与控制。

(收稿日期:2014-08-19)