含大规模风电电网的静态电压仿真分析

时 锐, 焦 然, 陈艳霞
(国网北京电科院, 北京 100075)

摘要: 电压水平是衡量电能质量的重要指标。随风电场容量日益增加,风电接入电网的规模不断扩大,风电并网的电压问题也逐渐暴露出来。文中利用电力系统分析综合程序(power system analysis software package, PSASP),对不同运行方式下的甘肃电网进行了潮流计算,根据给出的电压调节原则和手段对研究区域110 kV及以上等级越限母线电压进行了调节。在此基础上,通过改变玉门地区风电集群的有功出力研究了其对于系统静态电压的影响,并对出现这种影响的原因进行了分析。

关键词: 风电集群; 静态电压; 电压调节; 潮流计算; PSASP
中图分类号: TM734 **文献标志码**: A **文章编号**:1001-1609(2014)12-0105-06

Static Voltage Simulation Analysis of Grid with Large-scale Wind Power

SHI Rui, JIAO Ran, CHEN Yanxia
(State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: Voltage level is an important indicator to measure power quality. With the expanding scale of wind power and its increasing capacity, voltage problems caused by wind power integration have been gradually exposed. In this paper, PSASP (power system analysis software package) is used to calculate the power flows of Gansu Grid indifferent operating modes and regulate the grade-limit voltage of 110 kV and above voltage levels in a specific study area. On this basis, study the impact on system static voltages by changing the wind farm output in Yumen area and then analyze the reasons.

Key words: wind power cluster; static voltage; voltage regulation; power flow calculation; PSASP

0 引言

电压是衡量电能质量的重要指标。电压偏高,线路的充电功率过大;电压偏低,系统一旦受到大的扰动,极易发生电压崩溃事故,严重时可能波及整个电网。因此,通过合理地调节使电压保持在合理的范围之内,才能保证系统的稳定和安全[1]。近年来,随着风电容量在电网的比例迅速增加, 风力发电机组单机容量日益增大, 并网系统的电压问题也逐渐暴露出来。

电力系统的稳定性问题一直是研究的热点。早期,稳定性的研究主要集中在功角稳定性方面。近年来,电压失稳或崩溃事故的不断出现,使电压稳定性特别是静态电压稳定性问题的研究受到了高度重视。研究的方向包括探索电压崩溃的机理、建立尽可能反映电力系统实际的数学模型, 以及加强电力系统电压稳定性和安全性等[2-3]。风电大规模接入电网也使得其对电网静态电压的影响越来越受到关注。

文中利用 PSASP 软件对 2011 年冬季最大运行方式和冬季最小运行方式下的甘肃电网进行了潮流计算,并对酒泉、嘉峪关以及张掖地区的 110 kV 及以上电压等级的越限母线电压进行了调节。在此基础上, 对玉门地区风电集群出力变化对母线电压的影响进行了仿真分析, 旨在能为甘肃电网的安全稳定运行提供一定的指导。

1 仿真软件及电压调节

1.1 PSASP 概述

电力系统分析综合程序 (power system analysis software package, PSASP) 是由中国电力科学研究院研发的,具有高度集成性、开放性和自主知识产权的

收稿日期:2014-06-11; **修回日期**:2014-07-13

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

大型软件包。PSASP 使用方便、功能强大。它的功能主要有稳态分析、故障分析和机电暂态分析。稳态分析包括潮流分析、网损分析、最优潮流和无功优化、静态安全分析等。故障分析包括短路计算、复杂故障计算及继电保护整定计算。机电暂态分析包括暂态稳定计算、电压稳定计算、控制参数优化等[4]。

文中主要利用了 PSASP 潮流计算的功能。电力系统常规潮流计算是根据给定的网络结构及运行条件,求出整个网络的稳态运行状态,其中包括各母线的电压、网络中的功率分布以及功率损耗等[5]。

1.2 电压调节的原则和手段

电力系统的运行电压水平取决于无功功率的平衡,系统的无功电源充足,系统的电压才能维持在较高的水平。同时,系统还必须配置一定的无功备用容量,以保证运行可靠性和适应无功功率的增长。

无功功率的流动会引起有功功率的损耗，因此无功功率不适宜长距离传输，负荷所需的无功功率应该尽量分层分区就地平衡；通过控制电压中枢点的电压偏移来保证系统中的大部分电压处于合理的范围之内。这是电压调节通常要遵循的原则[6]。

电压调节的手段通常有[6]:借改变发电机端电压调压、借改变变压器的变比调压以及借补偿设备调压。

文中电压调节主要是通过调节负荷的功率因数和投切无功补偿装置来实现的，调节的原则是将负荷的功率因数调整到 0.95 及以上,110~330 kV 电压等级母线电压标幺值不低于下限 0.9,不高于上限 1.0。

2 调压仿真及分析

2.1 甘肃电网概况

甘肃电网地处于西北电网的中心位置，向东通过 2 回 750 kV 线路和 4 回 330 kV 线路与陕西电网联网，往西通过 4 回 750 kV 线路和 6 回 330 kV 线路与青海电网联网,往北通过 2 回 750 kV 线路和 5回 330 kV 线与宁夏电网联网，还通过 2 回 750 kV 线路与新疆电网联网。甘肃电网网架结构狭长，它以 750 kV 电压等级为主网架,并通过 330、220、110、35 kV 电压等级向下一级分区、分片供电,同时也接受下一级电网多余电力的送出[7-15]。

2.2 甘肃 2011 年冬大运行方式调压算例

甘肃 2011 年冬大方式:甘肃地区总有功发电量 18 353.019 MW,总有功负荷 13 641.77 MW;总无功发电量 4 375.147 Mvar，总无功负荷 5 830.147 Mvar;有功输出 4 428.279 MW，无功输出–3 560.6 Mvar (即无功输入 3 560.6 Mvar)。

对嘉酒(嘉峪关—酒泉)地区和张掖地区的电压越限母线进行调节,110 kV 及以上的越限母线电压、调节措施及调节后的电压见表 1。由表 1 可见,经过上述调节,各母线电压合格。

表 1 110 kV 及以上电压等级越限母线电压调节

Tab. 1 Regulation of over-limit voltages of 110 kV and above grades

母线名	电压标幺值/p.u.		调节措施
	调节前	调节后	
甘酒泉热电变电站 330 kV 侧	1.012 85	0.985 53	在甘酒泉变电站 330 kV 侧切三组容量为 90.000 00 Mvar 的电容。
甘酒张变电站 330 kV 侧	1.012 80	0.981 01	
甘酒泉变电站 330 kV 侧	1.012 85	0.980 99	
甘青羊沟变电站 110 kV 侧	1.024 94	1.000 00	
甘嘉峪关变电站 330 kV 侧	1.008 90	0.978 32	在甘嘉峪关变电站 35 kV 侧切两组容量为 15.000 00 Mvar 的电容,投入一组容量为 20.000 00 Mvar 的电抗; 在甘嘉峪关变电站 10 kV 侧切三组容量为 10.000 00 Mvar 的电容,投入一组容量为 20.000 00 Mvar 的电抗。
甘昌西变电站 330 kV 侧	1.007 12	0.976 35	
甘玉门变电站 330 kV 侧	1.006 98	0.976 21	
甘酒热变电站 330 kV 侧	1.005 97	0.978 41	
甘酒钢变电站 330 kV 侧	1.005 94	0.977 07	
甘大唐风变电站 110 kV 侧	1.002 99	0.972 35	甘酒张变电站 330 kV 侧投入一组容量为 60.000 00 Mvar 的电抗。
甘三十里井变电站 110 kV 侧	1.001 66	0.971 04	
甘山丹变电站 110 kV 侧	0.898 00	0.917 24	将甘山丹变电站所连负荷由 211.207 8+j108.235 4 MW/Mvar 调整为 211.207 8+j70 MW/Mvar。

2.3 甘肃 2011 年冬小运行方式调压算例

甘肃 2011 年冬小方式:甘肃地区总有功发电量 6 804.394 MW,总有功负荷 7 936.838 MW;总无功发电量 1 959.669 Mvar，总无功负荷 3 463.971 Mvar;有功输出–1 225.333 MW (即有功输入 1 225.333 MW),无功输出–3 075.114 Mvar(即无功输入 3 075.114 Mvar)。

由潮流结果可知，冬小运行方式下所研究区域 110 kV 以上电压等级满足要求，甘北工业园变电站 110 kV 侧 (电压标幺值为 0.889 0) 及甘嘉峪关变电站 110 kV 侧(电压标幺值为 0.889 0)电压偏低,不满足条件。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

冬小运行方式电压调节同样遵循冬大运行方式电压调节的原则。在甘嘉峪关变电站 35 kV 侧投入一组容量 15.000 00 Mvar 的电容，甘北工业园变电站 110 kV 侧电压标幺值恢复为 0.911 21，甘嘉峪关变电站 110 kV 侧电压标幺值恢复为 0.911 2，调整后电压满足要求。

3　风电集群有功出力对静态电压的影响

3.1　风电大规模接入对电压的影响

在大规模风电接入电力系统的情况下，导致电网电压稳定性降低的主要原因是风电场对无功功率的需求。由于风电场并入电网，改变了配电网的潮流分布和功率流向，会使得风电场周围一些局部电网电压以及联络线上的功率超出安全运行的范围。另外，风速的随机性和间歇性也会对电力系统稳定运行，尤其是电压稳定运行产生危害。

甘肃电网风电比较集中，大规模的风电接入对嘉酒电网的西部影响较大，使得嘉酒电网电压波动较大[7]。研究区域单线图见图 1。该部分的研究是在第 3 部分电压调节合格的基础之上进行的。

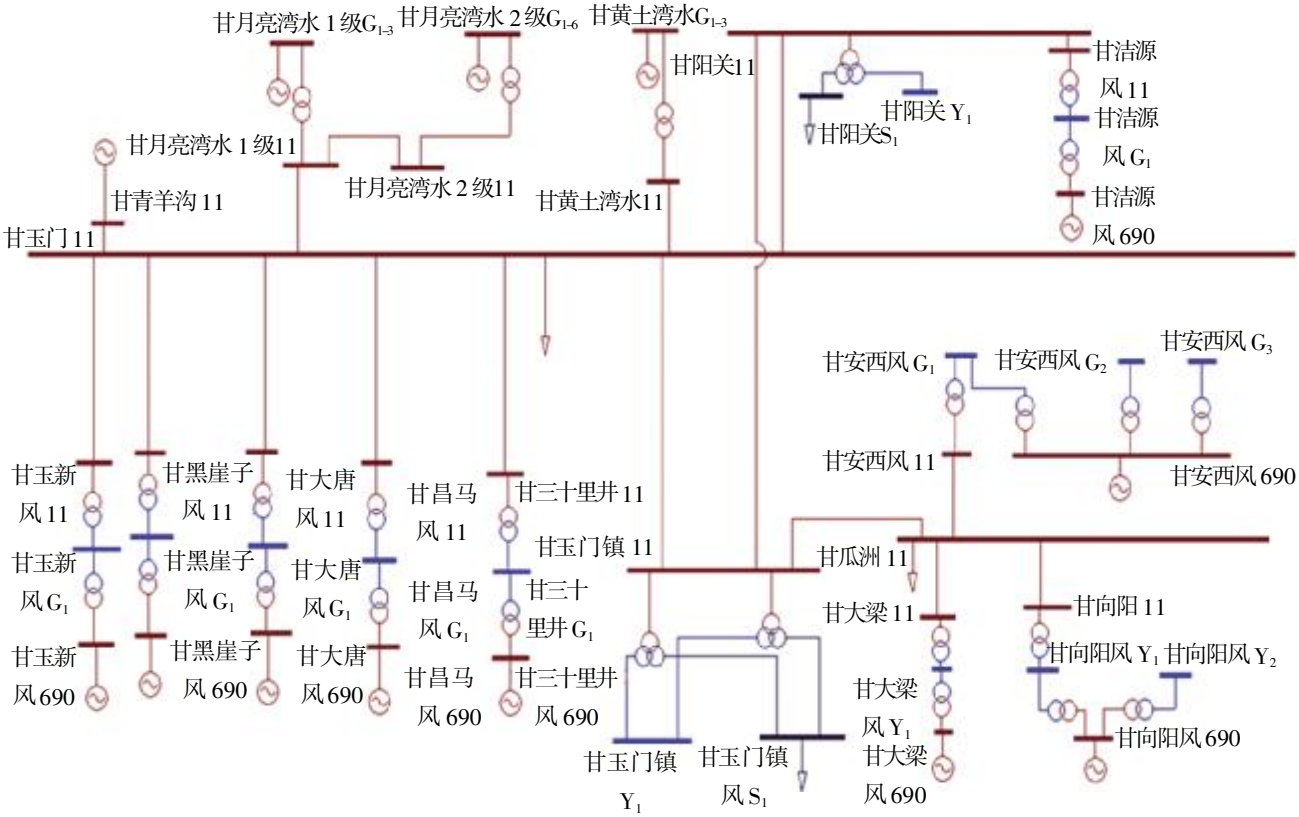


图 1　研究区域单线图

Fig. 1　Single-line diagram of the study area

3.2　甘肃 2011 年冬大运行方式算例

3.2.1　风电场出力数据

冬大运行方式下所研究的风电场有功出力如下：甘玉新风电场有功出力 10 MW(额定出力 495 MW)、甘黑崖子风电场有功出力 10 MW(额定出力 48 MW)、甘大唐风电场有功出力 70 MW(额定出力 201 MW)、甘昌马风电场有功出力 70 MW(额定出力 201 MW)、甘三十里井风电场有功出力 60 MW(额定出力 1005 MW)。

3.2.2　仿真结果

下面改变风电场的出力分别为 0、额定出力(总额定出力 600 MW)的 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70%、75%。风电场出力继续增加，当风电场有功出力为 450 MW 时，各母线电压普遍偏低。此时，投入一定的无功补偿装置(甘安西变电站 10 kV 侧投一组容量 4 Mvar 电容，甘瓜州变电站 35 kV 侧投两组容量 5 Mvar 电容，甘玉门变电站 35 kV 侧投两组容量 20 Mvar 电容、甘嘉峪关变电站 35 kV 侧投一组容量 15 Mvar 电容)，以期能进一步增加风电场的有功出力。

根据仿真结果，以风电场的有功功率输出(MW)为横坐标，电压的标幺值(p.u.)为纵坐标，作出各母线电压随风电场有功功率输出的曲线见图 2。

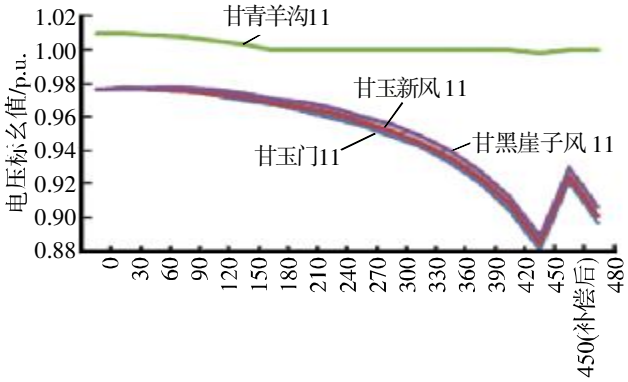
3.2.3　结果分析

由图 2 可以看出：

1)风电场投入初期随有功出力的增加，母线电压升高；风电场有功出力增加到一定值，随有功出力的增加，母线的电压逐渐降低且降低的速度逐渐加快。

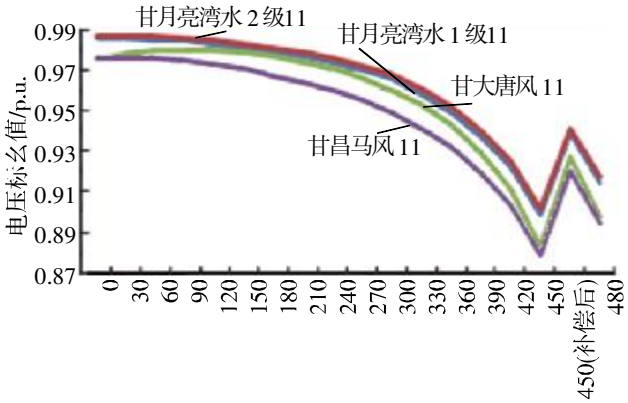
2)风电场有功出力增加到 450 MW 时，各母线

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn



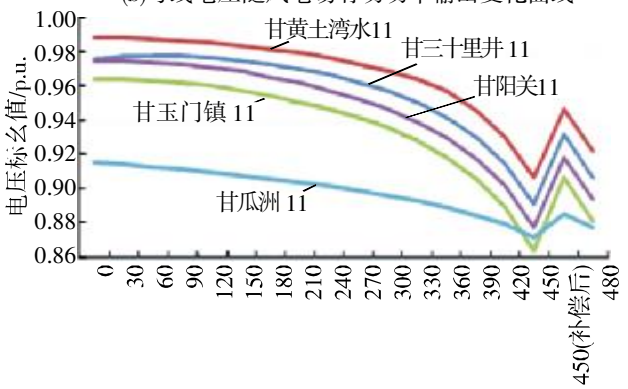
风电场有功功率输出/MW

(a)母线电压随风电场有功功率输出变化曲线



风电场有功功率输出/MW

(b)母线电压随风电场有功功率输出变化曲线



风电场有功功率输出/MW

(c)母线电压随风电场有功功率输出变化曲线

图 2 冬大方式母线电压随风电场有功功率输出变化曲线

Fig. 2 Bus voltages(winter operating mode with the heaviest loads)under changing wind farm outputs

电压已出现普遍越下限的情况；投入一定的无功补偿装置后，电压有所改善；继续增加风电场的有功出力到 480 MW，母线电压又出现普遍越下限的情况。所以，在现有的无功补偿条件下，480 MW 是风电场有功出力的一个上限。

3)风电场出力变化对风电场并网点所在处母线电压以及连接负荷的母线电压影响较大，对其余母线电压影响较小。

4)甘瓜州变电站 110 kV 侧母线电压一直偏低，风电场有功出力增加到 270 MW 时甘瓜州 110 kV 侧母线电压已经越下限，之后投入无功补偿后该母线电压也未能恢复到合格水平。

分析出现上述现象的原因：

1)风电场投入初期，有功出力较小，所需的无功功率也较小，风电场向系统输送有功功率，减少了外网输送的功率，从而减少了线路上的功率损耗，各节点电压小幅度提高；随风电场有功功率输出的增加，风电场需要的无功功率增加，并且线路上产生的无功损耗也增加，导致线路压降增大，母线电压降低；随风电场输出有功功率的增加，无功不足的情况越严重，电压下降速度越快。

2)风电场出力增加到一定程度，无功不足的情况严重，电压降低；投入一定的无功补偿装置后，无功不足程度减轻，电压有所提高；风电场出力进一步增加，无功补偿装置提供的无功功率已不能满足无功缺额，电压继续降低。

3)带有负荷的母线处于供电系统的末端，输电线路上的无功损耗以及负荷对于无功的需求进一步加重了无功不足，导致母线电压降低明显。

4)甘瓜州 110 kV 侧母线是研究区域的一个电压薄弱点，在无功补偿装置全部投入的情况下，电压仍然不能维持在较高水平，建议在甘瓜州变电站增加无功补偿容量，同时减轻负荷。

3.3 甘肃 2011 年冬小运行方式算例

3.3.1 风电场出力数据

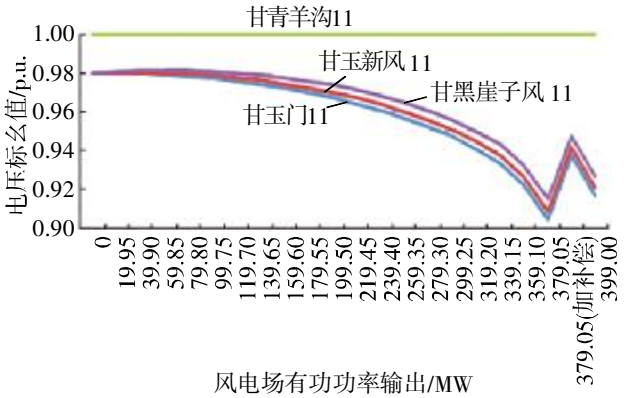
冬小运行方式下所研究的风电场有功出力如下：甘玉新风电场有功出力 10 MW(额定出力 49.5 MW)、甘黑崖子风电场有功出力 10 MW (额定出力 48 MW)、甘大唐风电场有功出力 70 MW(额定出力 201 MW)、甘昌马风电场并未投入运行，有功出力为 0(额定出力 201 MW)、甘三十里井风电场有功出力 60 MW(额定出力 100.5 MW)。

3.3.2 仿真结果

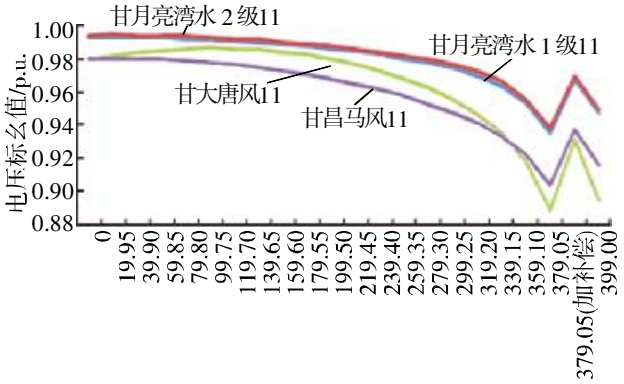
下面改变风电场的出力分别为 0、额定出力(总额定出力 399 MW)的 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%。继续以额定出力 5%的梯度增加风电场的有功出力，当增加有功出力为额定出力的 95%时，各母线电压处于较低的水平，投入一定的无功补偿装置 (甘嘉峪关变电站 10 kV 侧投入三组容量 10 Mvar 电容，甘嘉峪关变电站 35 kV 侧投入一组容量 15 Mvar 电容，甘玉门变电站 1 号变压器 35 kV 侧投入两组容量 20 Mvar 电容，2 号变压器 35 kV 侧投入一组容量 20 Mvar 电容)，增加风电场的有功出力为额定出力的 100%。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

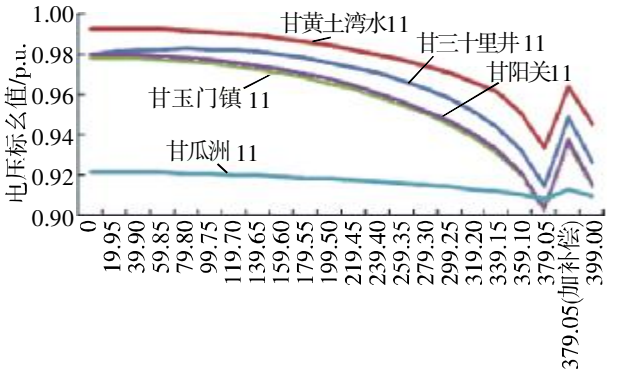
根据仿真结果，以风电场的有功功率输出(MW)为横坐标，电压的标幺值(p.u.)为纵坐标，作出各母线电压随风电场有功功率输出的曲线见图 3。



(a)母线电压随风电场有功功率输出变化曲线



(b)母线电压随风电场有功功率输出变化曲线



(c)母线电压随风电场有功功率输出变化曲线

图 3　冬小方式母线电压随风电场有功功率输出变化曲线

Fig. 3　Bus voltages (winter operating mode with the lightest loads)under changing wind farm outputs

3.3.3　结果分析

由图 3 可以看出：

1)由图观察到的变化趋势同冬大方式 3.2.3 中1)。相比冬大方式，冬小方式各母线电压随风电场有功出力的变化较平缓，其中，甘青羊沟变电站 110 kV 侧母线电压不随风电场有功出力变化，甘瓜州变电站 110 kV 侧母线电压受影响也较小。

2)冬小运行方式下投入运行的风电场容量较小，风电场有功出力增加到额定出力的 95%(即 379.05 MW)时，除甘大唐风变电站 110 kV 侧母线电压越下限外，其余母线电压均合格，投入一定的无功补偿装置后，各母线电压均有所提高。继续增加风电场的有功出力到额定出力，甘大唐风变电站 110 kV 侧母线再次越下限，其余母线电压合格。

3)同冬大 3.2.3 中 3)；甘瓜州变电站 110 kV 侧母线电压受影响较小。

4)在风电场有功出力增加的过程中，甘大唐风变电站 110 kV 侧母线电压最先越下限，无功补偿投入后再增加风电场出力为额定出力，甘大唐风变电站 110 kV 侧母线电压仍然会越下限。

分析出现上述现象的原因：

1)原因同冬大 3.2.3 中原因 1)；相比冬大方式，冬小方式线路上流动的潮流较小，电压损耗较小，电压的变化曲线较冬大方式平缓。

2)原因同冬大 3.2.3 中原因 2)；甘大唐风变电站 110 kV 侧母线连接的风电场容量较大(201 MW)，风电场有功输出变化较大，对电压的影响较大。

3)风电场输出的有功功率变化，对无功功率的需求也发生变化，无功功率对电压的影响首先波及风电场并网点；带有负荷的母线处于供电系统的末端，输电线路上的无功损耗以及负荷对于无功的需求进一步加重了无功不足，导致母线电压降低明显。

4)甘大唐风变电站 110 kV 侧母线连接的风电场额定容量 201 MW，风电场有功出力变化较大，风电场需求的无功也较大，导致甘大唐风变电站 110 kV 侧无功不足严重，投入无功补偿装置后再增加风电场的有功出力，甘大唐风变电站 110 kV 侧母线电压仍不能满足要求，建议在甘大唐风变电站 110 kV 侧附近增加无功补偿容量。

4　结论

文中利用 PSASP 软件对 2011 年甘肃电网冬大和冬小运行方式下嘉峪关、酒泉地区以及张掖地区 110 kV 及以上电压等级越限母线电压进行了调节，使其处于合理的范围之内。在上述电压调节合格的基础上，通过以额定出力 5%的梯度连续改变玉门地区风电集群出力的方式研究其对各母线电压的影响。研究得到的结论如下：

1)酒泉变电站和嘉峪关变电站是甘肃电网的枢纽变电站，对其无功补偿装置进行合理投切能使大多数薄弱区域的电压趋于合格。

2)大方式下风电集群出力变化对母线电压的影响很大；小方式下风电集群出力变化对母线电压的影响较小。因此，系统大方式运行时更应保证充足的无功容量。

3)风电场的有功出力增加，其对无功功率的需

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

求也会增加,会造成系统电压水平的降低。在电压受风电场变化影响较大的风电场并网点以及负荷较重的母线处配备充足的无功补偿装置，有利于系统电压的稳定。

参考文献:

[1] SD 325—1989 电力系统电压和无功电力技术导则[S]. 1989.
SD 325—1989 Power system voltage and reactive power technical guidelines[S]. 1989.

[2] 徐永华. IEEE 典型系统静态电压稳定性仿真研究[D]. 北京:华北电力大学,2004.
XU Yonghua. Static voltage stability simulation with IEEE typical system [D]. Beijing:North China Electric Power University,2004.

[3] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等.电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
ZHOU Shuangxi, ZHU Lingzhi, GUO Xijiu,et al.Voltage stability and control of the power system[M]. Beijing:China Electric Power Press,2004.

[4] 中国电力科学研究院.电力系统分析综合程序(PSASP)用户手册(6.2)[M]. 北京:中国电力科学研究院,2002.
China Electric Power Research Institute.User's manualof power system analysis software package (PSASP)(6.2)[M]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2002.

[5] 杨 清,高 雁. 基于 PSASP 的潮流计算及其应用[J]. 电测与仪表,2010,47(7A): 78-81.
YANG Qing, GAO Yan. Flow calculation and its application based on PASAP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010,47(7A): 78-81.

[6] 王承煦,张 源.风力发电[M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
WANG Chengxi, ZHANG Yuan. Wind power generation [M]. Beijing: China Electric Power Press,2003.

[7] 刘沛清,阳江华. 现代电力系统电压调节措施分析综述[J]. 技术与市场,2011(6):190-191.
LIU Peiqing, YANG Jianghua.Overview and analysis of voltage regulation measures of modern power system [J]. Technologies and Markets, 2011(6):190-191.

[8] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(3):77-81.
CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. The impact of the integration of wind power on the power system[J]. Power System Technology, 2007,31(3):77-81.

[9] 席 晶,李海燕,孔庆东.风电场投切对地区电网电压的影响[J]. 电网技术,2008,32(10):58-62.
XI Jing, LI Haiyan, KONG Qingdong. Impact of the switching of wind farm on the regional power grid voltage [J]. Power System Technology, 2008, 32(10):58-62.

[10] 于德龙,赵海翔,曹 娜,等.风电场接入地区电网的电压问题分析[J]. 中国电力,2006,39(6):10-14.
YU Delong, ZHAO Haixiang, CAO Na, et. The analysis of voltage problems of regional power grid connected with wind farms[J]. China Electric Power, 2006,39(6) :10-14.

[11] FAN Zhenyu,ENSLIN J H R.Challenges, principles and issues relating to the development of wind power in China [C]// Power Systems Conference and Exposition. [S.l.]: IEEE,2006:748-754.

[12] 迟永宁, 戴慧珠,王伟胜.大型风电场接入电网的稳定性问题研究[D].北京:中国电力科学研究院, 2006.
CHI Yongning, DAI Huizhu, WANG Weisheng. Study on the stability problems of grid with large-scale wind farms [D]. Beijing:China Electric Power Research Institute, 2006.

[13] SUN Yuanzhang, WU Jun,LI Guojie. Influence research of wind power generation on power systems[J]. Power System Technology,2007,31(20):55-62.

[14] 郑 伟,周喜超,智 勇,等. 甘肃电网无功电压分析及改进措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010,31(6): 16-20.
ZHENG Wei, ZHOU Xichao,ZHI Yong, et al. Analysis and improvement measures of reactive power and voltage of Gansu Power Network[J]. Power Capacitorsand Reactive Power Compensation, 2010,31(6):16-20.

[15] CHUONG T T.Voltage stability investigation of grid connected wind farm [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology,2009(42):379-393.

时 锐(1988—),女,工程师,主要研究方向为电网暂态稳定、电动汽车充电对电网影响等。

(上接第 104 页)

[14] OKABE S, YAMAGIWA T, OKUBO H.Detection of harmful metallic particles inside gas insulated switchgear using UHF sensor [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(3):701-709.

[15] CHANG C,CHANG C S,JIN J,et al.Source classification of partial discharge for gas insulated substation using waveshape pattern recognition [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(2):374-386.

[16] KABE S,YAMAGIWA T,OKUBO H. Detection of harmful metallic particles inside gas insulated switchgear using UHF sensor [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3):701-709.

[17] METWALLY I A. Status review on partial discharge measurement techniques in gas-insulated switchgear/lines [J]. Electric Power System Research, 2004(69):25-36.

[18] KANEKO S, OKABE S, YOSHIMURA M, et al. Partial discharge diagnosis method using electromagnetic wave mode transformation in actual GIS structure [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5):1329-1339.

段大鹏(1977—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力设备绝缘检测及故障诊断技术、电网谐波抑制与无功功率补偿。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn