

# 针对风电汇集地区无功电压的研究

李朝阳<sup>1</sup>, 常喜强<sup>2</sup>, 张 锋<sup>2</sup>, 王 衡<sup>2</sup>, 郭小龙<sup>2</sup>, 刘德福<sup>2</sup>, 徐 志<sup>3</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830006;  
3. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 针对目前送端电压无功补偿能力不足、风电汇集地区内的风电场和机组无功补偿不同步以及风电机组和汇集站的控制方式不统一的现象, 提出了一种无功控制策略——风电场群无功优化控制(wind farms cluster optimal reactive power control)。该控制方案依据当前的运行工况和先前的断面信息建立了多目标化的控制函数并进行了计算分析, 从而实现了静态设备的调节和连续的动态补偿。通过仿真验证表明了无功优化控制在电压稳定性问题上的策略是可行的。

**关键词:** 无功补偿; 优化控制; 控制函数; 电压稳定性

**Abstract:** At present, the reactive compensation ability of sending-end voltage is insufficient, the reactive compensation of wind farm and wind turbines in wind farm integration area is not synchronized, and the control mode for wind turbines and wind farm collecting stations is not uniform. In view of the above-mentioned situation, a reactive voltage control strategy is put forward, that is, wind farms cluster optimal reactive power control strategy. The control scheme establishes the multi-objective control functions and carries out the calculation and analysis based on the current operating mode and the previous section information, therefore the adjustment of static equipment and continuous dynamic compensation are achieved. The simulation test shows the feasibility of optimal reactive compensation on voltage stability.

**Key words:** reactive compensation; optimal control; control functions; voltage stability

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)02-0051-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.02.012

## 0 引言

最近几年可再生能源得到了飞速的发展,以风电为首的新能源具有重要的商业价值,也是当前发展相对成熟的产业。在过去的十年里,风电的全球装机容量增加了8倍,中国的风电装机增加了158倍,风电大量接入电网导致地区电网电压不稳定现象频繁发生<sup>[1-3]</sup>。针对当前的状况可以看出,除了一些风电机组不具有穿越能力外,还有风电汇集站的站内机组和电容电抗器等无功补偿元器件的控制方式不统一;各个风电场汇集站的自动电压控制方案是相互独立的,自动电压控制的动态性及各个无功补偿设备的响应时间不同步,达不到规定的要求<sup>[4-6]</sup>。随着风电的大规模开发,新疆哈密地区风电集群并网所凸显出来的电压稳定问题日益突出,单个风电场及单个汇集站的无功补偿已不能满足地

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267017)

区电压稳定的发展要求,急需深入研究风电汇集地区多种自动电压控制系统的优化策略,用来提高各级调度对风电汇集地区系统电压的稳定<sup>[7-10]</sup>。

为了有效应对电压稳定问题,提出了风电场群无功优化控制策略,此策略研究交直流电网动态无功优化调度控制,分析新能源和负荷的变化趋势,并综合协调 SVC、发电机的电抗器及变压器分接头等无功电压设备,在完整调度周期内进行多时段耦合,以实现无功电压的精细调控<sup>[11-14]</sup>。

## 1 无功电压控制策略

### 1.1 无功设备的特性分析

风电汇集地区内的无功调节设备主要包括 SVC、SVG、有载调压变压器、风电机组、并联电容电抗器。这些无功调节设备由于在时间和空间上具有不同的物理分布特性,所以控制的策略也存在差异。大型风电场内主要无功设备的运行特性如表 1 所示。

表1 主要无功设备的运行特性比较

设备分类	设备单元	补偿特点	补偿位置	响应时间
静态设备	变压器分接头、电容器组	离散阶梯型调节 投切产生尖峰脉冲	集中补偿	秒极慢
动态设备	SVC/SVG	连续平滑动态调节	集中补偿	毫秒级快
风电机组	双馈风电机组 直驱风电机组	连续平滑调节 单击补偿量有限	集中补偿	秒内较快

上述比较分析可得: 新能源在电网中达到稳定安全的运行, 需要综合分析多种无功在时间和空间上的物理特性并进行综合利用, 这是实现风电汇集地区无功优化策略的突破点。

### 1.2 无功特性原则

从表1可以看出, 并联电容电抗器和有载变压器等离散的无功调节设备能够提升风电接入电网的电网稳定极限, 控制风电汇集站内电压在规定范围内波动, 但是其响应时间比较慢, 只能实现突变、分步分阶控制, 不能进行精细化调整。

同时可以看到 SVC 设备运行简单, 能够在容、感两性上面自由平滑连续地进行切换, 从而迅速平移风电场有功变化带来的无功电压波动。与 SVC 相比较, SVG 除了具有 SVC 的特性之外, 还省去了发热量大的电容电感等元器件, 从而减少了无功损耗; 然而由于 SVC/SVG 的造价较高, 会增加风电场的投资成本。当电网发生短路故障引起部分风电机组脱网以后, 由于 SVC 设备控制方式的不合理继续在电网中运行, 会导致局部电网无功过高, 事故进一步扩大。

变速风电机组是优质的无功调节电源, 可以在正常运行期间快速调节无功输出, 从而稳定风电场内电压并向电网提供无功支撑。当电网发生故障后可以通过控制变流器来维持机端母线电压恒定, 能够很好地抑制大扰动故障动作后的无功过剩问题。但是当缺失大量无功的情况下, 变速风电机组的无功补偿特性就大大减弱了。

## 2 无功电压优化方案

随着风电场数据采集与监控管理系统的发展和完善, 风电场数据监控平台能够实时获取风电场内的拓扑结构以及控制单元的运行信息, 并对底层设备下发指令进行远程控制。基于此, 所提出的风电

场无功优化控制是以风电场实时检测系统为前提, 充分考虑多种无功补偿设备在时间和空间上的协调控制, 通过上下级调度控制中心下发的控制信号, 并建立多目标模型使系统的无功电压达到最优的分配。如图1所示。

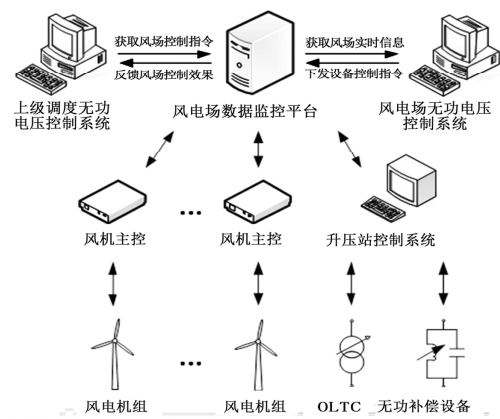


图1 风电汇集地区无功优化示意图

无功调节系统首先根据风机实时的有功出力  $P_g$  计算出当前各风机的无功出力极限  $Q_{gmax}$  和  $Q_{gmin}$ , 然后根据预设的控制目标和上级调度下达的控制指令  $U_{PCC}^{ref}$  制定相应的控制策略, 并将控制参考值下发至风电场内的各个电压无功调节单元。各控制单元根据自己的运行特性响应无功调节系统下发的控制参考值, 再将本次控制执行后的 PCC 电压实际值  $U_{PCC}$  反馈给上级调度系统。

风电汇集地区的调压措施主要依靠汇集站调压风电场的无功补偿设备来完成, 目前风电汇集地区 AVC 研究主要包括集中和分级两种控制模式。集中式控制结构设置的控制中心依据不同的控制目标制定相应的优化控制策略, 然后下发无功指令或电压指令至各个风电场和汇集站内的电容器组、有载调压变压器、SVC 和变速风电集群等设备; 分级式控制结构是基于传统的三级电压控制体系设置风电场无功电压控制区域站, 向上接收大电网无功优化调度给定的设定值; 向下再通过分层分区给各个风电场和汇集站电压控制子站下发无功电压控制指令,

由各子站协调其无功调节设备以实现闭环控制<sup>[19-21]</sup>。

所提的风电场群无功优化控制是依据分层分压的原则进行AVC控制,其结构如图2所示。

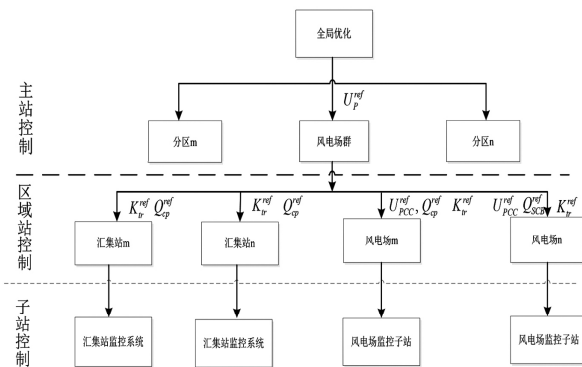


图2 风电场群无功优化控制系统示意图

主站控制是指电网调度控制中心以全网的经济运行为目标的无功优化,其控制作用是向各无功电压控制分区下发中枢节点的电压控制参考值 $U_p^{ref}$ ;风电汇集地区的AVC在分级控制体系中皆为区域控制,其控制作用以实现集站点为目标,通过风电场群的无功优化计算向各汇集站和风电场子站下发静态无功调节设备无功功率控制参考值 $U_{ep}^{ref}$ 、有载调压变压器分接头档位参考值 $K_{tr}^{ref}$ 和电压控制参考值 $U_{PCC}^{ref}$ ;子站控制是指各汇集站和风电场控制站内的无功调节设备完成对区域站所下发控制参考值的跟踪。

为了避免无功补偿反应时间慢的缺点,汇集站和风电场的变压器分接头及电容电抗器在响应时间周期内收到的指令不发生改变;风电场子站调节升压站内的动态补偿设备(如SVC)和风电场内的变速恒频风电机组,闭环响应集群区域站下发的并网点电压控制指令,用来保证风电汇集地区并网点电压控制在允许的电压范围内。

### 3 算例分析验证

以哈密地区某风电汇集地区为例进行仿真验证,系统图如图3所示。该风电场装机容量为121.5 MW,场内分散分布的81台1.5 MW双馈风电机组分别通过8条馈线(地下电缆)连接至风电场升压站内主变压器的低压侧母线,馈线信息详见表2所示。风电场内两套SVC无功补偿设备的容量均为-40~60 Mvar。

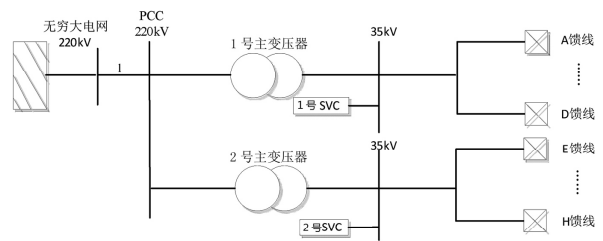


图3 算例系统示意图

表2 风电场馈线信息

馈线	长度/km	风机容量/MW	风机编号
A	9.269	9 × 1.5	1 ~ 9
B	6.940	10 × 1.5	10 ~ 19
C	4.069	7 × 1.5	20 ~ 26
D	6.259	9 × 1.5	27 ~ 35
E	11.375	13 × 1.5	36 ~ 48
F	11.960	12 × 1.5	49 ~ 60
G	18.140	9 × 1.5	61 ~ 69
H	18.580	12 × 1.5	70 ~ 81

为了比较不同的AVC控制策略的优越性,这里采用3种不同的控制方式进行比较分析。

方案1:采用风电汇集地区汇集站内的SVC设备进行无功电压的补偿。

方案2:采用风电汇集地区内的DFIG机组进行无功电压的补偿调节。

方案3:风电场内SVC与DFIG同时进行无功的补偿,不同无功调节设备的无功电压指令按提出风电场群无功优化控制策略计算并执行。

系统电网电压在0.894 p. u.以及控制指令的并网点电压在0.995 p. u.时,分别以10%、30%、50%、70%风电出力的运行情况为研究,采用3种不同的方式进行电压调节。表3给出了4种不同风机出力下的3种调压优化的数据对比。

图4和图5分别给出了风机运行在50%和70%两种出力情况下3种无功调压方式和无功电压补偿的示意图。

从图4、图5可以看出,方式3由于采用所提的风电场群无功优化控制,能从全局考虑无功补偿的裕度指标,与方式1相比较能更多地保留SVC的裕度;与方式2相比较,使机端电压保持在一个相对稳定的范围内又减小了风电场内的无功功率损耗,并且控制效果随着无功需求的增加更加显著。

方式1和方式2的无功输出曲线可以看出,在机组能够调节无功的情况下,场内分散的DFIG风电机组能够达到与集中无功补偿设备相同的调压目

表3 4种不同风机出力下的3种调压优化的数据对比

运行工况风电出力	方式1		方式2		方式3		
	$Q_{SVC}/\text{Mvar}$	$U_{Gmax}/(\text{p. u.})$	$Q_{DFIG}/\text{Mvar}$	$U_{Gmax}/(\text{p. u.})$	$Q_{SVC}/\text{Mvar}$	$Q_{DFIG}/\text{Mvar}$	$U_{Gmax}/(\text{p. u.})$
10%	14.102	1.019 8	14.614 1	1.029 9	3.367 2	11.104 9	1.024 5
30%	23.380	1.027 3	24.406 4	1.044 5	6.118 1	17.964 3	1.033 4
50%	38.521	1.036 1	40.703 1	1.064 3	7.430 3	32.729 5	1.048 7
70%	59.109	1.045 9	63.510 9	1.089 0	11.992 2	50.307 7	1.067 2

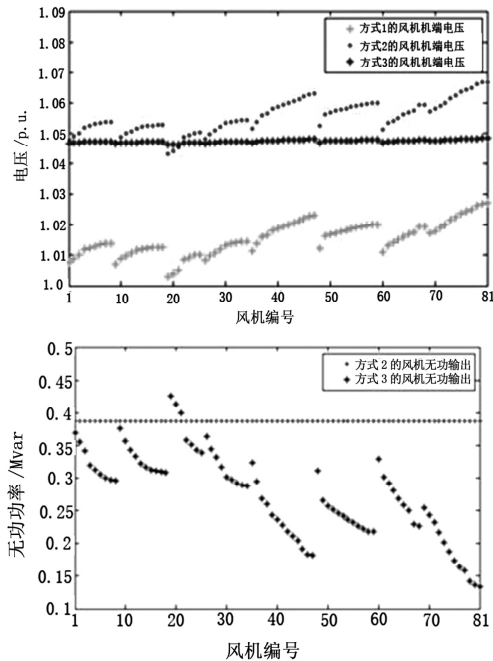


图4 50%出力状况下不同调压方式的DFIG风电机组端电压和无功输出示意图

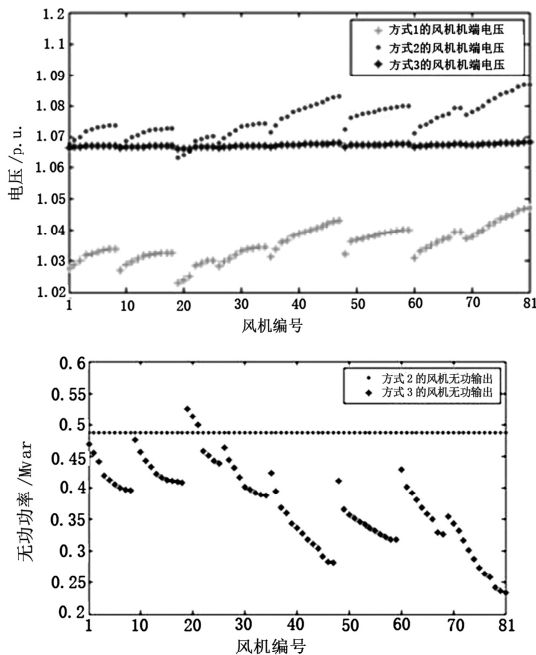


图5 70%出力状况下不同调压方式的DFIG风电机组端电压和无功输出示意图

的,并且DFIG风电机组的无功输出稍微高于SVC

的无功输出。这是因为风电机组和风电场内的SVC补偿设备距离风电场并网点远近程度不同,风电机组输出的无功经过远距离的输送并经过多台升压变压器送出产生了损耗。方式3通过风电场群无功优化控制协调控制DFIG风电机组与SVC的无功出力,让DFIG风电机组首先进行无功补偿,从而使SVC和DFIG的无功出力小于方式1和方式2,这样的话SVC的无功裕度就比较大,而且风电场内的无功损耗相对来说就比较小。综上分析可以得到,所提的控制策略能够使系统的无功优化达到一个比较好的程度,从而为接入风电的电网系统的稳定性和安全性奠定基础。

#### 4 结论

针对目前风电汇集地区没有建成多个无功补偿系统,提出了风电场群无功优化控制策略,对电网尤其是新能源接入地区的电压薄弱区域辨识,通过无功优化有针对性地提高电压薄弱区域的稳定,从而提高电网对新能源接入的适应性。以风电机组的补偿作为基础,同时以风电机组的动态无功补偿作为主要的调节手段,采用多种补偿设备共同补偿,从而达到一个最优的控制,通过协调控制使风电场汇集地区的电压达到一个安全稳定的效果,对以后的大规模风电汇集地区的无功电压补偿有重要的借鉴作用。

#### 参考文献

- [1] 熊传平, 张晓华, 孟远景, 等. 考虑大规模风电接入的系统静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 30(21): 132-137.
- [2] 王松, 李庚银, 周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2714-2720.
- [3] 栗然, 唐凡, 刘培英, 等. 双馈风电场新型无功补偿与电压控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 16-23.
- [4] 刘其辉, 王志明. 双馈式变速恒频风力发电机的无功

功率机制及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 82-89.

[5] 陈慧粉, 乔颖, 闵勇, 等. 风电场动静无功补偿协调控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 248-254.

[6] 秦涛, 吕跃刚, 徐大平. 采用双馈机组的风电场无功功率控制技术[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 105-110.

[7] 陈惠粉, 乔颖, 鲁宗相, 等. 风电场群的无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 78-83.

[8] 邓卫, 唐西胜, 裴玮, 等. 含风电微型电网电压稳定性分析及控制技术[J]. 电工技术学报, 2012(1): 56-62.

[9] 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]. 继电器, 2012, 40(2): 45-50.

[10] 姜宁, 赵剑锋, 王春宁, 等. 电压无功控制及其优化技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[11] 陈宁, 何维国, 钱敏慧, 等. 风电场无功电压控制系统设

计和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 32-36.

[12] 王伟, 徐殿国, 王琦, 等. 大规模并网风电场的无功电压紧急控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 8-14.

作者简介:

李朝阳(1986), 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制;

常喜强(1976), 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制、调度自动化;

张锋(1978), 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制、调度自动化;

王衡(1984), 高级工程师, 研究方向为调度自动化;

郭小龙(1983), 高级工程师, 研究方向为调度自动化;

刘德福(1976), 高级工程师, 研究方向为调度自动化;

徐志(1988), 研究生, 研究方向为电力系统分析与控制.

(收稿日期: 2016-11-29)

(上接第45页)

数据有一突变, 其中 00:00~08:00,  $x$ -轴累积变形量达到  $0.06^\circ$ ,  $y$ -轴累积变形量达到  $0.04^\circ$ , 变形速率约为  $0.18^\circ/d$ , 斜坡进入加速蠕变阶段。这与现场调查反馈资料完全一致, 见图 12。

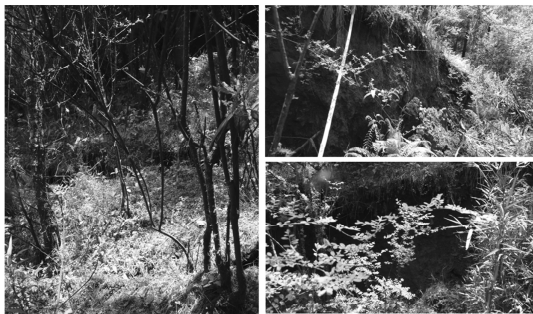


图 12 313 号塔基在建挡墙右下侧新增裂缝

## 5 结 语

在大量现场查勘和试验的基础上, 研究了一种基于光纤传感器技术的滑坡在线监测平台, 解决了现有技术中监测系统存在的监测装置实时性和有效性较低、成本高、效率和准确率低以及可靠性较低的技术问题。该监测系统能够高效准确地实时地进行监测, 具有良好的可靠性和较高的性价比。

对传统监测平台进行了改进, 将光纤传感器、光调制解调仪、太阳能及蓄电池供能单元和无线通信装置等集成在一起, 最大化地减小了工程量, 提高了系统工作的可靠性; 同时由于无需利用现有的电力系统通信网络, 便于成果大规模地推广应用。

研究成果在某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔进行了现场应用, 对获取的降雨量、表面裂缝和倾斜量进行了特征分析及关联分析, 对滑坡体所处的状态进行综合诊断, 并开展了比较验证工作, 实现了对铁塔安全状态有效而全面的评估。

## 参考文献

[1] 丁勇, 施斌, 崔何亮, 等. 光纤传感网络在边坡稳定监测中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27: 338-342.

[2] 黄民双, 陈伟民, 黄尚廉. 基于 Brillouin 散射的分布式光纤拉伸应变传感器的理论分析[J]. 光电工程, 1995, 22(4): 11-36.

[3] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 香港某边坡综合自动监测系统的设计和安装[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 790-796.

[4] Cao Yongxing, Xue Zhihang, Zhang Changhua, et al. Design and Application of Online Landslide Monitoring System for Transmission Lines Corridor Based on the Optical Fiber Sensing Technology [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 556-562: 3160-3163.

[5] Cao Yongxing, Chang Ming, Tang Chuan, et al. Remote Sensing Interpretation and Early Warning System Designing of Geohazards along Transmission Lines—A Case Study of the Danba-kangding 500 kV Double Circuit Transmission Line [J]. Advanced Materials Research, 2014, 986-987: 1647-1650.

作者简介:

刘勇(1968), 高级工程师, 国网四川省电力公司副总经理;

薛志航(1987), 工程师, 主要从事电力系统带电检测及故障诊断技术.

(收稿日期: 2017-03-03)