

# 大规模风电基地无功补偿方案分析

杜波<sup>1</sup>, 张丹<sup>2</sup>

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016;

2. 国网山西省电力公司 霍州市供电公司, 山西 霍州 031400)

**摘要:**随着我国风电的大规模开发, 风力发电占总装机容量的比例越来越大, 电压问题对电网稳定运行带来不稳定因素。分析风电场、大规模风电基地有功出力变化的时间尺度特性; 研究风电机组、风电场、大规模基地在不同有功出力的情况下的无功电压时间尺度特性以及各类无功补偿(静态与动态)装置无功补偿时间尺度特性。结合风电基地接入电网最佳运行功率因素提出风电场、大规模风电基地无功补偿设备设计方案。

**关键词:**大规模风电; 时间尺度; 无功补偿; 电压控制

**中图分类号:** TM71

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2014)S2-025-03

我国已经规划建设数个千万千瓦级的风电基地, 当此类风电基地建成后, 其容量在所属电网所占比例不可忽视<sup>[1]</sup>。其中风速扰动下风电场输出功率的波动对接入区域电压影响是一个值得关注的问题。文献[2]以风电场接入点为电压控制点, 扰动前的稳态电压为控制目标, 提出一种改善接入地区电压稳定性的变速恒频风电场无功控制策略。文献[3]以风电场群的汇集站为电压中枢点, 兼顾各个风电场的无功电压要求, 协调各风电场的无功调节装置动作。文献[4]提出了一种根据风速、负荷的变化, 在三维空间内确定风电场并网点处无功补偿容量的方法, 应用遗传算法求解电容器优化分组和投切的问题。但是这几种控制措施只对风电场出口电压进行风电场内部风电机组的无功控制, 或只利用无功补偿设备调压, 而没有将两者结合起来。文中以大规模风电并网区内重要母线、风电场并网点电压为控制目标, 协调控制大规模风电区域内有无功调节能力的风电机组及各种无功源, 提高电压运行水平, 使整个区域的电压保持在较高的水平。

## 1 大规模风电基地无功电压特性

### 1.1 大规模风电有功出力特性

风电基地包含多个风电场群, 由于地域分布广阔, 风能空间分布的差异性明显。同一风电场内不

同空间位置处的风能分布受地形、场区面积、风机排列、尾流效应等因素影响, 风电最大有功出力随风电装机规模增大而减小<sup>[5]</sup>。图 1 为文中对东北电网某省级电网内 770 MW 风电场群的实测功率数据进行容量渐增时的最大可能出力统计。

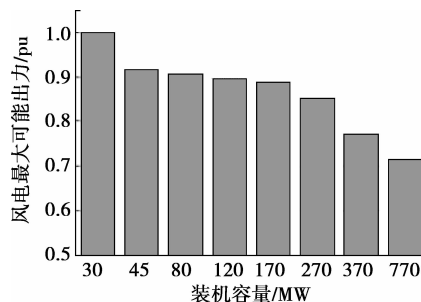


图 1 风电最大有功出力与风电装机规模的关系

### 1.2 大规模风电基地电压特性分析

通常情况下, 大规模风电集中接入电网的方式如图 3 的拓扑图所示。

由图 2 可知, 大规模风电基地的风电机组发出的功率经过几次升压后, 再通过高压线路输送到负荷中心, 这些特点使得风电带来无功损耗大。风电场基地有功无功的变化使各并网点电压大范围波动。图 3 为风电基地并网点之一  $A_1$  母线及风电场 1 并网点  $C_1$  某天的电压运行曲线。

收稿日期: 2014-09-21

作者简介: 杜波(1986-), 男, 硕士研究生, 从事电气设计、电力系统安全稳定控制、风电并网等工作,

(E-mail) dujinsong1986@126.com。

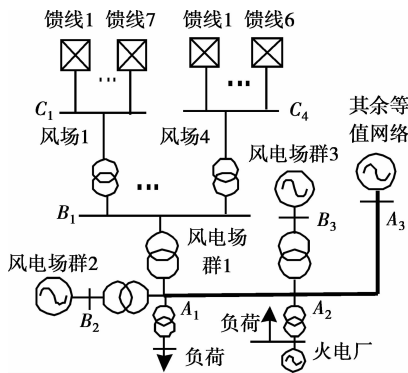


图 2 大规模风电接入系统拓扑图

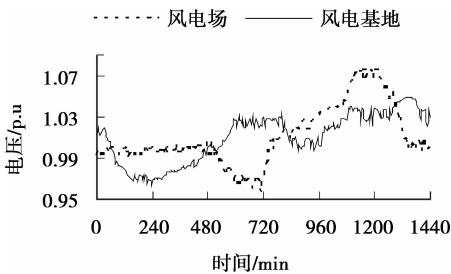


图 3 风电场及风电基地并网母线电压曲线

由图 3 知,风电场与风电基地并网点电压有超限(超过 1.07 或者低于 0.97)的情况,不符合风电并网的电压要求。在多数时间内,风电场并网点电压波动范围较大,波动时间尺度在分钟级以内。而风电基地出口母线电压在分钟级以下的短时间尺度内波动范围较小;而在 10 min 级以上的长时间尺度内仍具有很强的波动性。据统计,风电有功出力较大时,母线电压偏低;风电有功出力较小时,母线电压偏高;

## 2 风电并网区域内各无功源特性分析

大规模风电区域有多种无功源参与调压。不同无功源的调压特性相差较大。双馈风电机组(DFIG)本身就是一种无功源,其机端输出无功功率<sup>[6]</sup>为

$$Q_s = -\frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}} + \frac{x_m}{X_{ss}} |\dot{U}_s| I_{dr}, \quad (1)$$

式中:  $|\dot{U}_s|$  为机端电压;  $X_m$  为励磁电抗;  $I_{dr}$  为转子电流的励磁分量;  $X_s$  为定子侧电抗;  $X_{ss} = X_m + X_s$  为定子回路等效电抗。

受 DFIG 转子侧最大电流值影响,其有功输出变化时,相应的无功功率输出范围不断变化,即其无功可调范围随有功输出的变化而变化<sup>[7]</sup>:

$$Q_{gmin} \leq Q_g^{reg} \leq Q_{gmax} \quad (2)$$

永磁直驱风电机组无功功率的消耗和产生由电网端逆变器控制。其无功功率<sup>[8]</sup>如式(3)所示:

$$Q_s = U_{qs} i_{ds} - U_{ds} i_{qs} \quad (3)$$

式中:  $U_{qs}$ 、 $U_{ds}$  分别为逆变器的  $q$  轴、 $d$  轴分量;  $i_{qs}$ 、 $i_{ds}$  分别为逆变器的  $q$  轴、 $d$  轴电流;

常规并联电容器、电抗器是最基本的电力系统无功电压控制设备,动作时间在分钟级以上。

静止无功补偿器(SVC)根据控制点电压进行无功的自动补偿,能在秒级以下准确调压,其工作在线性控制状态的无功注入为

$$Q_{SVC} = U_L \frac{U_{ref} - U_K}{X_{SI}}, \quad (4)$$

式中:  $U_L$  为安装点线路电压;  $U_{ref}$  为被控制母线的给定参考电压;  $U_K$  被控母线电压;  $X_{SI}$  为表征 SVC 有差调节特性的电抗。SVC 除了连续可控支路外,一般还有可投切的固定电容支路。

静止同步补偿器(STATCOM)与旋转同步调相机相识,能够提供对称超前或者滞后的无功电流,控制节点电压。由于其采用电力电子变换器来产生无功,其相应时间也在秒级以下。

有载调压变压器可以调节分接头,改变系统中的无功分布,实现对系统的调压作用,据实际运行经验,其动作时间为分钟级。

常规水火电机组也可改变功率因数实现对电网的电压控制作用,但无功不宜远距离输送,常规机组的调压能力一般作为备用的无功源。

## 3 大规模风电基地接入无功优化设计

### 3.1 大规模风电基地接入无功补偿优化设计目标

传统配电网中影响无功优化设计主要因素是负荷。大规模风电基地通常处在人烟稀少的轻负荷区域,其并网后,有功出力随风速波使电压波动成为电网运行恶劣的主要因素。因此大规模风电接入电网无功优化设计主要以电压幅值运行在合格的范围内为目标。

### 3.2 大规模风电接入电网无功补偿容量估算

由前文分析,大规模风电基地小出力方式时电压较高;大出力方式电压较高,因此根据风电两种出力方式确定无功补偿装置的补偿容量。

#### 3.2.1 大规模风电基地大出力方式

1) 确定大规模风电接入区域电网在风电大出力运行方式下的相关重要运行参数,包括:①风电基地无功总负荷  $Q_b$  (感性为正);②变压器感性无功损耗  $Q_T$ ;③架空线/电缆无功损耗  $Q_L$ , 该数值在架空线/

电缆自身感性损耗平衡充电功率后得到(感性为正,容性为负);④风电基地总的有功出力  $P_G$ 。

2)评价系统感性无功平衡状况,将步骤1中的①②③项相加,结合④,得到风电基地平均功率因数为

$$\cos \varphi_A = \cos \left[ \arctan \left( \frac{Q_D + Q_T + Q_L}{P_G} \right) \right] \quad (5)$$

3)估算系统无功容量  $Q$  时,根据系统运行特点确定最佳  $\cos \varphi'_A$ , 然后计算  $Q$  如下:

$$Q = P_G \tan \varphi_A - P_G \tan \varphi'_A \quad (6)$$

以上过程中,  $Q_D$ 、 $Q_T$ 、 $Q_L$  和  $P_G$  均来风电大出力方式下的潮流计算结果。

### 3.2.2 大规模风电基地小出力方式

1)确定大规模风电接入区域电网在风电小出力运行方式下的相关重要运行参数,包括:①风电基地无功总负荷  $Q_D$ (感性为正);②风电基地变压器感性无功损耗  $Q_T$ ;③风电基地架空线/电缆无功损耗  $Q_L$ ,该数值在架空线/电缆自身感性损耗平衡充电功率后得到(感性为正,容性为负);④风电基地有功出力  $P_G$ 。

2)估计系统缺乏的无功容量  $Q_x$  时,根据系统运行特点选定最佳  $\cos \varphi'_A$ , 然后通过下式计算电网应补偿总的感性无功容量  $Q_x$  为

$$Q_x = P_G \tan \varphi'_A - (Q_D + Q_T + Q_L) \quad (6)$$

则系统缺乏的感性无功容量为

$$Q = Q_x \quad (7)$$

以上过程中,  $Q_D$ 、 $Q_T$ 、 $Q_L$  和  $P_G$  均为风电小出力方式下的潮流计算结果;  $Q_x$  则通过对系统可用感性无功补偿容量的统计得到。

### 3.3 风电基地无功补偿装置类型选择

确定了无功补偿容量,就需要确定无功补偿装置的类型。结合前文的分析,风电场出口电压波动的的时间尺度在分钟级以内,应选用动作时间短的动态无功补偿装;而对于大规模风电基地的出口母线

电压波动尺度大多数情况下在 10 min 以上,因而配置常规的电容电抗器就可满足要求。

## 4 结 论

大规模风电基地的地理分散效益使风电场、风电基地母线电压波动具有不同的时间尺度特性。同时各种无功源控制电压机理不同,响应时间也存在不同的尺度特性。针对风电场、大规模风电基地不同的时间尺度特性选择不同类型的无功补偿装。并且结合电网最佳运行功率因素确定无功补偿装置容量,得出大规模风电基地无功补偿装置设计方案。

### 参考文献:

- [1] 魏晓霞. 我国大规模风电接入电网面临的挑战[J]. 研究与探讨, 2010, 2(32): 19-21.
- [2] 陈宁, 朱凌志, 王伟. 改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29: 102-108.
- [3] 陈惠粉, 乔颖, 鲁宗相. 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.
- [4] 陈树勇, 申洪, 张洋, 等. 基于遗传算法的风电场无功补偿及控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 1-6.
- [5] 刘君华, 方鸽飞, 吕岩岩. 基于灵敏度法确定无功补偿地点[J]. 电力系统自动化学报, 2006, 18(4): 58-61.
- [6] Tapia A, Tapia G. Reactive power control of wind farms for voltage control applications[J]. Renewable Energy, 2004, 29(3): 377-392.
- [7] 王成福, 梁军, 张利, 等. 基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 23-28.
- [8] 刘君华, 方鸽飞, 吕岩岩. 基于灵敏度法确定无功补偿地点[J]. 电力系统自动化学报, 2006, 18(4): 58-61.

(编辑 陈移峰)