

# 甘肃酒泉风电出力特性分析

肖创英<sup>1</sup>, 汪宁渤<sup>2</sup>, 陟晶<sup>2</sup>, 丁坤<sup>2</sup>

(1. 甘肃省电力公司, 甘肃省兰州市 730050; 2. 甘肃省电力公司风电技术中心, 甘肃省兰州市 730050)

**摘要:** 甘肃酒泉风电基地是中国乃至世界规划建设的第一 10 GW 风电示范基地, 开创了风电大规模集中开发、超远距离输送的先河。文中利用甘肃酒泉地区实际测风资料和调度能量管理系统(EMS)实际运行数据, 全面分析了酒泉地区的风资源特性, 研究了风电机组、风电场、风电场群和风电基地的出力特性, 比较了不同时间尺度下风电出力特性的不同特点, 得出如下大规模风电基地的出力特性: 在长时间尺度下相关性明显, 在短时间尺度下互补性明显。文中还根据大规模风电的出力特性分析了其对电网稳定和调频、调峰的影响。

**关键词:** 甘肃酒泉风电基地; 出力特性; 调频; 调峰; 电网稳定

## 0 引言

甘肃酒泉地区风能资源丰富, 大部分区域年平均风速在 5.0 m/s~6.5 m/s 之间, 风能密度超过 150 W/m<sup>2</sup>, 风能资源经济可开发储量达 40 GW, 适宜建设大型风电基地<sup>[1]</sup>。根据《甘肃酒泉千万千瓦级风电基地规划报告》, 到 2010 年底, 酒泉地区风电总装机容量将达到 5.16 GW, 到 2015 年, 风电总装机容量将达到 12.71 GW, 是世界上第 1 个 10 GW 风电基地。

风能具有间歇性、波动性以及随机性的特点<sup>[1]</sup>, 这决定了风电出力可能会大幅变化, 使得电力系统存在频率稳定和电压稳定隐患。为了保证电力系统的稳定及电力平衡, 必须有其他电源为风电进行调频、调峰, 且其性能可以满足风电的需要。

本文全面分析了酒泉地区的风资源特性, 研究了风电机组、风电场、风电场群和风电基地的出力特性。研究成果可以为大规模风电的发展模式及大规模风电与电网的协调发展提供参考和借鉴。

## 1 酒泉风电出力的波动性和随机性

### 1.1 风电出力的波动性

根据测风数据, 酒泉风电基地在大部分天内, 会有风速在接近零风速与额定风速之间变化的情况。与此对应, 风电出力在大部分天内, 都会有在接近零出力与额定出力之间变化的现象。酒泉风电基地折算后的日平均出力的年度分布如图 1 所示。由图可知, 日平均出力的波动范围很大, 最小值接近于 0, 最大值接近于 24 h 满出力。

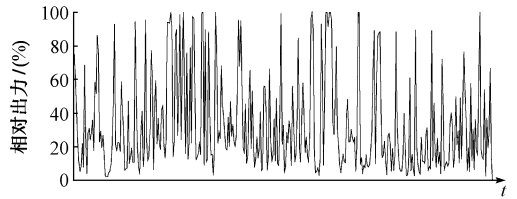


图 1 日平均出力的年度分布  
Fig. 1 Annual distribution of daily wind generation energy

### 1.2 风电出力的不确定性

以 2008 年的测风数据为例, 8 月和 9 月都有连续数日风电日平均出力达到或接近于额定出力, 同时, 也有连续数日风电日平均出力小于 20% 额定出力, 甚至个别日的平均出力接近于 0。

酒泉风电基地现有风电场的实际运行数据表明, 会出现连续数日风电大出力和连续数日风电小出力, 其能量管理系统(EMS)记录如图 2 所示。其中, 连续数日大出力对应的时间为 2009 年 11 月 1 日—2009 年 11 月 15 日, 连续数日小出力对应的时间为 2009 年 1 月 30 日—2009 年 2 月 13 日。

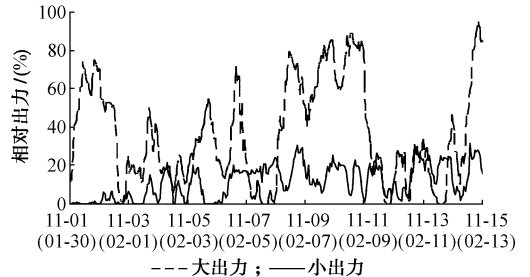


图 2 2009 年连续 15 d 风电大(小)出力  
Fig. 2 Heavy/light generation of wind power in continuous 15 days in 2009

### 1.3 风电出力的随机性

2009 年 8 月 25 日和 8 月 26 日是典型的相邻

日,这 2 d 的日发电量近似相等,而风电出力曲线差异巨大,如图 3 所示。

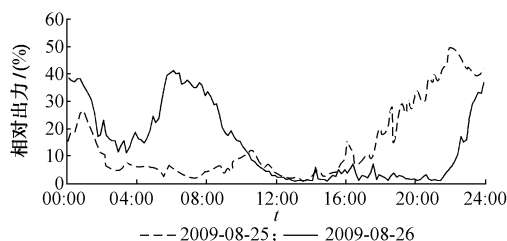


图 3 典型相邻日的风电出力曲线

Fig. 3 Curves of wind power generation in two typical adjacent days

#### 1.4 日平均出力变化率的概率分布

日平均出力变化率的定义如下:

$$r = \frac{|P_{a,i} - P_{a,i-1}|}{P_{total}} \times 100\%$$

式中:  $r$  为日平均出力变化率;  $P_{a,i}$  为当日的日平均出力;  $P_{a,i-1}$  为前一日日平均出力;  $P_{total}$  为总装机容量。

根据 2008 年 6 月—2009 年 5 月的测风资料,相邻日的日平均出力变化率的累计概率分布曲线如图 4 所示。由图可知,日平均出力变化率在 50% 及以上的天数占到约 15%。日平均出力变化率的最大值为 91%,即出力变化为 4.7 GW。

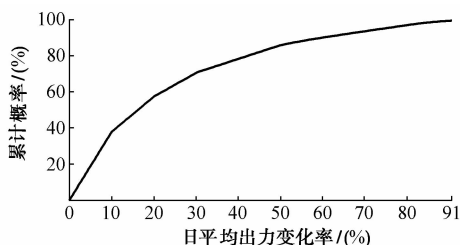


图 4 相邻日的日平均出力变化率的累计概率分布

Fig. 4 Probability distribution of change rate of power generation in two adjacent days

## 2 酒泉风电出力的相关性和互补性

酒泉风电出力在长时间尺度下相关性明显,在短时间尺度下互补性明显。

#### 2.1 长时间尺度下风电出力具有相关性

虽然地理分散效应会降低风电出力的相关性,提高其互补性,但是其作用主要集中在小时级以下时间尺度范围内。由于酒泉风电基地风电场之间的地理位置比较集中,因而对于长时间的大面积来风,各个风电场出力变化趋势相近。这时,不同风电场的风电出力表现出较大的相关性,导致风电基地的总出力波动很大。

以北大桥和干河口风电场群为例,绘制 2009 年

5 月 4 日—2009 年 5 月 10 日风电出力曲线如图 5 所示。由图可见,在长时间尺度下,2 个风电场群出力具有很大的相关性。

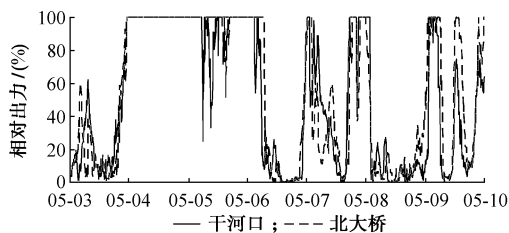


图 5 2009 年 5 月 4 日到 5 月 10 日干河口和北大桥风电场群出力曲线

Fig. 5 Wind power curves of Ganhekou and Beidaqiao wind power farms from 4th to 10th in May, 2009

#### 2.2 短时间尺度下风电出力具有互补性

在小时级以下短时间尺度内,风电机组和风电场出力存在一定的互补性,降低了酒泉风电总出力的变化率。

当风电基地来大风或来小风时,风峰、风谷依次经过不同地理位置的风电场,因此,各风电场出力变化的时刻及速率不同,风电场之间的分散效应降低了风电基地总出力的变化率。下面分别选取典型的风速上升和下降时风电基地的出力情况进行分析。

北大桥风电场群和干河口风电场群风速上升时,风电基地总出力变化率超过 10% (每 10 min) 的时间只占爬坡时间的 14%。风电基地、各风电场群的出力及出力变化率见附录 A 图 A1 和图 A2。

昌马风电场群和干河口风电场群风速下降时,风电基地总出力变化率超过 3% (每 10 min) 的时间只占总时间的 19%。风电基地、各风电场群的出力及出力变化率见附录 A 图 A3 和图 A4。

#### 2.3 实际运行中风电出力变化率

根据酒泉风电的实际运行经验,虽然单个风电场出力变化率较大,但是在“风风互补”的作用下,风电基地的出力变化率较小。

图 6 是根据现有的 508.6 MW 风电场群 2009 年 1 月 1 日—2009 年 6 月 11 日的 EMS 运行数据绘制的出力变化率累计概率分布曲线。

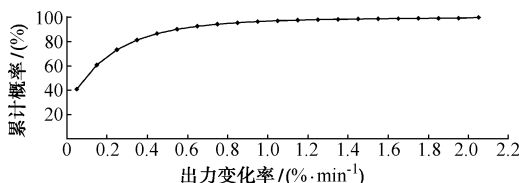


图 6 酒泉风电实际出力变化率

Fig. 6 Change rate of wind power in practical generation in Jiuquan wind power base

由图 6 可见,风电场群出力变化率在每分钟

0~0.6%之内的概率约为90%,在每分钟0~1.5%之内的概率约为99%,大于1.5%的概率约为1%。

### 3 出力特性分析

#### 3.1 风电机组的出力特性分析

风电机组出力特性与其转动惯量和有功功率控制策略有关。风电机组转动惯量可以有效平抑风速的扰动,转动惯量越大,平抑扰动的能力越强。文献[2-3]介绍了几种典型风力发电机的惯性时间常数,异步风力发电机和双馈型风力发电机的惯性时间常数一般均在5 s以上。直驱和双馈风电机组有功控制策略包括桨距角控制、变频器控制等,可以有效控制风电机组的输出功率。在转动惯量及有功控制策略的作用下,风电机组能够平抑秒级以下时间尺度内的有功出力波动<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 风电场的出力特性分析

2010年酒泉5.16 GW装机容量的风电主要以200 MW风电场为主,风电场包含单机容量1.5 MW的风电机组134台,每排11台,共12排,风电机组行距为900 m,间距为300 m,每排风电机组通过同一条电缆接入风电场的汇集母线(见附录B图B1)。理想的12 m/s(取额定风速范围10.5 m/s~13.0 m/s的中值)正向阵风穿过风电场需要12.5 min,风峰、风谷到达风电机组的时间不同,位于风向不同位置的风电机组具有互补性,降低了风电场在数分钟以下时间尺度内的出力变化率。此时,风电场的出力变化率为每分钟8%(16 MW)。此外,风速的随机性特点强化了风电场内部风电机组的互补性,有利于降低风电场的出力变化率。

#### 3.3 风电场群及风电基地的出力特性分析

风电场群和风电基地的出力特性主要受风电场间地理分散效应的影响。酒泉风电基地一期风电场分为4个风电场群,东西跨度约105 km,南北跨度约40 km。

考虑风速为12 m/s,则从不同方向吹过单个风电场群的时间约为14 min~49 min。考虑酒泉地区年平均风速为5.0 m/s~6.5 m/s,则从不同方向吹过风电场群的时间约为34 min~2 h,即单个风电场群出力变化的时间尺度达到了数十分钟到几个小时。风电场群中风电场的地理分散效应使得不同风电场风速到达高峰和低谷的时间不同,不同风电场的最大出力变化率出现时刻也不同,降低了风电场群在几个小时以下时间尺度内的出力变化率。即使考虑比较恶劣的情况,例如:风电场群风速从0上升到12 m/s,单个风电场群每分钟的出力变化率约为2.04%~7.14%,而对于整个酒泉风电基地,其每分

钟的出力变化率则约为0.69%~1.80%。

#### 3.4 长时间大面积来风时酒泉风电出力特性分析

虽然风电机组、风电场以及风电场群和风电基地分别能够在秒级、分钟级和小时级时间尺度内降低酒泉风电出力变化率,但是持续数小时的大面积来风(去风)容易导致风电基地的总出力大幅增加(减小),此时,风电场群和各个风电场的出力在变化趋势上也会表现出较大的相关性。

### 4 酒泉风电出力对电网的影响和要求

#### 4.1 酒泉风电对系统稳定性的影响

风电接入电网会对系统功角、频率以及电压稳定性产生不利影响<sup>[5]</sup>。酒泉风电基地的总出力变化率较小,因此常规电源和补偿装置能够及时对其进行响应,但是对于长时间的出力大幅变化,则需要较大的备用容量对其进行调峰。酒泉地区罕有破坏性风速,不会出现因风速过高而引起大范围风电机组切除问题,因此,酒泉风电对系统的动态稳定性影响相对较小。但是酒泉风电对电网暂态稳定性的影响较大,主要是风电机组的暂态性能(比如低电压穿越能力)对电网暂态稳定性影响较大<sup>[6-7]</sup>。

#### 4.2 酒泉风电基地调频问题不突出

即使在比较恶劣的情况下,酒泉风电基地每分钟的出力变化仅约为额定装机容量的0.69%~1.8%。而实际运行数据表明,风电场群出力变化率在每分钟0~1.5%之间的概率约为99%。考虑到2010年风电装机容量不到甘肃电网开机容量的一半,风电波动引起的系统负荷变化率小于每分钟0.9%,根据电网公司一次调频运行管理规定,一次调频的负荷响应滞后时间小于8 s,负荷调整幅度在15 s内达到理论计算最大调整幅度的90%,因此,近期内短时间的系统调频可由机组的一次调频自动完成,对于长时间的频率变化,可由二次、三次调频结合一次调频进行频率调整。

#### 4.3 酒泉风电对调峰的影响和要求

酒泉风电基地出力波动范围大,对于长时间的出力大幅变化,需要配备较大的调峰容量。酒泉风电基地总出力变化率小,对调峰电源的出力调整速率要求低,目前国内外超临界燃煤火电机组的调峰深度可达50%以上,出力调整速率约为每分钟3%~5%<sup>[8-9]</sup>,而水电机组则可以实现从0~100%额定容量的快速调峰,因此常规电源均可满足风电的调峰要求。考虑到酒泉地区的资源条件和调峰的经济性,配套建设一定规模的火电可以满足风电的调峰要求<sup>[10]</sup>。

## 5 结论

1)酒泉风电出力具有明显的波动性和随机性,风电出力变化范围大,相邻日出力具有不确定性。

2)理论分析和实际运行数据表明:风电机组、风电场、风电场群的出力在短时间尺度下存在互补性,酒泉风电基地的总出力变化率不大;但是在长时间尺度下,风电出力则表现出相关性,酒泉风电总出力变化范围大,且常持续较长时间,最多可持续数日。

3)酒泉风电对电力系统动态稳定的影响相对较小,但是受风电机组性能影响,酒泉风电的接入对电力系统暂态稳定的影响较大。

4)酒泉风电对系统调频要求相对较低,现有系统能够满足短时间内的调频需要;酒泉风电要求系统配置大量的调峰容量,由于酒泉风电基地总出力变化率较小,常规电源基本能够满足风电调峰的需要,适宜配套建设火电基地用于风电调峰。

附录见本刊网络版(<http://aeaps.sgepri.sgcc.com.cn/aeaps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 汪宁渤. 甘肃酒泉千万千瓦风电基地面临的挑战与应对措施. 电网与清洁能源, 2009, 30(7): 43-47.  
WANG Ningbo. Challenges and countermeasures of Jiuquan 10 million kilowatts wind power base in Gansu. Power System and Clean Energy, 2009, 30(7): 43-47.
- [2] 闫广新, 晁勤, 刘新刚, 等. 并网型双馈风电机组动态稳定性仿真. 电网技术, 2007, 31(24): 63-65.  
YAN Guangxin, CHAO Qin, LIU Xingang, et al. Dynamic stability simulation of double-fed wind generator connected into power grid. Power System Technology, 2007, 31(24): 63-65.
- [3] 何世恩, 崔岗, 李晓虎, 等. 电网约束条件下的风电运行//2009年甘肃省电机工程学会学术年会论文集, 2009年9月24-25日, 兰州.
- [4] LUO Changling, BANAKAR H, SHEN Baik, et al. Strategies

- to smooth wind power fluctuations of wind turbine generator. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 341-349.
- [5] 常勇, 徐政, 郑宇平. 大型风电场接入系统方式的仿真比较. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 70-75.  
CHANG Yong, XU Zheng, ZHENG Yuping. A comparison of the integration types of large wind farm. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 70-75.
- [6] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华, 等. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 10-14.  
CHI Yongning, WANG Weisheng, LIU Yanhua, et al. Impact of large scale wind farm integration on power system transient stability. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 10-14.
- [7] 甘肃省电力公司. 甘肃电网接纳风电能力研究[R]. 兰州: 甘肃省电力公司, 2009.
- [8] 梁维燕, 关寿义. 国产引进优化型 600 MW 火电机组的设计和制造. 中国电力, 1999, 32(10): 52-54.  
LIANG Weiyan, GUAN Shouyi. Design and manufacturing of indigenous imported optimized type 600 MW thermal generating unit. Electric Power, 1999, 32(10): 52-54.
- [9] 谢俊, 白兴忠, 甘德强. 水电/火电机组调峰能力的评估与激励. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(11): 2079-2084.  
XIE Jun, BAI Xingzhong, GAN Deqiang. Evaluating and inciting of hydro/thermal generating unit peak load regulation. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(11): 2079-2084.
- [10] 肖创英, 汪宁渤, 丁坤, 等. 甘肃酒泉风电功率调节方式研究. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1-7.  
XIAO Chuangying, WANG Ningbo, DING Kun, et al. System power regulation scheme for Jiuquan wind power base. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 1-7.

肖创英(1961—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向: 电力战略管理及系统规划。

汪宁渤(1965—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向: 系统规划。E-mail: wangnb@gs.sgcc.com.cn

陟 晶(1985—),男,硕士,主要研究方向: 新能源及其并网技术、FACTS 技术。

## Power Characteristics of Jiuquan Wind Power Base

XIAO Chuangying<sup>1</sup>, WANG Ningbo<sup>2</sup>, ZHI Jing<sup>2</sup>, DING Kun<sup>2</sup>

(1. Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China;

2. Wind Power Technology Center of Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Jiuquan Wind Power Base (JQWPB) is the first 10 GW-level pilot wind power base in the world, whose construction is the first successful attempt to exploit wind energy in large scale and far away from the load center. By using the gauged wind resources data and the recent energy management system (EMS) operating data from the dispatching department, an analysis is made of the characteristics of wind power resources, and investigations are performed on the power characteristics of wind turbine generator, wind farm, wind farm cluster and the entire JQWPB. By comparing the wind power characteristics in different time scales, it has been found that the output power of the JQWPB has clear relevance to long time scale and is obviously complementary for short time scale. Also treated is the effect of wind power characteristics on power grid stability, peak load regulation and frequency control.

**Key words:** Jiuquan Wind Power Base in Gansu; power characteristics; frequency control; peak load regulation; stability of power grid

附录 A

北大桥风电场群和干河口风电场群风速上升时, 各风电场群的出力以及总出力如图 A1 所示, 各风电场群的出力变化率以及总出力变化率如图 A2 所示。总出力变化率超过 10%/10min 的时间只占爬坡时间的 14%。

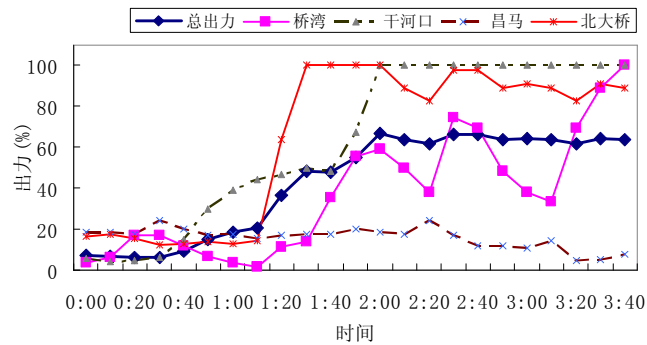


图 A1 风电出力曲线  
Fig.A1 Curve of wind power generation

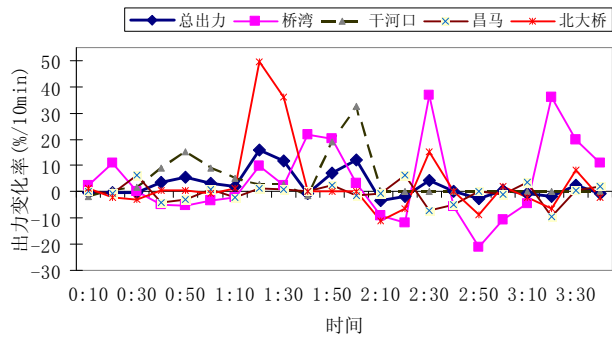


图 A2 风电出力变化率  
Fig.A2 Change rate of wind power generation

昌马风电场群和干河口风电场群风速下降时, 各风电场群的出力以及总出力如图 A3 所示, 各风电场群的出力变化率以及总出力变化率如图 A4 所示。风电基地总出力变化率超过 3%/10min 的时间只占总时间的 19%。

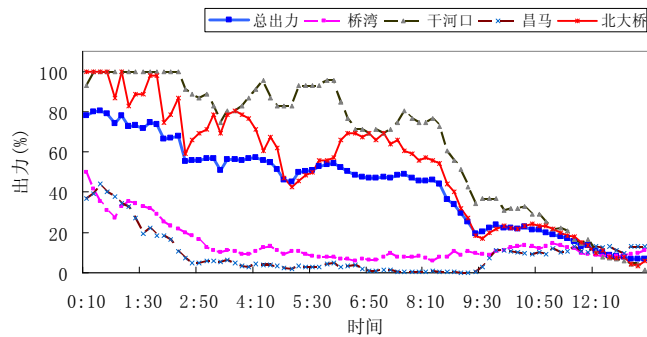


图 A3 风电出力曲线  
Fig.A3 Curve of wind power generation

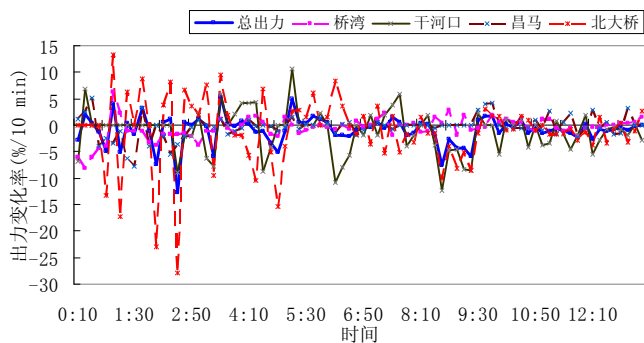


图 A4 风电出力变化率  
**Fig.A4 Change rate of wind power generation**

# 附录 B

图 B1 为酒泉风电基地典型的 200MW 风电场内部风电机组分布及接线图。

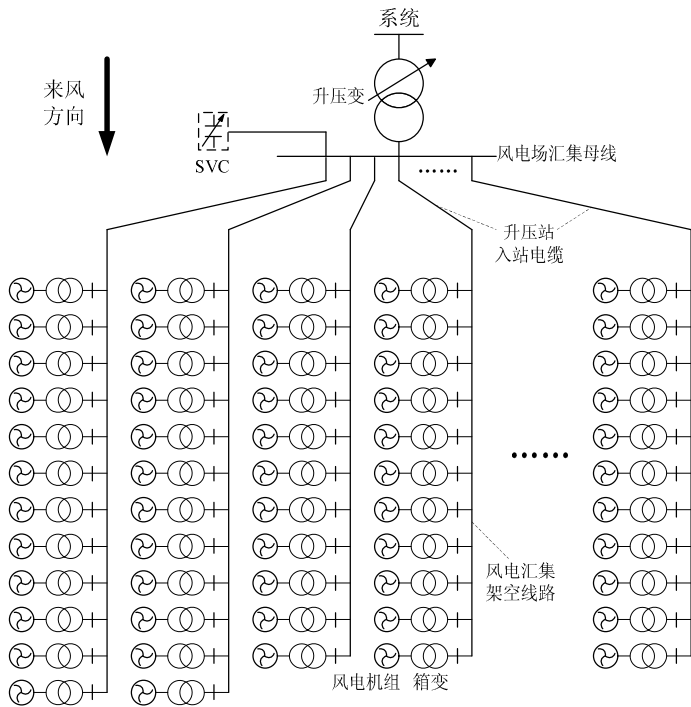


图 B1 1.5MW 风电机组组成的 200MW 风电场方形分布图  
**Fig.B1 Square distribution of a 200MW wind farm composed by 1.5MW wind power units**