

风电系统及其电压特性研究

潘文霞¹, 陈允平², 沈祖诒¹

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 武汉水利电力大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要 基于风力发电机和配电网的特点, 对不同风速和系统连接阻抗条件下的风电系统电压特性进行了研究. 文章还对风力发电机组并网和脱网情况下风电系统的电压变化进行了仿真. 研究结果对风电场的规划及安全运行具有指导意义.

关键词 风能; 风力发电; 风电场; 电力系统

中图分类号 TM71 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2001)01-0088-05

风力发电, 以其优越的无污染和可再生性日益受到人们的广泛重视. 我国是一个风力资源丰富的国家. 据研究资料介绍, 全球可开发利用的风能达 2×10^{10} kW, 而我国大陆地区就有 2530×10^5 kW. 可见, 风能资源的合理开发和利用, 无论从经济效益还是社会效益上都将巨大的. 从 80 年代开始, 50 W ~ 200 W 的微型风力发电机组在我国相继投产, 作为边远地区的独立电源, 解决了边远、沿海地区的生活用电. 近年来, 我国又从国外引进了一些大、中型风力发电机组, 建成了内蒙朱日和、新疆达板城、广东南澳等大型风力发电厂(单机容量已达 600 kW), 成为当地重要的能量来源. 按规划, 到 2000 年前, 我国风力发电容量将达到 1 000 MW, 一些中、大型风力发电厂也正在规划和建设之中.

大、中型风力发电厂多建在较为边远且风力资源丰富的地区, 并与当地的 10 ~ 110 kV 配电网直接并网, 组成风电系统. 基于风力发电厂和配电网的特殊性, 风电系统中风力发电厂及其附近地区的电压特性值得人们注意和研究.

1 风电场和风电特性

1.1 风电场

为了获得更多的电能, 通常采用多台风力发电机组, 按一定规律组成风力机群, 并通过升压变压器向系统供电. 这样的风力发电厂, 也称风电场或风力田. 风电场是大、中型风力发电厂的主要形式, 也是风力发电的重要发展方向. 风电场的发电主设备为风力发电机组. 风力发电机组由风力机、异步发电机和机端补偿电容器组三部分组成, 见图 1.

1.2 风电特性

风能作用于风力机的叶片上, 作为风力发电机的原动力. 为了较精确地描述风能的随机性和间歇性的特点, 通常用四种成分的风速来模拟: 基本风 V_A 、阵风 V_B 、渐变风 V_C 和随机风 V_D ^[2].

a. 基本风. 可以由风电场测风所得的威布尔(Weibull)分布参数近似确定:

$$V_A = A \cdot \Gamma(1 + 1/K)$$

式中: V_A ——基本风速, m/s; A, K ——威布尔分布的尺度参数和形状参数; $\Gamma(\cdot)$ ——伽马函数.

b. 阵风. 描述风速突然变化的特性一般用阵风来表示.

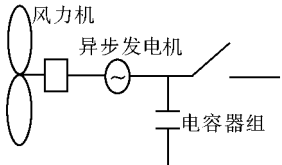


图 1 风力发电机组
Fig.1 Wind turbine

$$V_B = \begin{cases} 0 & t < T_{1G} \\ V_S & T_{1G} \leq t < T_{1G} + T_G \\ 0 & t \geq T_{1G} + T_G \end{cases}$$
$$V_S = (\max G/2) \{1 - \cos[2\pi(t/T_G) - (T_{1G}/T_G)]\}$$

式中 $V_B, T_G, T_{1G}, \max G$ 分别为阵风风速 (m/s)、周期 (s)、启动时间 (s) 和重大值。

c. 渐变风. 对风速的渐变特性可以用渐变风成分来模拟。

$$V_C = \begin{cases} 0 & t < T_{1R} \\ V_r & T_{1R} \leq t < T_{2R} \\ \max R & T_{2R} \leq t < T_{2R} + T_R \\ 0 & t \geq T_{2R} + T_R \end{cases}$$
$$V_r = \max R \{1 - (t/T_{2R})(T_{1R} - T_{2R})\}$$

式中 $V_C, \max R, T_{1R}, T_{2R}, T_R$ 分别为渐变风风速 (m/s)、最大值 (m/s)、起始时间 (s)、终止时间 (s) 和保持时间 (s)。

d. 随机风. 风速变化的随机特性可用随机噪声风速成分来表示。

$$V_D = 2 \sum_{i=1}^N [S_i(\omega_i) \Delta \omega]^{1/2} \cos(\omega_i + \varphi_i)$$
$$\omega_i = (i - \frac{1}{2}) \cdot \Delta \omega$$
$$S_i(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi [1 + (F \omega_i / \mu \pi)^2]^{4/3}}$$

式中 φ_i —— $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的随机变量; K_N ——地表粗糙系数; F ——扰动范围, m^2 ; μ ——相对高度的平均风速, m/s 。

综合上述四种风速成分, 模拟实际作用在风力机上的风速为

$$V = V_A + V_B + V_C + V_D$$

由于本文仅对正常工作和关停机情况进行讨论, 故只考虑平均风和随机风的作用。

风力机的叶片吸收风能, 并将其转变为机械运动, 直接或经过增速机构带动发电机发电。并网的风力发电机的输出功率主要取决于风速, 具体地说取决于厂家提供的功率曲线, 如图 2。

大型风电场的风力发电机几乎都是异步发电机, 在其并网运行时需从电力系统中吸收大量无功功率, 所以机端一般配备有电容器组, 以减轻电网的无功负担, 提高电网运行质量及降低成本。根据异步发电机的运行特点, 在风速及风力机输出功率变化时, 其注入电网的有功功率和吸收的无功功率也会有所改变, 引起风电场母线及附近电网电压的波动。风力发动机组并网和脱网等操作时也可能对电网电压造成冲击, 影响供电质量。

2 风电系统及风场电压特性的研究

根据风电场的上述特点, 对以下两种情况下的电压特性进行研究。

2.1 正常运行时风电场的电压

2.1.1 模型

风电场通常与地方配电网并网运行, 可以简化等值为图 3 电路。节点电压功率满足下式:

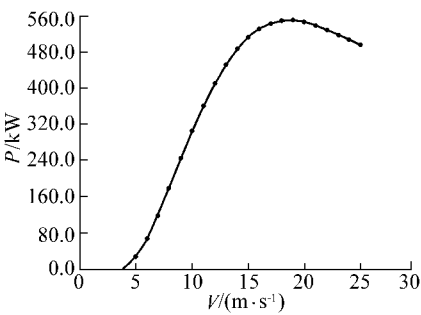


图 2 风力发电机的功率曲线
Fig.2 Power curve of wind turbine

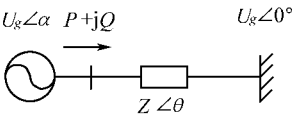


图 3 风电系统等值电路图
Fig.3 Equivalent circuit of wind and electric power system

$$\begin{cases} P = \frac{U_g^2}{Z} \cos \theta - \frac{U_s U_g}{Z} \cos(\theta + \alpha) \\ Q = \frac{U_g^2}{Z} \sin \theta - \frac{U_s U_g}{Z} \sin(\theta + \alpha) \end{cases}$$

式中: P ——风电场向系统提供的有功功率, kW; Q ——风电场向系统提供的无功功率, kVar; $U_s \angle 0^\circ$ ——等值系统节点电压, V; $U_g \angle \alpha$ ——风场高压母线节点电压, V; $Z \angle \theta$ ——风场至系统线路和升压变的等值阻抗。

2.1.2 计算结果及分析

设某风电场有 40 台 500 kW 风力发电机, $\dot{U}_s = 1 \angle 0^\circ$. 平均风速从 7 m/s 到 19 m/s 变化, 考虑 $Z \angle \theta$ 的影响, 风电场母线电压变化如图 4.

a. 当风场平均风速加大, 输入系统的有功功率增加, 风电场母线电压开始有所降低, 然后升高. 这是因为当风场输入功率较小时, 输入有功功率引起的电压升数值小, 而吸收无功功率引起的电压降大. 当风场输入功率增大时, 输入有功引起的电压升数值增加较大, 而吸收无功功率引起的电压降增加较小. 如果考虑机端电容补偿, 则风电场的电压增加, 如图 4 中的曲线 4 所示.

b. 当系统连接阻抗变化, 例如导线规格和回路数等参数不同, 将影响风电场电压变化的范围. 三种不同连接阻抗的计算结果如图 4 曲线 1~3 所示. 当导线截面较小, 回路数较少时, 电阻就成为引起电压变化的主要原因.

由此可见, 风电场风速条件变化将引起风电场及其附近的电压波动. 特别是当风电场与系统间等值阻抗较大时, 这种影响极为明显. 根据国际电工标准(IEC)规定, 配电网中的电压波动应不超过 3%. 因此, 风电场电压的这一特性在规划和设计时值得注意. 在本例中, $Z_* = 0.155 + j0.230$ 即可.

2.2 风力发电机与系统并网或脱网对电网电压的冲击

2.2.1 模型

当研究风力发电机组并网和脱网过程时, 模型的建立需要在 2.1.1 模型的基础之上增加下面几个方程:

a. 风力发电机输入与输出转矩方程:

$$\frac{dM_m}{dt} = \frac{1}{T_W} (M_W - M_m)$$

式中: M_m ——发电机侧机械转矩, p.u.; M_W ——叶片侧机械转矩, p.u.; T_W ——风力发电机惯性时间常数, s.

b. 异步发电机的定子电压方程:

$$\dot{\dot{U}}_g = -(r_1 + jx') \dot{\dot{I}}_e + E'$$

式中: $\dot{\dot{U}}_g$, $\dot{\dot{I}}_e$, r_1 ——发电机定子电压、电流和电阻, p.u.; x' , E' ——异步发电机暂态电抗和电势, p.u..

c. 异步发电机转子电磁暂态方程:

$$T'_{d0} \frac{dE'}{dt} = -E' - (x - x') \dot{\dot{I}}_e - jsT'_{d0} 2\pi f_0 E'$$

其中

$$x = x_1 + x_m$$

式中: T'_{d0} ——定子绕组开路时转子绕组的时间常数, s; s ——异步发电机滑差; x_1 , x_m ——发电机定子漏抗和激磁电抗, p.u.; f_0 ——系统频率, Hz.

d. 异步发电机的转子运动方程:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j(1-s)} (P_e - P_m)$$

式中: P_e , P_m ——发电机的电磁功率和机械功率, p.u.; T_j ——异步发电机惯性时间常数, s.

e. 异步发电机电磁功率方程:

$$P_e = R_e (\dot{\dot{E}}' \dot{\dot{I}}_e)$$

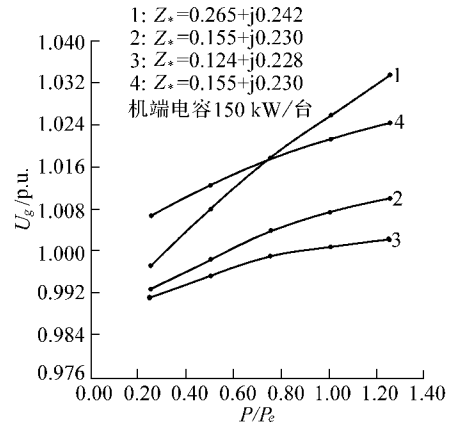


图 4 风电场母线电压变化

Fig.4 Bus voltage variation of wind farm

式中 $R_e(\cdot)$ 为取实部.

f. 机端补偿电容电流方程：

$$\dot{I}_c = j2\pi f_0 \dot{U}_g = \dot{I}_e - \dot{I}_g$$

式中 $\dot{I}_g$ ——系统注入风电场的电流 p.u..

2.2.2 计算结果及分析

利用电力系统分析综合程序及以上述模型为基础的用户接口程序对风电场的并网和脱网进行仿真计算.

a. 并网计算. 当风电场平均风速大于风力发电机组的启动风速时, 风机便开始转动, 转速不断升高. 当转速接近同步转速时, 风电机组并入电网运行. 某系统接线如图 3, $Z_* = r_* + jx_* = 0.155 + j0.230$, 风场平均起始风速为 4.5 m/s, 以 500 kW 异步发电机典型参数为例, 6 台风力发电机组同时直接并网会造成电网电压骤降, 单台机组并网则对电网电压的冲击较小, 且并网过程至少到 30 s 以后才基本消失, 见图 5、图 6. 计算和分析表明, 并网时风电场机端若能提供瞬时无功, 则对地方电网的冲击将大大减轻. 图 7 中的计算结果是有机端 150 kVar/台无功补偿和冲击无功补偿时的情况. 因为此时, 从系统注入风电场异步电机的启动电流大大减小, 仅约为原来的 1/10.

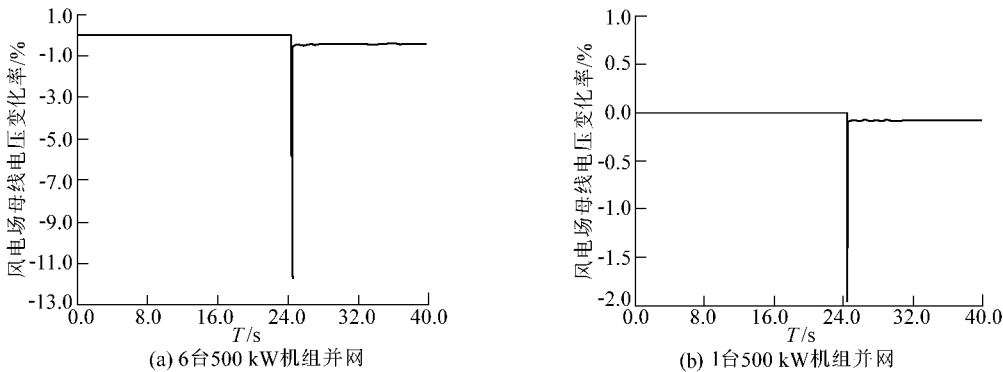


图 5 机组并网时风电场母线电压变化

Fig.5 Bus voltage variation of wind farm in connection

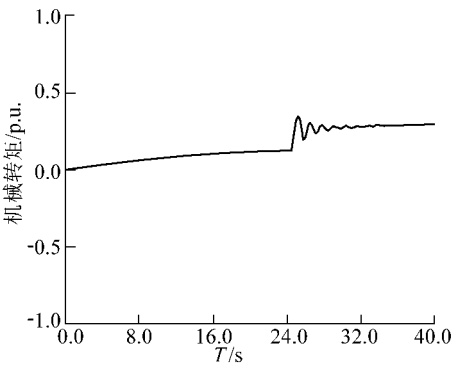


图 6 风力发电机组并网过程中机械
转矩的变化 ($t = 24.5$ s 并网)

Fig.6 Torque variation of wind farm in
connection with one wind turbine

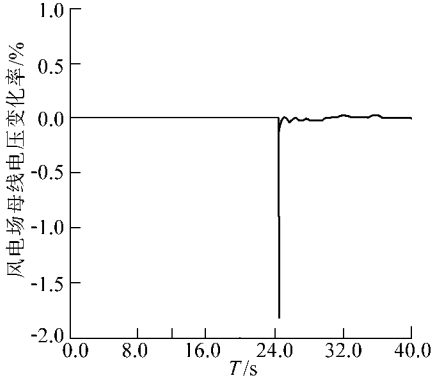


图 7 6 台 500 kW 机组并网有机端
电容补偿时风电场母线电压变化

Fig.7 Bus voltage variation of wind farm in connection
with six wind turbines with reactive power compensation

b. 脱网计算. 当风速迅速增大或此时发生系统故障, 以致风力发电机组被迫脱网时, 也会产生电网电压突降. 机端较多的电容补偿由于抬高了脱网前风电场的运行电压, 从而引起了更大的电网电压下降, 如图 8. 电网电压的这种突变将大大影响风电场附近的供电质量.

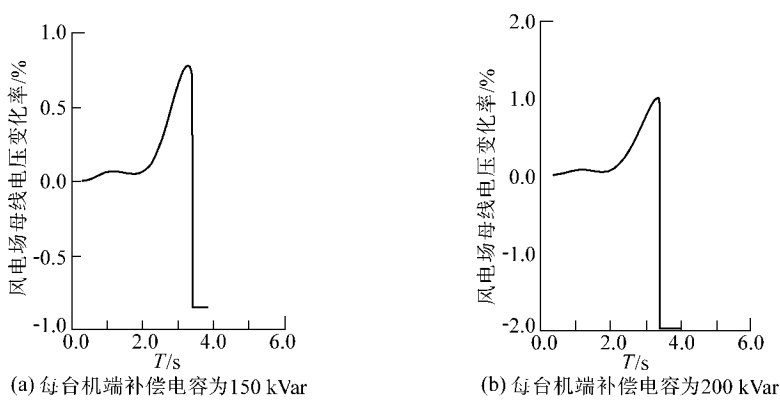


图 8 脱网时的母线电压变化

Fig.8 Bus voltage variation in disconnection from the network

3 结 论

本文通过对风电场在若干情况下电压问题的研究表明：

a. 风电场注入系统功率较大时 ,风电场母线及附近地区的电网电压升高 ,尤其当风电场与系统间等值阻抗数值较大时 ,电压升高极为严重 .

b. 多台风力发电机组的并网需分组进行 ,且间隔时间不应小于 30 s ,否则可能引起 10% 以上的电压骤降 ,适当的冲击电容补偿可以减小多台风力发电机并网时的电压降低 .

c. 风电场风速增大等情况引起的脱网可能会造成风电场附近地区的电压突降 ,机端较多的电容补偿将引起更大的电压下降 .

综上所述 ,大型风电场及附近地区的电压存在波动变化大的特点 ,必须予以高度重视 ,在今后的设计和运行过程中应采取措施 ,努力提高供电质量 .

参考文献：

[1] 严陆光 ,倪受元 ,李安定 ,等 .太阳能与风力发电的现状与发展 [J]. 电网技术 ,1995 (5) :1 ~ 9 .

[2] 吴学光 .风电接入系统的规划方法及其动态特性和穿透极限研究 [学位论文] D]. 北京 :电力部电力科学研究院 ,1996 .

A Study on Wind Power System Voltage Behaviour

PAN Wen-xia¹ , CHEN Yun-ping² , SHEN Zu-yi¹

(1. College of Electrical Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 ,China ;

2. Dept . of Electrical Engineering , Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering , Wuhan 430072 ,China)

Abstract :On the basis of the characteristics of wind turbine induction generators and distribution network ,the wind power system voltage behaviour is studied for different wind speeds and contact impedances .Simulation is also made of the connection with and disconnection from the power system .The results are of directive significance to wind farm planning and safe operation .

Key words :wind energy ;wind power ;wind farm ;electrical power system