

风电场接入电力系统容量的研究

李强¹, 张洋², 宋晓凯¹

(1.河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052; 2.华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 为了确定给定电网允许接入的风电场最大装机容量, 提出应用稳态分析和暂态校验相结合的方法。在稳态分析中对风电场的处理采用根据风速确定有功, 根据有功和节点电压初值确定无功的方法, 能够准确反映风电机组的无功电压特性; 在暂态校验中考虑了阵风、渐变风及系统故障方式的影响, 确定能使系统保持暂态稳定的风电场容量; 对实际电力系统的仿真计算结果表明, 利用所提方法确定的风电场最大接入电力系统容量, 可以保证风电场自身及系统运行的稳定性。

关键词: 电力系统; 风电接入; 异步发电机; 潮流计算; 阵风扰动

Researches on the capacity of wind power integration into power system

LI Qiang¹, ZHANG Yang², SONG Xiao-kai¹

(1. Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. North China University of Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: In order to determine the maximum installed capacity of wind power integration into certain power grid, a computing method that applying steady analysis and transient check computation is presented. The processing of wind farm node is to compute the active power according to the given wind speed, then to compute the reactive power according to the active power and voltage initial value, which reflects its reactive power-voltage character accurately in steady analysis, the disturbance of gust, graded wind and system-down are all considered in transient check computation to determine the wind power plant capacity. According to the simulation results of an actual power system, the maximum capacity of wind power integration into power system that calculated using the above method can ensure the stability of power grid and the stability of wind farm itself.

Key words: power system; wind power integration; induction generator; power flow calculation; gust disturb

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)16-0020-05

0 引言

风电场通常处于电网末端, 电网网架结构薄弱, 大规模风电接入电网后会改变系统潮流分布^[1-4]、出现电网电压水平下降^[5,6]、系统短路容量增加、系统暂态稳定性改变等一系列问题^[7]。

本文对风电接入电力系统规划阶段需要解决的首要问题——确定给定电网中允许接入的风电场最大容量进行了研究。提出了一种利用稳态分析和暂态校验相结合确定风电场最大接入系统容量的方法。对某实际含风电场的电力系统进行仿真的结果表明: 按照本文提出的方法确定的风电接入系统容

量可保证电力系统运行的稳定性及风电场自身的稳定性。

1 稳态分析法

1.1 潮流计算中对风电场的处理方法

分析含风电场的电力系统稳态运行特性, 需要以潮流计算作为分析工具。本文主要研究采用笼型异步发电机的风电场接入电力系统容量问题。笼型异步发电机为固定转速风电机组, 具有特有的功率特性, 即风电场节点的电压和无功功率均为待求量, 不能简单地设为 PQ 节点或 PV 节点, 因而在潮流计算中需对风电场节点进行一定的处理^[8,9]。

风电机组的功率特性曲线一般由风机制造厂商随风机提供给用户, 也可以通过实测得到, 在计算中可以用分段函数表示, 如式(1)所示。

基金项目: 河南省教育厅自然科学研究计划项目
(2008B470003)

$$P_M = \begin{cases} 0, & v < v_{\text{cut-in}} \\ \frac{v - v_{\text{cut-in}}}{v_r - v_{\text{cut-in}}} P_r, & v_{\text{cut-in}} < v < v_r \\ P_r, & v_r < v < v_{\text{cut-out}} \\ 0, & v > v_{\text{cut-out}} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $v_{\text{cut-in}}$ 和 $v_{\text{cut-out}}$ 分别表示风机的切入风速和切出风速, v_r 是风电机组的额定风速, P_r 是风电机组的额定有功出力, P_M 是不同风速时风电机组的有功输出。

根据文献[10]的研究结果知, 当笼型异步发电机有功功率已知时, 其吸收的无功功率是机端电压的函数, 解析式为

$$Q_M = \sqrt{r_0^2 - (P_M - P_0)^2} + Q_0 \quad (2)$$

$$\text{式中: } \begin{cases} r_0 = V_t^2 \frac{x_m + x_s - x'}{2(r_s^2 + (x_m + x_s)x')} \\ P_0 = -V_t^2 r_s / [r_s^2 + (x_m + x_s)x'] \\ Q_0 = -V_t^2 \frac{x_m + x_s + x'}{2(r_s^2 + (x_m + x_s)x')} \end{cases}$$

式(2)中: P_M 和 Q_M 分别为笼型异步发电机的有功和无功功率; P_0 、 Q_0 和 r_0 分别表示有功和无功所在圆的圆心坐标和半径, 均为笼型异步发电机参数和端电压的函数; $x' = x_s + x_m x_r / (x_m + x_r)$, x_m 为激磁支路电抗, r_s 和 x_s 分别为定子电阻和电抗, x_r 为转子电抗。

当风电场的风速已知, 可以求出每台风电机组的有功功率, 风电场的功率等于所有风电机组的功率之和, 表达式为

$$\begin{cases} P_f = \sum_{i=n1}^{n2} P_i(v_i) \\ Q_f = \sum_{i=n1}^{n2} Q_i(P_i, V_f) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: 下标带 i 的参数分别为第 i 台风电机的参数, 下标带 f 的参数表示风电场的参数。 P 、 Q 、 v 、 n 、 $n1$ 、 $n2$ 分别表示有功、由式(1)计算出的无功、风速、节点数、风电机组起始编号、风电机组终止编号。

在牛顿-拉夫逊潮流计算法中, 风电场的有功和无功功率按式(3)计算, 潮流雅可比矩阵中风电场节点的无功增量对电压的偏导数按式(4)进行修正:

$$L_{ff} = \frac{\partial \Delta Q_f}{\partial V_f} V_f = \frac{\partial Q_f}{\partial V_f} V_f -$$

$$V_f \sum_{\substack{j \in f \\ j \neq f}} V_j (G_{ff} \sin \theta_{ff} - B_{ff} \cos \theta_{ff}) + 2V_f^2 B_{ff} \quad (4)$$

式(4)中: V_f 为风电场母线电压幅值;

$$\frac{\partial Q_f}{\partial V_f} V_f = \sum_{i=n1}^{n2} 2 \frac{(Q_i - Q_{0i})a_{2i} + (P_i - P_{0i})a_{1i} + r_{0i}a_{3i}V_f^2}{Q_i - Q_{0i}}$$

$$a_{1i} = -\frac{r_{si}}{r_{si}^2 + (x_{mi} + x_{si})x'_i};$$

$$a_{2i} = -\frac{x_{mi} + x_{si} + x'_i}{2(r_{si}^2 + (x_{mi} + x_{si})x'_i)};$$

$$a_{3i} = \frac{x_{mi} + x_{si} - x'_i}{2(r_{si}^2 + (x_{mi} + x_{si})x'_i)}.$$

1.2 含风电场的电力系统潮流计算步骤

1.2.1 给定节点电压初值;

1.2.2 由风速根据式(1)确定每台风电机的有功出力, 根据式(2)由电压初值 $V^{(0)}$ 、风电机组有功出力和风电机组参数计算每台风电机的无功值, 并由式(3)求风电场总的有功和无功功率;

1.2.3 由电压初值 $V^{(0)}$, $\theta^{(0)}$ 求修正方程式的常数项和雅可比矩阵元素;

1.2.4 根据式(4)修改雅可比矩阵中风电场节点对应的对角线元素;

1.2.5 求解修正方程, 得出电压修正量 ΔV 和 $\Delta \theta$, 并修正各点电压;

1.2.6 校验是否收敛, 若收敛, 结束计算, 否则以修正后电压为初值, 转回第 1.2.2 步进行下一步迭代。

1.3 确定稳态时风电场最大接入容量

当风电场接入系统后, 为保证系统稳态电压水平, 按上述方法对包含风电场在内的全系统进行潮流计算: 计算中, 不断增加风电接入容量, 在风电场升压站内可进行无功补偿, 达到控制风电场并网点电压在额定电压的 $-5\% \sim +5\%$ 的目标。从而得到能够使并网电压合格的一个最大风电接入容量值, 即为稳态时风电场最大接入容量。

2 暂态校验法

采用电力系统综合分析程序 (PSASP) 进行计算, 计算中, 不断增加风电接入容量, 考虑系统受到不同的扰动情况, 观察系统和风电场的动态稳定性的变化, 找到能够使系统和风电场都保持动态稳定的最大风电接入容量, 即为暂态时风电场最大容量。

2.1 校验要求

2.1.1 考虑典型风速扰动, 系统、风电场保持频率稳

定、电压稳定；

2.1.2 考虑系统故障方式，系统、风电场保持频率稳定、电压稳定。

2.2 校验所采用的风速扰动与故障方式

2.2.1 阵风扰动 1：正常方式下运行于额定风速，阵风 3 s 启动，8 s 结束，阵风风速由额定风速升高到切出风速；

2.2.2 阵风扰动 2：正常方式下运行于额定风速，阵风 3 s 启动，8 s 结束，阵风风速由额定风速降低到切入风速；

2.2.3 渐变风 1：正常方式下运行于额定风速，渐变风 2 s 启动，4 s 风速升至切出风速，之后保持 8 s 结束；

2.2.4 渐变风 2：正常方式下运行于额定风速，渐变风 2 s 启动，4 s 风速降至切入风速，之后保持 8 s 结束；

2.2.5 故障方式 1：风电场附近重要线路发生三相短路接地故障后 0.12 s 切除故障线路。

3 算例分析

为说明本文所提方法的可行性，下面给出实际算例进行说明。算例系统为我国某实际含风电场的电力系统。系统接线如图 1 所示，系统中有 2 个发电厂，其中，节点 1 为规划建设的风电场，距离节点 4 约 7.8 km，拟投运单机容量为 750 kW 的新疆金风科技出厂的 S50-750 kW 型异步发电机组；节点 2 为系统等值机；系统中现有 110 kV 变电站 2 座，变电容量为 94.5 MVA，35 kV 公用变电站 4 座，变电容量 18.0 MVA。以下需要确定使系统和风电场在稳态和暂态情况下都保持稳定的风电场最大接入系统容量。算例计算过程如下：

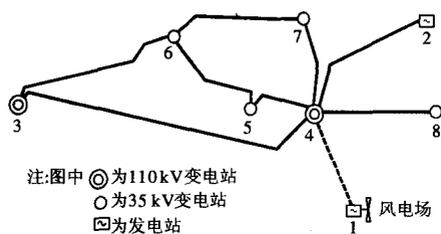


图 1 算例系统地理接线简图

Fig. 1 Geographic diagram of sample system

3.1 计算稳态运行时系统可接受的最大风电场容量

采用第 2 节所给出的方法进行潮流计算。风电场以 35 kV 电压等级接入，电压初始水平 0.97（标么），风电场无功补偿度按风电接入容量的 30% 配置。计算结果见表 1。

对表 1 进行分析：风电场以 35 kV 电压等级接入系统后，系统受到的影响随风电场容量的不同而不同：风电接入系统容量逐渐增加，当达到 22.5 MW 时，系统并网点（图 1 中节点 4）电压降低，升压站主变功率因数明显下降（0.91）。在风电场无功补偿度达到 30% 时，并网点电压、功率因数基本可以满足要求。风电场容量为 30 MW 时，在升压站无功补偿度达到 30% 时，并网点电压、功率因数低于 0.95，不满足要求。因此，在风电场升压站无功补偿度达到 30%，系统稳态所能接受的最大风电场容量为 25~30 MW。

表 1 风电接入系统计算结果

Tab. 1 Calculation results of wind power integration

风电场接入容量/MW	风电场有功出力/MW	升压站无功补偿投入/Mvar	无功补偿度	并网点母线电压/p.u.	升压站主变功率因数
0	---	---	---	0.97	---
20	19.1	6	30%	0.95	-0.99
22.5	21.1	0	0	0.90	-0.91
22.5	21.4	6.75	30%	0.95	-0.99
25.0	23.8	7.5	30%	0.96	-0.99
30.0	27.8	9	30%	0.94	-0.94

3.2 暂态校验法计算系统可接受的最大风电场容量

1) 风电接入容量小于或等于 21 MW 时，阵风扰动（由额定风速 14 m/s 降至切入风速 4 m/s）。并网点电压动态特性曲线见图 2、风电场输出特性曲线见图 3、系统稳定性曲线见图 4。

从图 2 可见：阵风 3 秒启动后，并网点（图 1 中节点 4）电压存在一定幅度的波动，8 s 后逐渐恢复扰动前电压水平，故并网点电压稳定；从图 3 可见：阵风 3 s 启动后，风电场有功输出急剧减少至 0，6 s 后又逐渐增加至扰动前水平，风电机组的转差率在扰动前后和扰动期间都没有明显变化，故风电场也是稳定的；从图 4 可见：系统的频率基本保持在额定值、系统机组的相对功角在扰动期间有小幅变化，扰动后保持不变，故系统是稳定的。因此，在阵风扰动 2 方式下，风电场和系统都能保持暂态稳定。

这三个图给出的是风电接入容量为 21 MW 的情况，小于 21 MW 的情况与之类似。

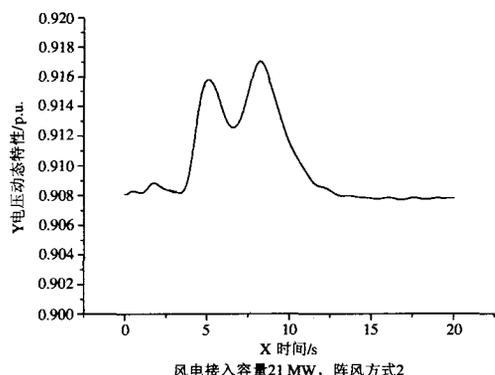


图2 电压动态特性曲线(风电接入 21 MW、阵风扰动 2)
Fig.2 Dynamic curve of voltage(21MW wind power injected,gust disturb2)

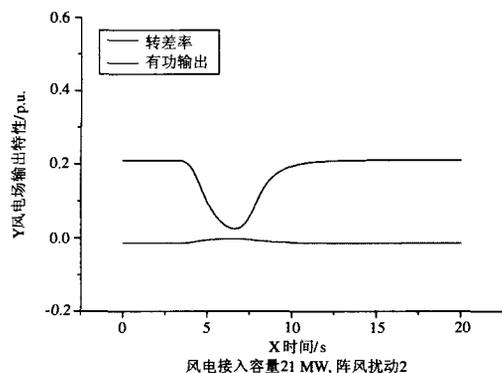


图3 风电场输出特性(风电接入 21MW、阵风扰动 2)
Fig. 3 Output characteristic of wind farm(21MW wind power injected, gust disturb2)

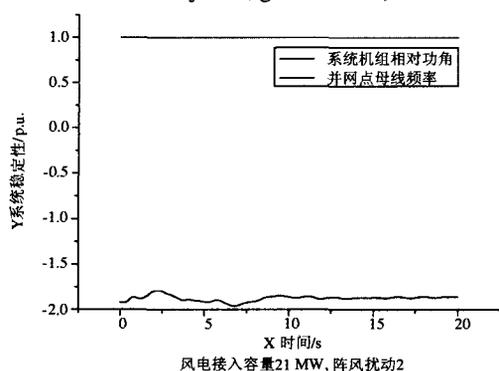


图4 系统稳定性(风电接入 21 MW、阵风扰动 2)
Fig. 4 Stability of system(21MW wind power injected, gust disturb2)

这一短暂时间内, 并网点电压急剧下降后又迅速上升, 经小幅波动后最终稳定在稍低于短路前的电压水平, 故并网点电压稳定; 从图 6 可见: 短路故障后风电场的有功输出不断减少, 不能恢复到扰动前的水平或达到新的稳定水平, 风电机组的转差率在短路故障后不断减小, 不能稳定在某值, 因此在短路故障 1 方式下, 风电场是不稳定的; 从图 7 可以看出: 短路后系统频率始终保持在额定值、系统机组的相对功角有大幅振荡, 切除故障后系统相对功角经小幅波动后达到一稳定值, 系统是稳定的。因此, 故障方式 1 时, 风电场失去暂态稳定、系统保持暂态稳定。

由暂态计算结果可知: 当风电接入容量小于或等于 21 MW 时, 系统和风电场在风速扰动(渐变风扰动时, 系统和风电场均稳定, 因篇幅有限, 曲线省略)和故障时均能保持稳定; 当风电接入容量大于或等于 22.5 MW 时, 系统和风电场在故障方式时, 系统稳定, 风电场不能保持稳定。故暂态可接受容量为 21MW。

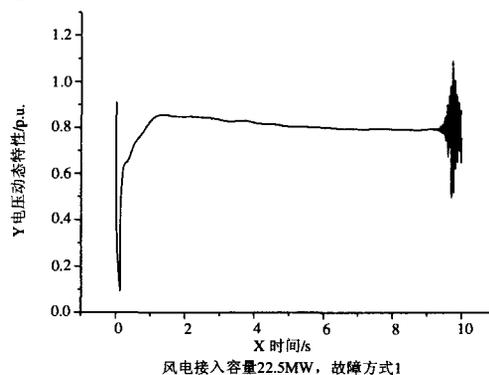


图5 电压动态特性(风电接入 22.5 MW、故障方式 1)
Fig. 5 Dynamic curve of voltage(22.5MW wind power injected, fault mode 1)

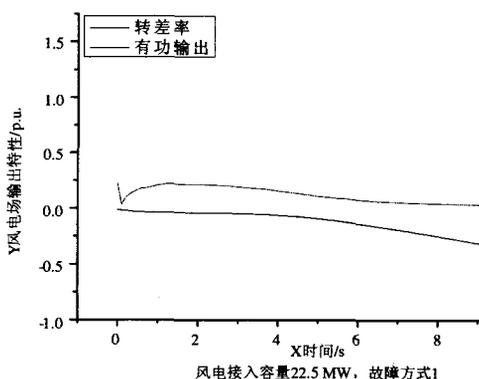


图6 风电场输出特性(风电接入 22.5 MW、故障方式 1)
Fig. 6 Output characteristic of wind farm(22.5MW wind power injected, fault mode 1)

2) 风电接入容量达到 22.5 MW, 节点 3 至节点 4 之间的 110 kV 线路故障。并网点电压动态特性曲线见图 5、风电场输出特性曲线见图 6、系统稳定性曲线见图 7。

从图 5 可见: 节点 3 至节点 4 之间的 110 kV 线路发生三相短路接地故障后 0.12 s 切除故障线路,

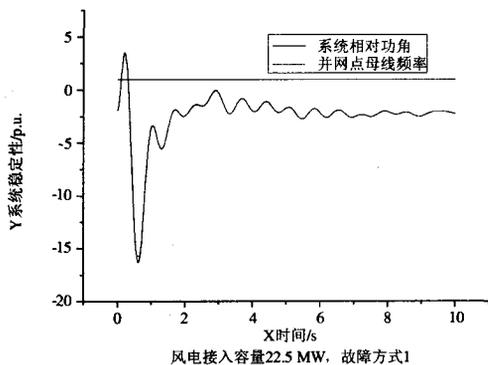


图7 系统稳定性(风电接入22.5 MW、故障方式1)

Fig. 7 Stability of system(22.5MW wind power injected, fault mode 1)

3.3 最终确定的系统可接受的最大风电场容量

通过稳态分析和暂态校验,可得算例系统最大接纳风电能力为:稳态可接受容量为25~30 MW;暂态可接受容量为21 MW。最终确定系统允许接入风电场的最大容量取最小值为21 MW,即28台单机容量为750 kW的风电机组。

4 结论

对算例系统中风电场最大接入容量的计算结果表明:

潮流计算中对风电场节点进行一定的处理,根据笼型异步发电机的有功功率和参数求解其无功功率,较准确地反映了其无功和电压特性。

风电接入容量受阵风、渐变风的影响较小,受系统故障的影响较大。在目前风电规模相对系统装机比例较小的情况下,系统故障方式是制约风电接入容量的主要障碍。

利用稳态分析法得出的系统最大接受风电容量值大于利用暂态校验法得出的容量值,说明必须对稳态计算出的结果进行校验,将稳态和暂态的分析方法结合起来,才能得出在不同风速变化和系统故障情况下,都使系统和风电场都有稳定的可靠风电接入容量值。

参考文献

- [1] 杨秀媛,梁贵书.风力发电的发展及其市场前景[J].电网技术,2003,27(7):78-79.
YANG Xiu-yuan, LIANG Gui-shu. Development of Windpower Generation and Its Market Prospect[J]. Power System Technology, 2003,27(7):78-79.
- [2] 王承煦,张源.风力发电[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [3] 雷亚洲,Gordon Lightbody.国外风力发电导则及动态模

型简介[J].电网技术,2005,29(12):27-32.

LEI Ya-zhou,Gordon Lightbody.An Introduction on Wind Power Grid Code and Dynamic Simulation[J].Power System Technology, 2005, 29(12):27-32.

- [4] 雷亚洲,王伟胜,印永华,等.含风电场电力系统的有功优化潮流[J].电网技术,2002,26(2):18-21.
LEI Ya-zhou,WANG Wei-sheng, YIN Yong-hua, et al.Optimal Real Power Flow in Wind Power Integrated System[J].Power System Technology,2002,26(2):18-21.
- [5] 孙涛,王伟胜,戴慧珠,等.风力发电引起的电压波动和闪变[J].电网技术,2003,27(12):62-66.
SUN Tao, WANG Wei-sheng, DAI Hui-zhu, et al. Voltage Fluctuation and Flicker Caused by Wind Power Generation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 62-66.
- [6] 吴俊玲,周双喜,孙建锋,等.并网风力发电厂的最大注入功率分析[J].电网技术,2004,28(20):28-32.
WU Jun-ling, ZHOU Shuang-xi, SUN Jian-feng, et al. Analysis on Maximum Power Injection of Wind Farm Connected to Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 28-32.
- [7] 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 Yong-ning,LIU Yan-hua,WANG Wei-sheng,et al.Study on Impact of Wind Power Integration on Power System[J]. Power System Technology, 2007, 31 (3): 77-81.
- [8] 王伟胜,申洪.电力系统潮流计算中风电场节点的考虑方法[J].华北电力大学学报,2002,29(96):150-153.
WANG Wei-sheng, SHEN Hong. The Method of Treating Wind Farm Node in Load Flow Calculation in Power Systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, 29(96): 150-153.
- [9] 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.
CHEN Shu-yong, SHEN Hong, ZHANG Yang, et al. Researches on the Compensation and Control of Reactive Power for Wind Farms Based on Genetic Algorithm[J].Proceedings of the CSEE,2005,25(8):1-6.
- [10] Barkle J E, Ferguson R W. Induction Generator Theory and Application[J]. IEE Trans on PAS,1954,(2):12-19.

收稿日期:2007-11-27; 修回日期:2008-01-09

作者简介:

李强(1980-),男,工程师,硕士,从事电力系统分析方面的科研工作。E-mail:tqliqiang@tom.com