

基于 PSS/E Wind 大型风电场并入输电网的动态特性研究

钱少锋¹, 林俐¹, 沈辉², 郑新才²

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206; 2. 商丘供电公司, 河南 商丘 476000)

摘要: 以 PSS/E 和风机软件包为平台, 建立了基于滑差可调绕线式异步风电机组的恒速恒频风电场模型, 并以 CIGRE B4-39 风电场并网系统标准模型为例, 研究了不同种风速扰动下的风电场动态特性, 分析了对于不同容量、不同并网点风电场在不同种故障点扰动下保持稳定运行的能力。研究表明, 扰动风速增量过大时, 风电场振荡加剧; 在一定容量范围内, 大容量风电场表现出更强的抗扰动能力; 同步发电机的调节作用对近区风电场稳定运行有明显改善的效果。

关键词: 风电场; PSS/E 风机软件包; 潮流计算; 绕线式感应发电机; 动态特性

Dynamic characteristic analysis of transmission grid including large wind farm by PSS/E wind package

QIAN Shao-feng¹, LIN Li¹, SHEN Hui², ZHENG Xin-cai²

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Shangqiu Power Supply Co., Shangqiu 476000, China)

Abstract: In this paper, the PSS/E and WIND Package are taken as a simulation platform. Based on the slip adjustable wound rotor induction generator, the clearly Constant Speed Constant Frequency wind farm model is established, and CIGRE B4-39, a standard grid model including grid-connected wind farm is taken as an example. Dynamic characteristic and interaction between wind farm and grid with different capacity of wind farm and different grid-connected point in various fault position is compared and analyzed, as well as at different kinds of wind speed disturbance. Research result indicates that, if the wind speed disturbance is too large, oscillation of the wind farm will aggravate, within a certain capacity, high-capacity wind farm shows stronger anti-disturbance ability; on account of the synchronous generator regulation, the stability of the wind farm nearby is improved obviously.

Key words: wind farm; PSS/E wind package; power flow calculation; wound rotor induction generator; dynamic characteristic

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)06-0011-06

0 引言

随着能源和环境问题的日益严重, 风力发电越来越受到人们的重视, 各种大中型风电场也相继建成并投入使用。目前国内外的研究大部分集中于风电机组模型的研究以及基于自建模型基础上进行接入配电网的相关研究^[1-4]。对于 50 MW 及以上的大中型风电场与小型风电场不同, 一般直接接入输电网。在这种情况下, 电网受风电的影响范围更广、影响程度也更加严重^[5,6], 而对于大型风电场并入输电网的研究还不多。

为了研究大型风电场本身的动态行为以及与所接入电网间的相互影响, 必须建立合适的风电场模型。但到目前为止, 还没有一个公认的风电机组模型。在实际研究中, 一般根据研究目的的不同, 风电场采取的不同等值模型, 较为详细的模型可用于研究风电场内部动态特性, 而一定程度的简化模型

则用于研究风电场与电网间的相互作用。美国 PTI 电力技术咨询公司根据实际风电机组结构参数, 在 PSS/E 仿真平台上, 基于 FORTRAN 语言开发出 PSS/E Wind 软件包, 专门用于风电场特性及其并网的相关研究。其模型结构参数来源于美国 GE 公司和丹麦 Vestas 公司实际生产的风电机组, 具有较高的可信度和实用性。

文章以 PSS/E 和风机软件包为平台, 基于 Vestas 滑差可调的绕线式异步发电机建立了恒速恒频风电场模型, 研究了不同种风速扰动对风电场稳定性的影响; 不同容量风电场并网后, 不同地点故障扰动对风电场稳定运行的影响; 以及风电场在不同并网点并网时, 电网侧故障扰动对风电场稳定性的影响。

1 PSS/E Wind 风机软件包

1.1 风机软件包接入 PSS/E 仿真平台

如图 1 所示为风机软件包接入 PSS/E 仿真平台

流程图。

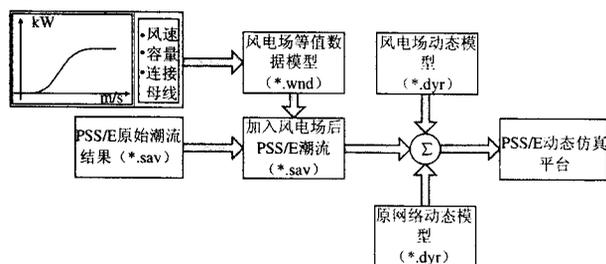


图 1 风机软件包接入 PSS/E 仿真平台流程图

Fig.1 Connected structure between PSS/E WIND and PSS/E

从图 1 中可以看出在 PSS/E 环境中使用风机软件包的整个计算过程。首先，根据研究需要，设定风电场中风电机组台数，即指定风电场的额定容量，设定平均风速，并设定连接母线信息等，生成风电场稳态计算所需的等值数据文件 (*.wnd)；其次，将需要研究的网络模型 (PSS/E 原始潮流结果文件) 与风电场稳态等值数据合成为含风电场的电网稳态数据模型，通过 PSS/E 仿真软件再次进行潮流计算，得出动态仿真及故障分析的初始状态；然后，分别引入原网络动态模型数据和等值风电机组动态数据模型 (含风速模型、空气动力学模型、轴系模型、桨距角控制模型和发电机模型等)，生成综合动态数据文件 (*.dyr)；最后，在 PSS/E 仿真平台进行动

态仿真和分析计算。

1.2 风电机组及其子系统模型结构

PSS/E 风机软件包中共包含了四种风电机组模型，分别为 GE 公司生产的 1.5 MW 和 3.6 MW 两种风电机组模型 (GE15 和 GE36)，它们是基于双馈感应发电机的变速恒频风电机组结构；另两种为丹麦 VESTAS 公司生产的 0.66 MW 和 1.8 MW、基于滑差可调的绕线式异步风力发电机的恒速恒频风电机组结构 (VS47 和 VS80)。如表 1 所示为各种风力发电机组模型可运行的操作系统环境、版本信息及工作频率等信息^[7]。

本文研究采用 Vestas 0.66 MW (VS47) 绕线式异步发电机组、变桨距风力机控制方式，用于模拟大型恒速恒频风电场。该风力机的切入运行风速为 3 m/s，切出风速为 25 m/s。如图 2 所示为 Vestas 风电机组控制系统图。

表 1 PSS/E WIND 中各种风力发电机组模型

Tab.1 Wind turbine models in PSS/E WIND

| Model | PSS/E versions | Base Frequency | Operating Systems |
|----------------------|----------------|----------------|-------------------|
| GE 1.5 MW (GE15) | 27, 28, 29, 30 | 60 Hz, 50 Hz | Windows, UNIX |
| GE 3.6 MW (GE36) | 27, 28, 29, 30 | 60 Hz, 50 Hz | Windows, UNIX |
| Vestas 0.66 MW (V47) | 27, 28, 29, 30 | 60 Hz, 50 Hz | Windows, UNIX |
| Vestas 1.8 MW (V80) | 27, 28, 29, 30 | 60 Hz | Windows, UNIX |

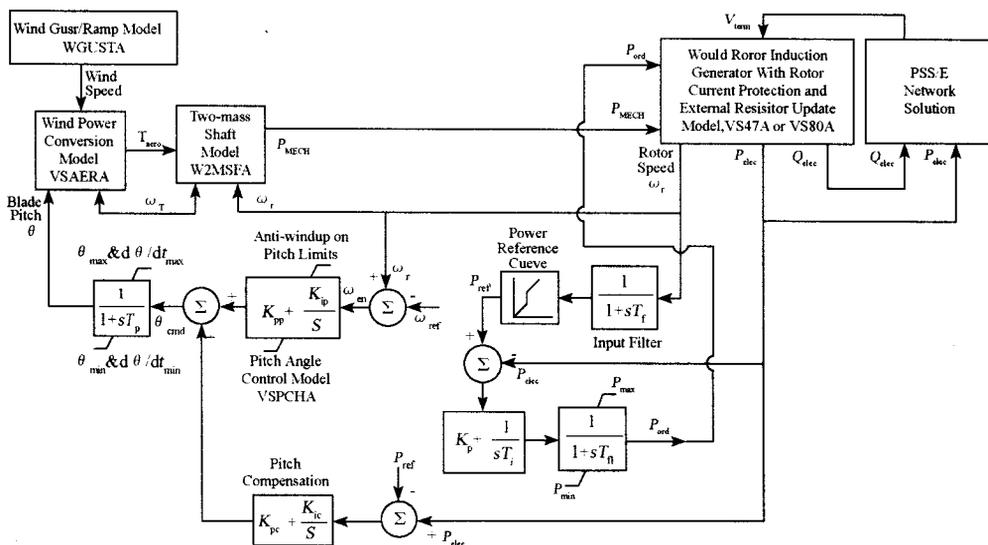


图 2 Vestas 风电机组控制系统图

Fig.2 Control diagram of the Vestas wind turbine model

2 绕线式异步发电机模型及风电场模型等值

2.1 Vestas 滑差可调的绕线式异步发电机

VS47 和 VS80 发电机模型采用了目前较为先进

的滑差可调的绕线式异步发电机模型，这种发电机可以在一定的风速范围内，以变化的转速运转，不必仅仅借助调节风力机叶片桨距来维持其额定功率输出，改善了输出电能的质量，同时也减少了变桨

距控制系统的频繁动作, 提高了风电机组运行的可靠性, 延长使用寿命^[8]。

在这种异步发电机中, 通过由电力电子器件组成的控制系统来调节绕线转子回路中的外接串联电阻值以维持转子电流不变, 其基本原理结构如图 3 所示。

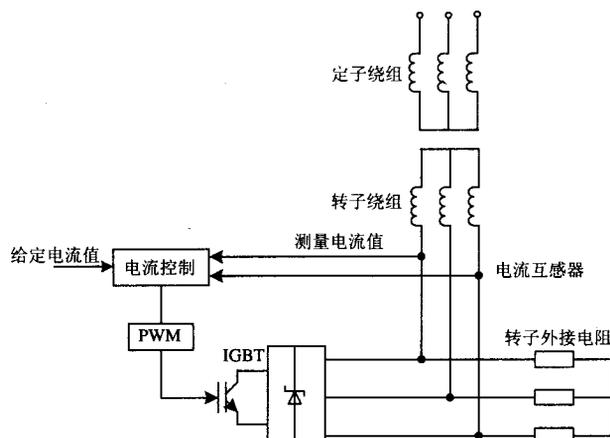


图 3 滑差可调绕线式异步发电机结构图

Fig.3 Structure diagram of the wound rotor induction generator

2.2 含风电场的系统潮流计算及动态模型等值

对于含恒速恒频风电场系统的潮流计算, 由于异步风电机组本身没有励磁装置, 要靠电网提供无功功率来建立磁场, 因此它不具有电压调节的能力, 不能将风电场出口母线视为 PV 节点; 并且由于异步风电机组在输出有功功率的同时要从系统中吸收一定的无功功率, 其无功功率的大小与滑差和节点电压有密切的关系, 因此也不能将其视为 PQ 节点。

当风速给定时, 即给定了风电场的有功输出, 其输出的无功功率与机端电压、滑差的大小是密切相关的, 由异步发电机等值电路可得转子滑差和无功功率表达式^[9]:

$$s = -\frac{U^2 r_2' - \sqrt{U^4 r_2'^2 - 4P_e^2 x_k^2 r_2'^2}}{2P_e x_k^2} \quad (1)$$

$$Q_e = \frac{r_2'^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{sr_2 x_m} P_e \quad (2)$$

式中: $r_2' = r_2 + R$, 其中 r_2 为转子电阻, R 为外接电阻; $x_k = x_1 + x_2$, 其中 x_1 为定子电抗, x_2 为转子电抗; x_m 、 s 、 U 分别为发电机励磁电抗、滑差和端电压。

进行潮流计算时, 根据初始 U 值和给定的 P_e 由式 (1) (2) 计算出 Q_e , 此时可将风电场视为 PQ 节点, 利用常规潮流计算方法, 计算整个电网的潮

流, 从而可以得到风电场并网点母线的电压更新值 U' ; 将 U' 与初始设定的电压值 U 进行比较, 并重新设定电压初值, 返回式 (1) 重新计算迭代, 直到计算的电压值与初值之差在规定的范围内。

对于不同的研究目的, 所采取的等值方式是不同的, 在研究暂态稳定性时, 可以使用组合模型和降解模型来表示风电场^[10], 风电场组合模型建模包括风电场中的每台风力机、补偿器、升压变压器以及内部电网详细模型等; 降解模型建模是指在特定的条件下用一台风力发电机组模型来表示风电场。本文采用降解模型建模方式, 其等值风电场的容量等于风场内每台发电机容量之和, 等值风电场向电网输送的有功功率等于风电场内部每台风力发电机组的有功功率之和。这种等值方式可以将研究重点放在整个电力系统发生短路故障时风电场所能承受的暂态响应能力, 以及含大型风电场的电网稳定性问题上。在接线方式上, 风电场每台风力发电机组分别接在同一条 0.69 kV 母线上, 并通过一台升压变输送到主网上。

3 算例分析

3.1 算例网络分析

本算例所用的研究系统为国际大电网会议推荐的 CIGRE B4-39 风电场并网系统标准模型, 如图 4 所示。

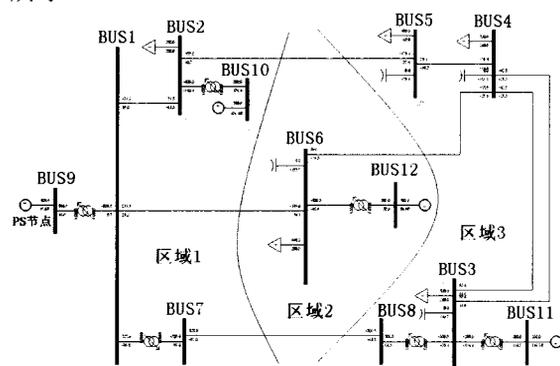


图 4 CIGRE B4-39 标准风电场并网模型

Fig.4 CIGRE B4-39 standard system model including wind farm

该网架结构包含了 12 条母线(其中 6 条 230 kV 母线, 2 条 345 kV 母线, 4 条 22 kV 母线), 并跨越了三个地理区域。区域 1 为供电区域, 包含了两个大容量同步发电机, 区域 2 连接了重负荷区域和供电区域, 且其发电机容量不能完全满足近区负荷需求, 区域 3 为负荷地区, 距离区域 1 大约 500 km。

3.2 风速变化对电网稳定性的影响

3.2.1 阵风影响下风电场动态分析

阵风是一种侵扰风电场最为常见的一种风扰

动,它具有持续时间短,幅值高的特点,因此往往对风电场的稳定运行构成威胁。

考虑在母线 BUS4 上并入 23 台单机容量为 0.66 MW 的 VS47 风电机组,风电场总装机容量约为 15 MW,风电场处于电网末端的负荷区。此时平均风速为 14 m/s,且风电场在输出 90%额定功率状态下运行。如图 5 为平均风速加上阵风(阵风风速为 3 m/s,持续时间为 2~12 s)后合成风速效果,图 6 为在阵风扰动下风电场有功出力、出口母线电压和风电机组转子转速波形。从图中可以看出,随着阵风的出现,风电机组转子转速开始增加,相应的机械转矩开始增大,风电机组输出的电磁功率也相应增加,当风速增加到最大时,风电机组转子转速开始下降,由于惯性风电机组输出电磁功率仍然继续略有增大,随着转子转速继续下降,电磁功率出现了大幅度降低,并最终恢复到原运行点附近稳定运行。

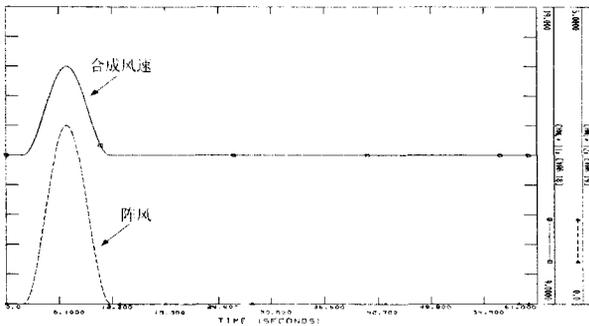


图 5 风速波形

Fig.5 Waveform of the wind speed

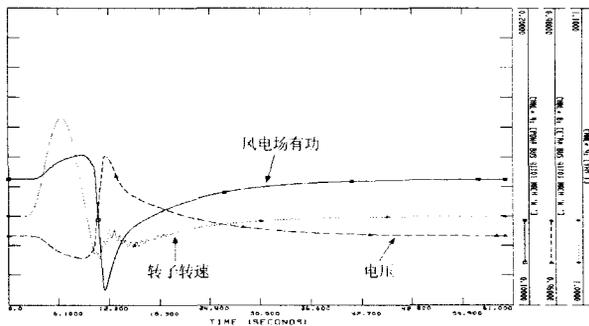


图 6 阵风扰动下风电场特性

Fig.6 Characteristic of wind farm by gust disturbance

当阵风风速增加,达到 20 m/s 时,此时风电机组转子转速已经超过一定界限,为了更好地保护机组叶片,风电机组过速保护动作,将风电机组切除运行,如图 7 所示为机组过速保护动作后,风电机组特性图,可以看出风电机组在大扰动风情况下,由于失速被保护切除。

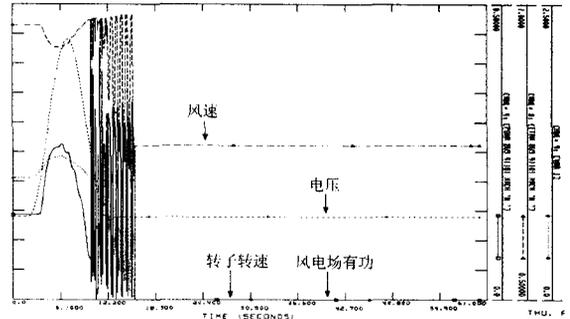


图 7 阵风 20 m/s 时风电场动态特性

Fig.7 Dynamic characteristic of wind farm of the gust of 20m/s

3.2.2 渐变风影响下风电场动态分析

这里考虑一种复杂的渐变风扰动影响下的风电场动态特性。取基本风风速为 14 m/s,渐变风最大风速为 2 m/s,持续时间为 10~20 s,在 20 s 时,在加上一个阶跃变化的渐变风过程(风速仍为 2 m/s),即此时实际的风速突增到 18 m/s,如图 8 为扰动下风电场的动态特性。

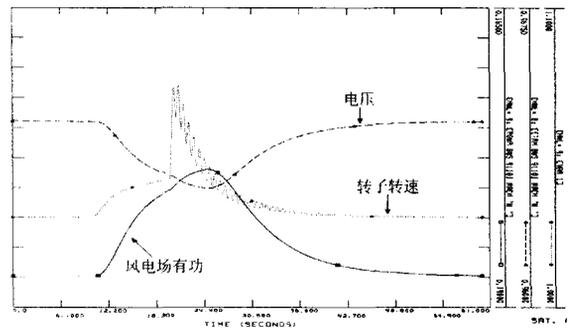


图 8 渐变风扰动下风电场特性

Fig.8 Characteristic of the wind farm in the ramp wind disturbance

3.3 不同容量风电场并网动态特性分析

本节主要研究对于不同容量风电场并入电网后,电网侧发生电气故障对风电场及电网稳定性的影响,风电场并网点仍为母线 BUS4, $t = 3$ s 时发生三相故障。

方案一:风电场容量约为 10 MW, 15×0.66 MW ≈ 10 MW。

a. 风电场出口发生三相短路。

如图 9 所示为故障持续时间为 30 ms 时,风电场有功功率、电压和转子转速波形,可以看出,风电场有功、电压及转子转速能很快恢复稳定运行;如图 10 为当故障持续时间达到 90 ms 时,风电场运行特性,可见由于风电机组的机械转矩和电磁转矩差越来越大,导致转子转速不断增加,为了防止发生机组“飞车”事故,风电机组过速保护动作,将

机组切除电网运行, 此时风电场出口母线电压由电网来维持。

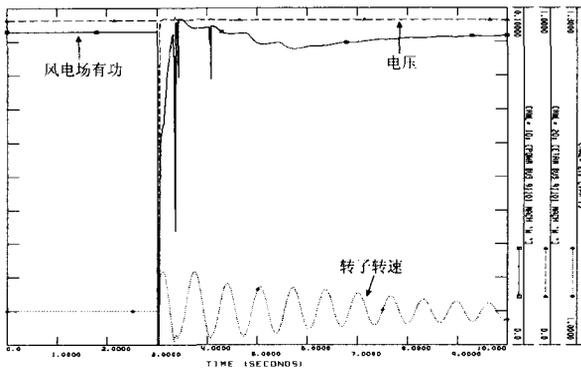


图 9 风电场电压、有功和转子转速特性

Fig.9 Voltage, active power and speed of the wind farm

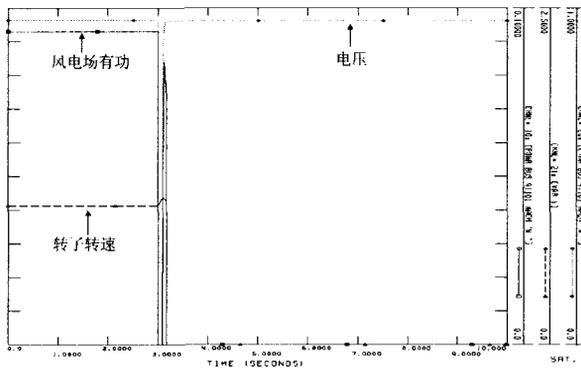


图 10 风电场因故障切除过程

Fig.10 Process of the wind farm disconnected from the grid

如图 11 所示为故障持续时间分别为 30 ms 和 70ms 条件下, 风电机组转子转速波动特性。

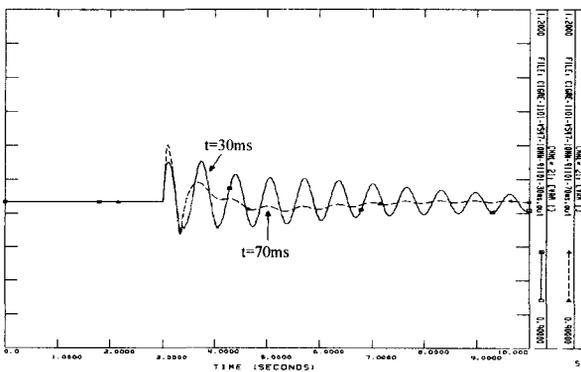


图 11 不同故障持续时间下转子转速特性

Fig.11 The rotor speed characteristic for different fault duration time

可以看出当故障持续时间较长时, 虽然转速波动幅度大, 但是能很快平稳下来; 而故障持续时间较短时, 虽然波动幅度较小, 但是转子在经过一个

长时间振荡后才能趋于稳定。这是由于在故障持续时间为 30 ms 时, 风电机组转速偏差量大小尚不能触发桨距角控制环节动作, 而在 70 ms 时其转速偏差大到足够触发桨距角控制环节动作, 即此时桨距角控制环节开始起作用, 因此, 转速能很快平稳下来。

b. BUS7—BUS8 线路出口三相接地短路。

当网络中传输功率最大的线路 BUS7—BUS8 出口发生三相接地短路时, 要保证风电场稳定运行的线路故障极限时间为 90 ms。

方案二: 风电场容量为 30 MW, 46×0.66 MW ≈ 30 MW

a. 风电场出口发生三相短路。

故障极限切除时间与方案一相同, 而风电场失稳的原因同样是由于机组超速保护动作将风电机组切出电网运行。

b. BUS7—BUS8 线路出口三相接地短路。

由仿真结构可知, 此时线路故障极限切除时间为 100 ms。

方案三: 风电场容量为 50 MW, 76×0.66 MW ≈ 50 MW

a. 风电场出口发生三相短路。

这种短路情况下, 风电场本身受扰动影响与前面两种无很大差别。可见由于机组超速保护的作用, 风电场出口母线发生故障时风电场被瞬时切除, 此时对风场自身的影响与风电场容量无关。

b. BUS7—BUS8 线路出口三相接地短路。

此时, 线路故障极限切除时间增大为 110 ms。因此, 可以认为当风电场容量占整个电网容量在一定比例范围内时, 随着风电场容量的增大, 其本身对电网侧发生故障的抗扰动能力是有所提高的。

通过进一步仿真分析可知, 随着风电场容量的逐步增大, 线路故障极限切除时间基本上维持在 110 ms 左右; 而当风电场容量超过 190 MW 时 (此时风电场容量占电网容量的比例为 12.67%), 线路故障极限切除时间急剧减小, 系统暂态稳定性大幅下降。

3.4 风电场不同并网点对系统稳定性的影响

考虑风电场并网点为 BUS3 母线上, 容量约为 50 MW (76×0.66 MW)。此时风电场与一个同步发电机并联接入同一母线 (BUS3), 并且存在近区负荷。

同样考虑 BUS7~BUS8 线路出口发生三相接地短路故障, 此时故障点距离风电场的电气距离较 3.3 中各方案近, 故障对风电场的影响应该更为严重,

但仿真得出的线路故障极限切除时间为 130 ms, 要大于 3.3 节方案 3 (容量同为 50 MW) 110 ms 的极限切除时间, 这是由于 BUS3 母线上同时还存在着具有调节能力的同步发电机, 其在一定程度上提高了风电场稳定性, 此时系统失稳原因仍然是风电机组失速。

4 结束语

文章以 PSS/E 和风机软件包为仿真平台, 研究了 PSS/E Wind 中风电机组模型结构, 建立了基于 Vestas 滑差可调的绕线式异步发电机的恒速恒频风电场模型, 并就恒速恒频风电场并网后在各种故障扰动下的动态特性进行了深入的研究。研究表明, 对于阵风和渐变风扰动而言, 若扰动风速瞬间增量不大, 则风电场一般经过振荡后能恢复稳定运行, 而扰动风速增量过大时, 会因为不平衡转矩的增大, 风电场振荡加剧, 甚至导致风电机组过速保护动作, 将风电场切除; 对于不同容量的并网风电场而言, 风电场出口母线故障对风电场本身的影响并不随着容量的变化而不同, 而电网侧发生故障时, 在一定范围内, 大容量风电场则表现出更强的抗扰动能力; 最后, 对于在不同并网节点并网的风电场而言, 同步发电机的调节作用对近区风电场稳定运行有明显改善的效果。

参考文献

[1] 王海超, 周双喜, 鲁宗相, 等. 含风电场的电力系统潮流计算的联合迭代方法及应用[J]. 电网技术, 2005, 29 (18): 59-62.
WANG Hai-chao, ZHOU Shuang-xi, LU Zong-xiang, et al. A Joint Iteration Method for Load Flow Calculation of Power System Containing Unified Wind Farm and Its Application[J]. Power System Technology, 2005,29(18):59-62.

[2] Nandigam K, Chowdhury B H. Power Flow and Stability Models for Induction Generators Used in Wind Turbines[J]. IEEE, 2005, 2 (12): 1483-1488.

[3] McArdle J E. Dynamic Modeling of Wind Turbine Generators and the Impact on Small Lightly Interconnected Grids[J]. Wind Engineering,2004, 28(1): 57-74.

[4] 洪敏, 李兴源. 双馈风力发电机的小信号稳定分析及其控制研究[J]. 继电器, 2007, 35 (14): 1-6.
HONG Min, LI Xing-yuan. Analysis of Small-signal Stability and Control Strategy of the Grid Integrated Wind Plant based on OFIG[J]. Relay, 2007,35(14):1-6.

[5] 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, 25 (12): 28-32.
LEI Ya-zhou, Gordon Lightbody. An Introduction on Wind Power Grid Code and Dydamic Simulation[J]. Power System Technology, 2005, 25 (12): 28-32.

[6] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.

[7] Power Technologies, Inc, PSS/E-30. 3 PSS/E Wind Guide[J]. USA: Power Technologies, Inc, 2006 .

[8] 王承熙, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[9] Feijoo A E, Cidras J. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 15 (1): 11-115.

[10] 李先允, 陈小虎, 唐国庆. 大型风力发电场等值建模研究综述[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33 (1): 42-46.
LI Xian-yun, CHEN Xiao-hu, TANG Guo-qing. Review on Equivalent Modeling for Large-scale Wind Power Field[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33 (1): 42-46.

收稿日期: 2008-05-09; 修回日期: 2008-06-19

作者简介:

钱少锋 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行、分析、稳定与控制; Email: safent_qian@163.com

林俐 (1968-), 女, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制, 风电并网研究。