

# 基于 Dig SILENT 的风电场并网暂态稳定分析与比较

杜旭浩, 马天祥, 魏力强, 孙翠英

(国网河北省电力公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 随着大型风电场的不断投入, 其并网暂态稳定问题, 也受到人们的关注。基于 Dig SILENT 仿真平台, 分别建立了含有双馈和永磁同步直驱两种不同风力发电机组的电网仿真计算模型。结合某风电场的接入实例, 模拟了 A 市电网发生  $N-1$  三相短路故障时, 两种不同风力发电机组的暂态稳定情况, 并对仿真结果进行了分析比较, 给出了参考建议。

**关键词:** 风电场并网; 暂态稳定;  $N-1$ ; 双馈; 永磁直驱

**Abstract:** With the continuous integration of large-scale wind farms with the grid, the transient stability problem caused by grid connection is attracted more and more attention. Based on Dig SILENT, the simulation model of power grid is established containing two kinds of different wind power generation units, that is, double-fed and permanent magnet direct drive. According to an integration example of a wind farm, the transient stability of these two kinds of wind power generation units is simulated during  $N-1$  three-phase short-circuit fault. The simulation results are analyzed and compared, and the reference suggestions are given.

**Key words:** grid-connected wind farm; transient stability;  $N-1$ ; double-fed; permanent magnet direct drive

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0081-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.019

## 0 引言

随着风电技术的不断研究和不断发展, 中国风电产业逐渐走向规模化, 然而大型风电场接入电网会对系统的安全稳定运行带来影响, 尤其是系统的暂态稳定问题<sup>[1]</sup>。当系统发生大扰动时, 大容量的风电场应尽量避免简单的切机措施, 采取提高故障穿越能力等措施, 为系统的暂态稳定提供支撑<sup>[2]</sup>。

为了考察电网发生大扰动期间, 风电场保持并网运行的能力, 基于 Dig SILENT 仿真平台, 建立了含有风电场的电网仿真计算模型。模拟了 A 市电网发生  $N-1$  三相短路故障时, 风电场并网公共连接点 PCC 点的母线电压以及有功、无功出力的变化情况, 并对风电场采用双馈和永磁同步直驱两种不同风力发电机组并入电网时的情况, 进行了分析比较, 给出了恰当的建议, 对今后的风电场并网暂态稳定研究及其他同类型机组的通流试验研究有一定实际意义。

## 1 风力发电系统建模

基于定子通流及转子通流试验的原理及方法,

选取 Dig SILENT 仿真平台, 分别建立双馈和永磁同步直驱两种风电机组模型, 并与电网相连接, 形成含有风电场的电网计算模型。

### 1.1 双馈风力发电系统

双馈风机的通用结构如图 1 所示, 风机采用变桨距控制, 可以追踪最大风能, 提高风能利用率; 定子绕组并网, 转子侧通过变频器并网, 可对有功和无功进行控制<sup>[3]</sup>。双馈风力发电系统运行时可实现能量双向流动, 当风机运行在超同步速度时, 功率从转子流向电网; 而当运行在次同步速度时, 功率从电网流向转子<sup>[4]</sup>。

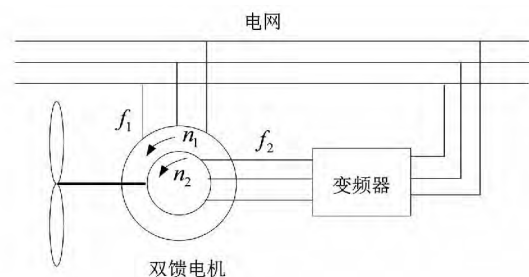


图 1 双馈电机风力发电系统

以 Dig SILENT 软件建模, 由于该软件中定子磁链可直接从电机模型输出结果中获取, 因此可直接取用定子磁链矢量。需将转子  $dq$  坐标系下的转子电流  $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  转换到定子磁链坐标系上。首先将转子

电流  $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  转换至两相同步静止坐标系 ( $x-y$  坐标系) 下:

$$\begin{aligned} i_{xr} &= i_{dr} \cos \theta_r - i_{qr} \sin \theta_r \\ i_{yr} &= i_{dr} \sin \theta_r + i_{qr} \cos \theta_r \end{aligned} \quad (1)$$

然后从两相同步静止坐标系下转至两相同步旋转坐标系 ( $m-t$  坐标系), 即定子磁链坐标系下:

$$\begin{aligned} i_{mr} &= i_{xr} \cos \theta_s + i_{yr} - \sin \theta_s \\ i_{tr} &= -i_{xr} \sin \theta_s + i_{yr} \cos \theta_s \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\theta_s$  为磁链同步角, 它是从定子轴  $x$  轴到磁链轴  $m$  轴的夹角;  $\theta_r$  为转子位置角, 它是转子坐标系  $d$  轴与定子  $x$  轴之间的夹角。同步旋转坐标系  $m$  轴固定在磁链矢量上,  $t$  轴超前  $m$  轴  $90^\circ$ , 该坐标系和磁链矢量一起在空间以同步角速度旋转。

同时采用电流闭环控制抑制交叉耦合项的干扰, 由此可得双馈电机转子侧矢量控制的模型, 如图 2 所示。

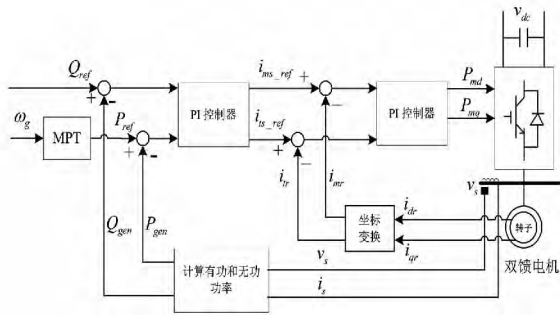


图 2 双馈电机转子侧控制模型

电网侧变频器经滤波电感后并网, 以网侧电压  $V_s$  作为  $d$  轴, 实现  $dq$  的解耦控制, 通过控制注入电网侧有功电流  $i_d$  和无功电流  $i_q$ , 即可实现对有功功率和无功功率的解耦控制, 控制模型如图 3 所示。

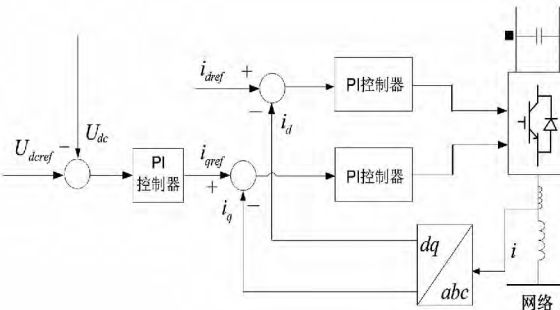


图 3 双馈电机电网侧变频器控制模型

### 1.2 永磁同步直驱风力发电系统

永磁同步直驱风力发电系统通用结构如图 4 所示, 通过两个全功率变频器与电网相连<sup>[5]</sup>。变频器可将频率变化的电能转换为与电网频率相同的恒频电能, 风机原动侧也采用最大风能跟踪, 其基本原理

同双馈风力发电系统相同<sup>[6]</sup>。

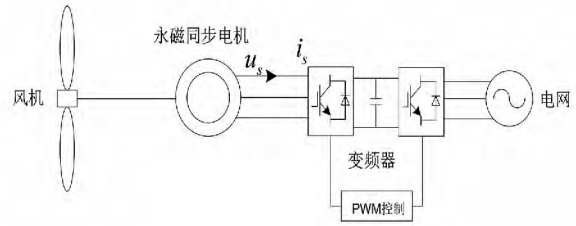


图 4 永磁同步直驱风力发电系统

发电机侧变频器, 以发电机母线处电压作为  $d$  轴作坐标变换, 实现  $dq$  分量的解耦控制。通过矢量控制的方法, 实现同步发电机的有功功率和无功功率的解耦控制, 控制目标为有功功率按照最优功率曲线变化, 同时保持与发电机无功交换为零, 如图 5 所示。

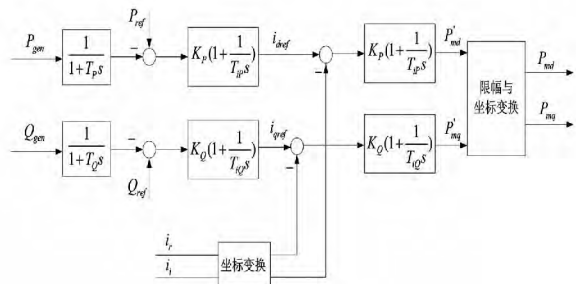


图 5 永磁风机电机侧变频器控制模型

电网侧变频器, 以并网侧母线电压作为  $d$  轴实现有功功率与无功功率的解耦, 以控制直流电压在设定值为目标, 同时保持变频器与电网交换的无功功率按指定的功率因数变化, 也就是恒功率因数控制, 如图 6 所示。

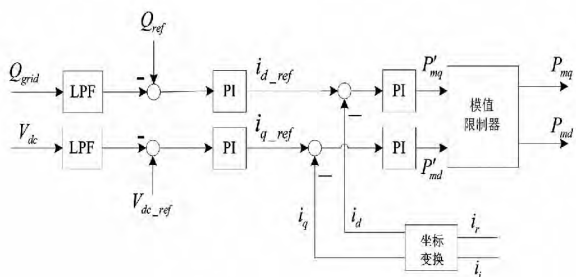


图 6 永磁风电网侧变频器控制模型

## 2 仿真分析

风电场内部风机通过集电线路将功率汇集至风电场 35 kV 母线处, 35 kV 母线经过升压变压器接至系统 220 kV 侧母线。对 A 市电网的部分线路进行故障仿真计算, 校验  $N-1$  条件下接入大型风电场后的该市电网暂态稳定情况, 分析大型风电场对

该市电网稳定性的影响; 并对双馈风电机组和永磁同步直驱风电机组的暂态稳定性进行分析比较。

仿真计算流程如下: 根据 A 市电网 2014 年基础数据, 按照规划容量 48 MW 接入风电场, 分析区域内部某 220 kV 线路发生三相短路故障下, 风电场 PCC 点母线电压以及有功、无功出力变化情况。

### 2.1 双馈风机接入的暂态仿真分析

软件中设置单台双馈风机容量为 2 MW, 每 8 台为 1 组, 共 3 组通过集电线路将功率汇集至风电场 35 kV 母线处, 其保护设定如表 1 所示。

表 1 双馈风电机组保护设置

保 护	整定值	动作延时/s
过电压保护/(p. u.)	1.1	0.1
	1.2	0
低电压保护/(p. u.)	0.8	0.2
	0.6	0.1
过转速保护/(p. u.)	1.2	0.1
	1.3	0
低转速保护/(p. u.)	0.7	0.1
	0.6	0
转子过流保护/kA	5	0.5

在 PCC 点邻近的某 220 kV 单回线路 50% 处设置发生三相短路故障, 故障由第 0.1 s 发生, 故障发生后 0.1 s 后单回线路断开。PCC 点母线电压以及有功、无功出力变化情况输出曲线如图 7 ~ 图 9 所示。

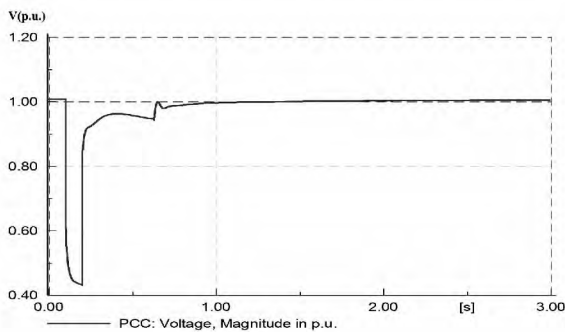


图 7 双馈风机接入风电场 PCC 点母线电压

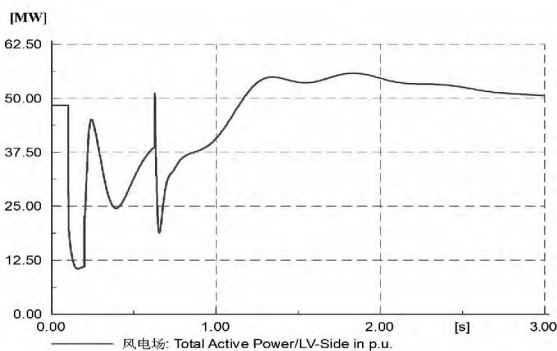


图 8 双馈风机接入风电场有功出力变化

在故障发生后 PCC 点母线电压有所降低, 随着故障线路的切除, 母线电压能够快速恢复至故障前水平, 系统保持稳定。但是由于故障距离风电场较近, 风电场有功和无功出力波动较大。故障期间, 没有出现暂态电压失稳情况, 风电场没有进行切机保护动作。

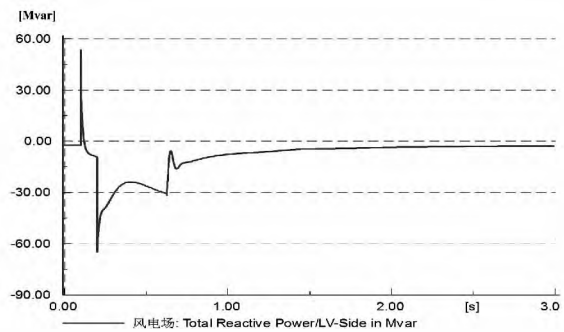


图 9 双馈风机接入风电场无功出力变化

### 2.2 永磁同步直驱风机接入的暂态仿真分析

软件中设置单台永磁同步直驱风机容量也为 2 MW, 每 8 台为 1 组, 共 3 组通过集电线路将功率汇集至风电场 35 kV 母线处, 其保护设定如表 2 所示。

表 2 永磁同步直驱风机机组保护设置

保 护	整定值	动作延时/s
过电压保护/(p. u.)	1.2	0.1
低电压保护/(p. u.)	0.6	0.1
高频保护/Hz	50.4	0.1
低频保护/Hz	49.6	0.1

故障设置同双馈风机, PCC 点母线电压以及有功、无功出力变化情况输出曲线如图 10 ~ 图 12 所示。

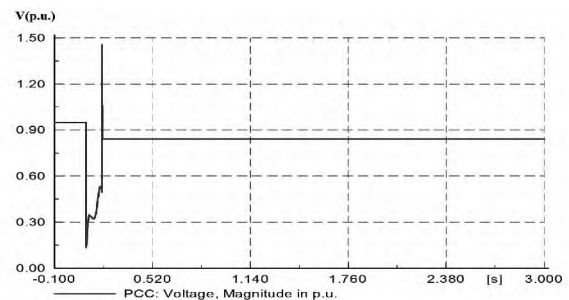


图 10 永磁同步直驱风机接入风电场 PCC 点母线电压

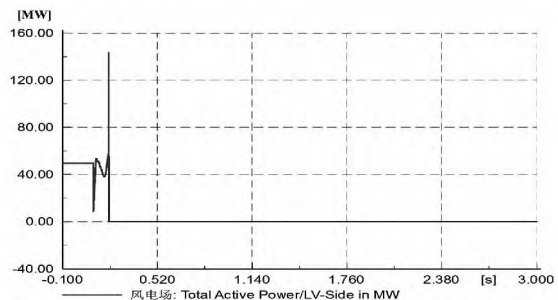


图 11 永磁同步直驱风机接入风电场有功出力变化

(下转第 94 页)

的开放式环境,如采用 Unix、Windows 等操作系统,其中通信网关机应采用 Unix、Linux 操作系统,编程采用 C 语言等高级语言,应用程序的开发界面采用功能图语言。

2) 分布。功能和数据库分布在系统各节点上。使本监控系统具有更高的效率、更高的可靠度及更好的可扩展性。

3) 高度可靠、冗余。本系统采用冗余全光纤的 1 000 Mbps 交换式快速以太网、冗余系统服务器和冗余电源系统等。

### 5 结 语

整个监控网络系统的建成将有助于大桥电厂的稳定运行,彻底解决大桥电厂目前运行中存在的电

(上接第 83 页)

在故障发生后,PCC 点母线电压有所降低,随着故障线路的切除,母线电压能够快速恢复至故障前水平,系统保持稳定。由于风机保护动作风电场被切除,此时风电场有功出力与无功出力均为 0。

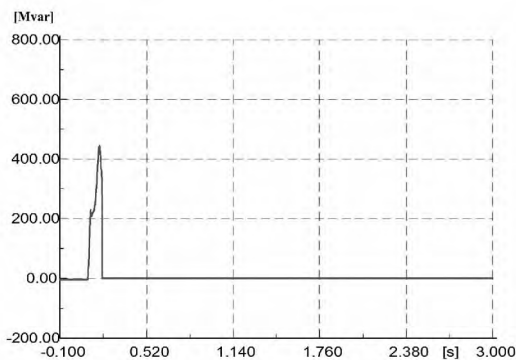


图 12 永磁同步直驱风机接入风电场无功出力变化

### 3 结 论

基于定子通流及转子通流试验的原理及方法,选取 Dig SILENT 仿真平台,建立了含有风电场的电网仿真计算模型。分别考虑接入双馈风力发电机组和永磁同步风力发电机组,进行了  $N-1$  故障仿真。从双馈风力发电机组与永磁同步直驱风力发电机组的仿真分析对比结果可发现,双馈风力发电机组在 A 市内发生故障时保护均未动作,能够较好地为电网暂态稳定提供支撑;而永磁同步直驱风机保护

厂监控系统网络脆弱、对外通讯不稳定等一系列问题。电厂侧更新后的双星型计算机监控系统网络和双 CPU 的 PLC 冗余系统当系统发生故障时,冗余配置的部件及时介入并承担故障部件的工作,从而达到电源的无干扰切换、网络的无干扰配置等积极效果,有效地缩减了系统的故障时间,达到了保证系统正常运行的目的。远控中心计算机监控系统按照上述标准配置建设完成后将能够实时、准确、有效地完成所有被控对象的安全监视和控制任务,并最终实现“无人值班”(少人值守)的运行方式,从而大大提高电厂的经济效益。

作者简介:

苏 亚(1985),从事电厂计算机监控系统维护工作。

(收稿日期:2015-11-11)

动作切机,相比之下,在 A 市的网架结构下,双馈风力发电机组的稳定性要好于永磁同步直驱风力发电机组;因此综合考虑,宜采用双馈风力发电机组接入系统,这对今后的风电场入网暂态稳定研究及其他同类型风电机组的通流试验研究具有一定实际意义。

### 参考文献

[1] 卢锦玲,石少通,徐超,等. 含大型风电场系统暂态电压稳定性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2014,41(1):45-52.

[2] 李升,王家华. 恒速异步发电机型风电场低电压穿越能力仿真研究[J]. 大电机技术,2014(1):24-27.

[3] 吉兴全,刘贵彬,李丹,等. 一种双馈式风机并网的电能质量在线监测方法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(17):145-150.

[4] 王松,李庚银,周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2714-2720.

[5] 刘波,金昊. 永磁直驱风电系统双 PWM 变换器前馈补偿控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(15):52-57.

[6] 茅靖峰,吴爱华,吴国庆,等. 基于扩张状态观测的永磁直驱风力发电系统 MPPT 自适应滑模控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(18):58-65.

作者简介:

杜旭浩(1986),硕士研究生、工程师,研究方向为电力系统电能质量及微网。

(收稿日期:2015-11-08)