

双馈风电机组的建模仿真及其等值方法研究

李智才 李凤婷

(新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 分析了双馈风力发电机组的数学模型及控制模型,基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了双馈风力发电机组仿真模型,以阵风和渐变风为例,对风力发电机组并网运行端口的稳态特性和故障特性做了仿真,能够实现定子侧有功、无功解耦控制及电压的恒定,验证了所建模型的正确性。在考虑尾流效应的情况下,研究了不同类型的双馈风电机组等值思路,搭建了等值模型,对其等值前后的稳态、暂态特性进行对比分析,结果表明了该等值方法的有效性,为大规模并网型双馈机组风电场进一步研究提供了有力条件。

关键词: 双馈风力发电机组; 风电场; 建模; 等值

Abstract: The mathematical model and control model of double-fed wind turbine are analyzed. Based on PSCAD/EMTDC platform, a single double-fed wind turbine simulation model is built. Taking the gusty wind and gradient wind for example, the steady-state characteristics and failure characteristics of the wind turbine integrated to power grid are simulated, and the active and reactive decoupling control and constant voltage in stator side can be achieved, then, the correctness of the model is verified. The equivalent method of different types of double-fed wind turbine is studied considering the wake effect, an equivalent model is built, and the steady-state and transient characteristics are compared and analyzed before and after the equivalents. The effectiveness of the equivalent methods is verified by the results, which provides the favorable conditions for the further research of large-scale grid-connected wind farm.

Key words: double-fed wind turbine; wind farm; modeling; equivalent

中图分类号: TM743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0010-05

0 引言

双馈风力发电机与电网柔性连接,可以根据风速的变化最大限度地捕获风能,也参与电力系统的无功调节,实现有功、无功功率的灵活控制,而且与转子绕组相连的变频器容量小,成本较低,已成为风力发电的研究热点和市场主流^[1]。建立正确的双馈风机模型,正确模拟风机的端口特性是进行风机并网运行特性等后续研究的基础。目前普遍采用的双馈风电机组的建模及控制目标为:通过控制转子侧变流器,实现双馈电机定子绕组有功功率和无功功率解耦;通过控制网侧变流器,保持变换器直流电压恒定,交流侧相电压和电流同相位,交流侧相电流为正弦波的控制目标^[2]。

随着风电技术的快速发展,风电场容量逐渐增大,在大型风电场并网系统的仿真分析中,若对每台

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50967004)

双馈风电机组及其控制系统进行详细建模,将导致计算时间长、资源利用率低。因此,有必要对双馈机组风电场等效等值建模方法进行深入研究^[3]。

这里在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上进行双馈风力发电机组的建模,以阵风和渐变风为例,对风力发电机组并网运行的端口特性做了仿真分析,验证了模型的有效性。以此模型为基础,对双馈机组风电场进行等值建模,仿真分析了在稳态、暂态情况下等值模型的有效性。

1 双馈风电机组的数学模型

1.1 风力机输出功率和转矩

风力机是用来截获流动空气所具有的动能,并将风力机叶片迎风扫风面积内的一部分动能转换为机械能,其捕获风能所产生的机械输出功率为^[4]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度; R 为叶片半径; V 为风速; C_p 为风能利用系数。

输出的机械转矩为

$$T_m = \frac{P_w}{\omega} \times \frac{\omega_N}{P_N} = \frac{P_w}{P_N} \cdot \frac{\omega}{\omega_N} \quad (2)$$

式中, ω_N 为风力机额定机械角速度; P_N 为风力机的额定功率。

1.2 双馈风力发电机的数学模型

三相绕组中各量均对称, 定转子绕组均采用电动机惯例, 不考虑零轴分量, 则两相同步旋转的 dq 坐标系下的 DFIG 数学模型可表示如下^[5]。

定子绕组电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \end{cases} \quad (3)$$

转子绕组电压方程为

$$\begin{cases} u_{rd} = \frac{d\psi_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} = \frac{d\psi_{rq}}{dt} + R_r i_{rq} + \omega_s \psi_{rd} \end{cases} \quad (4)$$

其中 u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{rd} 、 u_{rq} 为定、转子 d 、 q 轴电压; i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{rd} 、 i_{rq} 为定、转子 d 、 q 轴电流; ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 、 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 为定、转子 d 、 q 轴磁链; R_s 、 R_r 为定、转子绕组电阻; ω_1 为 d 、 q 轴坐标系旋转角速度, 此时等于同步转速; $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ 为 d 、 q 轴坐标相对于转子的转差电气角速度, ω_r 为转子旋转的电气角速度。

2 双馈风力发电机的控制模型

双馈风力发电机的控制部分主要是对转子侧和电网侧变换器进行控制, 实现最大风能效率。转子侧变换器的控制目标是实现有功功率和无功功率的解耦控制, 从而实现定子侧输出电压恒定, 频率稳定为 50 Hz; 网侧变换器的控制目标是控制交流侧功率因数, 保证直流母线电压恒定^[6]。

2.1 转子侧变换器的矢量控制

转子侧采用定子磁链定向矢量控制, d 轴沿定子磁场方向, 定子磁通的 q 轴分量为零, 则 $u_{sd} = 0$, $u_{sq} = U_s$ 。忽略定子侧电阻, 定子有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 为

$$\begin{cases} P_s = -\frac{2}{3} U_s \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = \frac{2}{3} \left(\frac{U_s^2}{\omega_1 L_s} - \frac{L_m}{L_s} U_s i_{rd} \right) \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 转子侧的电流分量 i_{rq} 可以控制定子侧的有功功率 P_s , 转子侧的电流分量 i_{rd} 可以控制定子侧的无功功率 Q_s , 从而实现了发电机定子有功与无功的解耦控制^[7]。

2.2 网侧变换器的矢量控制

网侧采用定子电压定向矢量控制, d 轴沿定子电压方向, q 轴在旋转方向上超前 d 轴 90° , 则 $u_d = U_s$, $u_q = 0$, 进而可以得到电网侧变换器与电网交换的有功与无功表达式如下。

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} u_d i_d \\ Q_g = -\frac{3}{2} u_q i_q \end{cases} \quad (6)$$

其中 u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 分别为电网电压、网侧变换器电流在 d 、 q 轴上的分量。由式(6)可知, 若认为电网电压恒定, 电网侧变换器与电网交换的有功功率与无功功率分别受控于网侧变换器的电流 i_d 、 i_q 。根据瞬时功率理论可知, 影响直流电压的是有功功率, 所以可以通过有功电流 i_d 控制直流电压, 通过无功电流 i_q 控制交流侧电压与电流的相位^[8]。

3 单台风电机组的仿真与分析

基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 对一台单机额定容量为 1.5 MW 的风力发电机组接入无穷大系统进行仿真, 系统的具体参数: 空气密度为 1.229 km/m³, 叶片半径 $R = 40$ m, 齿轮箱机械效率为 0.97, 切入风速为 3 m/s, 额定风速为 13 m/s, 切出风速为 25 m/s, 额定电压为 0.69 kV, 额定频率为 50 Hz, 定子电阻 $R_s = 0.005876$ p.u., 转子电阻 $R_r = 0.006613$ p.u., 定子电抗 $X = 0.0976$ p.u., 转子电抗 $X = 0.1634$ p.u., 互感电抗 $X_m = 5.136$ p.u.。为了验证所建立模型的准确性, 分别对稳态和暂态两种情况下风电机组并网特性进行仿真分析。

3.1 系统稳态情况下风电机组并网特性仿真

基本风速为 9 m/s, 第 2 s 阵风启动, 阵风风速峰值 2 m/s, 持续 1 s, 第 4 s 渐变风启动, 渐变风风速峰值 2 m/s, 持续 1 s, 之后以此风速运行, 如图 1

所示。图2~图4分别显示了在风速不断变化过程中,风电机组有功功率、无功功率及电压电流变化曲线。

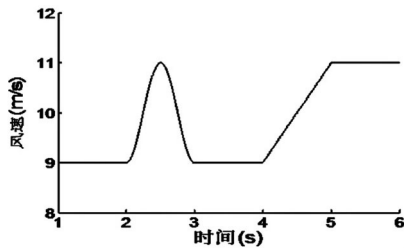


图1 风速的变化

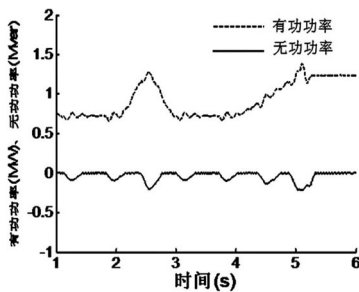


图2 定子的有功功率和无功功率

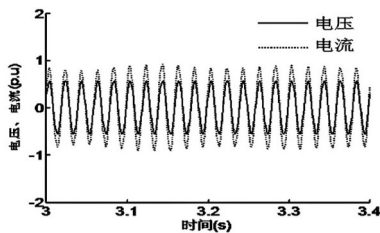


图3 定子侧电压电流曲线(1)

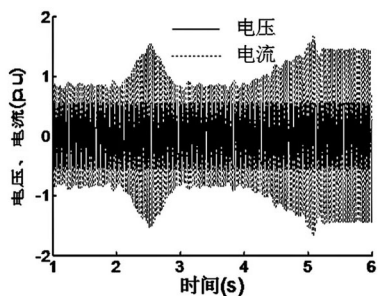


图4 定子侧电压电流曲线(2)

由图2可以看出,风力发电机的输出有功功率随着风速的变化而变化且波形相似。从响应曲线中可以看出双馈发电机的有功功率的变化并不在时间与扰动风速一致,这是由风电机组本身存在惯性导致一定延时。在有功功率随着风速变化时,无功功率基本保持不变,维持在0左右。另外,在图3中也可以看出,定子侧输出的电压、电流同相位,功率因数维持在1左右,说明该控制策略能够实现定子侧有功与无功的解耦控制。无功不随有功的变化而变化,风机不从系统吸收无功。在图4中可以看出,

在有功随着风速变化的过程中,定子侧电压维持不变,说明风速的变化对电压基本没有影响;定子侧电流随着有功的变化而变化且波形相似,说明风速的变化对电流产生影响,进而影响有功输出,说明了所建双馈机组模型的准确性。

3.2 系统故障情况下风电机组动态特性仿真

输入风速为基本风速9 m/s,风机并网处在 $t = 1.5$ s 时发生三相接地故障,持续时间0.2 s。在该暂态过程中,发电机定子电压、定子电流、发电机输出的有功功率、无功功率的动态过程如图5~图6所示。

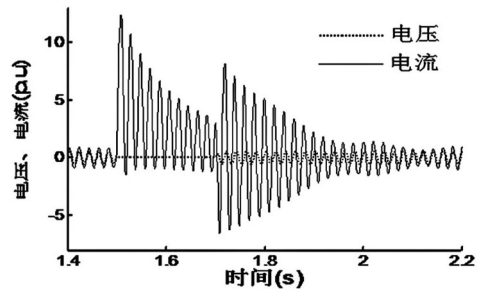


图5 定子的电压和电流

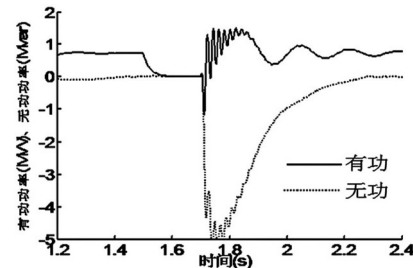


图6 定子的有功功率和无功功率

由图5可以看出,在 $t = 2$ s 发生故障时,电网电压瞬间跌落,定子电压受到影响,下降到0,持续0.2 s。定子电流瞬间突变,在故障期间按照指数规律衰减。在 $t = 2.2$ s 时故障清除后,发电机经过振荡后重新建立起机端电压,电流在经过振荡后恢复到稳定状态。在图6中得知,在故障时,风机有功出力快速跌落,持续0.2 s,无功维持为0,故障清除后,有功出力快速振荡回升,无功瞬间落后后,快速恢复到0附近,这是因为在故障消除后,风机需要一定无功支持来恢复机端电压。

4 双馈风机机组的等值

目前,关于风电场等值建模研究较多,但主要集中在恒速恒频异步机的风电场中^[9-11],对于双馈风力发电场等值研究仍较为单一、没有系统、明确的等

值方法。风电场等值主要包括风能分布模型、等值机群的划分、发电机组等值模型以及风电场内部电网参数等值模型^[12]。

4.1 尾流效应模型

以 Jensen 模型考虑尾流效应的影响,如图 7 所示, X 是两台风电机组之间的距离; R 和 R_w 分别为风电机组叶片半径和尾流半径; V_0 为吹向风电机组的风速; V_T 为通过转子的风速; V_x 为受尾流影响的风速。由 Jensen 模型可知

$$V_x = V_0 [1 - (1 - \sqrt{1 - C_T}) (\frac{R}{R + KX})^2] \quad (7)$$

式中, C_T 为风电机组推力系数; K 为衰减系数,一般由公式(9)计算。

$$K = \frac{0.5}{\ln(h/z)} \quad (8)$$

式中 h 为轮毂高度; z 为粗糙度,一般取 0.002 m。

在下面的研究中,风轮机高 80 m,叶轮半径 40 m,风机间距 500 m,取各台风机的 C_T 为 0.2,则 $V_x = 0.958 2 V_0$ 。

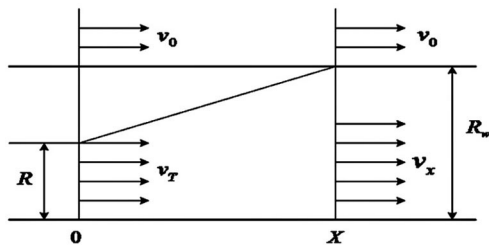


图 7 尾流效应模型

等值风速的计算公式为^[13]

$$V_{eq} = [\frac{1}{AC_p} \sum_{i=1}^n A_i C_{pi} V_i^3]^{1/3} \quad (9)$$

式中 $A = \sum_{i=1}^n A_i$; $C_p = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_{pi}$; A_i 为第 i 台风力机扫风面积; C_{pi} 为第 i 台风力机转换效率; V_i 为第 i 台风力机风速。

4.2 等值机功率

对于双馈风力发电机构成的风场,等值前后容量不变、额定容量不变。

$$S_{eq} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (10)$$

$$P_{eq} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (11)$$

对于无功功率,整个风电场根据系统整体需求、单机运行状态对每台风电机组进行无功分配。如果双馈机风力发电机各单机系统控制系统的参考无功不同,则等值机组参考无功功率为所有单机参考无

功功率之和。

$$Q_{eqref} = \sum_{i=1}^n Q_{iref} \quad (12)$$

4.3 发电机等值参数求取

这里研究风电场所有风力发电机组接于同一母线上,在风电场并网运行时不考虑双馈发电机内部的功率损耗,所以在求取等值发电机参数时采用加权平均的方法。每台双馈机的等值电路为 T 型等值电路,它与普通异步发电机等值电路的唯一区别在于其转子侧多出一个励磁电压。可以得出,计算定转子及励磁回路阻抗时可沿用异步机等值方法。

根据加权平均法可得发电机定子阻抗等值参数为^[14]

$$R_{seq} = \frac{a_s}{a_s^2 + b_s^2} \quad (13)$$

$$X_{seq} = \frac{b_s}{a_s^2 + b_s^2} \quad (14)$$

$$\text{其中 } a_s = \sum_{i=1}^m \frac{\rho_i R_{si}}{R_{si}^2 + X_{si}^2} \quad b_s = \sum_{i=1}^m \frac{\rho_i X_{si}}{R_{si}^2 + X_{si}^2}$$

同理,计算出转子阻抗的等值参数 R_{req} 、 X_{req} 。等值发电机的励磁电抗为

$$X_{meq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \rho_i / X_{mi}} \quad (15)$$

另外,还可以求出等值机的惯性时间常数、阻尼系数、运行滑差,其分别为

$$T_{jeq} = \sum_{i=1}^m \rho_i T_{ji} \quad (16)$$

式中, T_{jeq} 为等值发电机惯性时间常数; T_{ji} 为第 i 台发电机的惯性时间常数。

$$K_{Deq} = \sum_{i=1}^m \rho_i K_{Di} \quad (17)$$

式中, K_{Deq} 为等值发电机阻尼系数; K_{Di} 为第 i 台发电机的阻尼系数。

$$s_{eq} = \frac{a}{a'} \cdot \frac{a'^2 + b'^2}{a^2 + b^2} \quad (18)$$

其中,

$$\left\{ \begin{aligned} a &= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i R_{ri}}{R_{ri}^2 + X_{li}^2} \\ b &= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i X_{ri}}{R_{ri}^2 + X_{li}^2} \\ a' &= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i R_{ri} / S_i}{(R_{ri} / S_i)^2 + X_{li}^2} \\ b' &= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i X_{li}}{(R_{ri} / S_i)^2 + X_{li}^2} \\ X_{li} &= X_{si} + X_{ri} \end{aligned} \right. \quad (19)$$

研究中,由于所等值双馈发电机台数较少,风电场内电网的功率损耗可忽略不计,因此,可忽略风电场内部集电线线路的等值。

4.4 算例分析及仿真

为了验证等值方法的有效性,本算例中将两台 1.5 MW(1、2 号)和两台 2 MW(3、4 号)的双馈机组等值为一台机组进行分析。仿真所用的系统如图 8 所示,两种类型风力发电机的参数和用前方法得到的等值机参数列于表 1。

仿真参数为:联络线线路型号为 LGJ240,联络线电阻 $r=0.132 \Omega/\text{km}$,电抗 $x=0.401 \Omega/\text{km}$,电纳 $b=2.85 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$;风电场主变压器额定容量为 10 MVA,短路电压百分比为 10.5%;集电线线路型号为 LGJ150,集电线路电阻 $r=0.21 \Omega/\text{km}$,电抗 $x=0.398 \Omega/\text{km}$,电纳 $b_2=2.9 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ 。

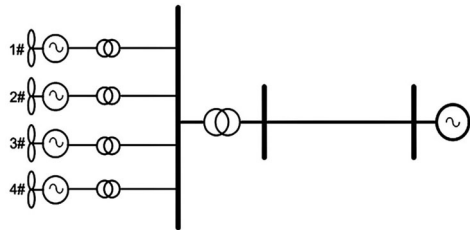


图 8 风电场全模型

表 1 风力发电机及等值机的参数

参数	单台机参数		等值机参数
	两台	两台	
P_N/MW	1.5	2	7
U_N/V	690	690	690
f/Hz	50	50	50
T/s	5.04	3.5	4.116
$K/\text{p.u.}$	0.01	0.01	0.01
$r_s/\text{p.u.}$	0.005 876	0.004 88	0.005 649
$x_s/\text{p.u.}$	0.097 6	0.138 6	0.117 47
$r_r/\text{p.u.}$	0.006 613	0.005 49	0.005 934
$x_r/\text{p.u.}$	0.163 4	0.149 3	0.155 03
$x_m/\text{p.u.}$	5.139 57	3.952 7	4.387 18
s	0.2	0.2	0.2

表 2 受尾流效应影响的风速及等值风速

风机	WG1	WG2	WG3	WG4	等值机
风速	10.5	10.06	9.64	9.24	9.88

4.4.1 稳态运行时比较

设风电场全模型和风电场等值模型在如表 2 所示的风速下进行仿真,则稳态时其等值前后有功功率、无功功率和电压的波形如图 9 所示。

在图 9 中可以看出,在稳态运行时,风电场并网

点处的有功功率、无功功率及电压在等值前后基本吻合,说明在稳态运行时等值模型能够很好的反应出风电场特性。

4.4.2 暂态运行时比较

在 $t=1 \text{ s}$ 时风电场并网处发生三相接地短路,

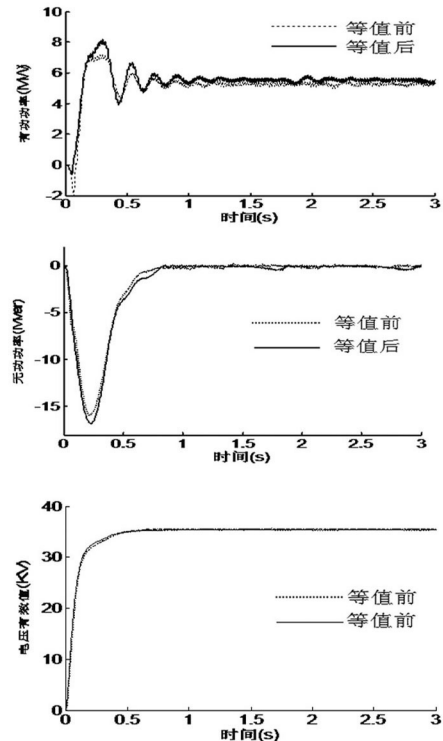


图 9 稳态时等值前后有功、无功及电压曲线

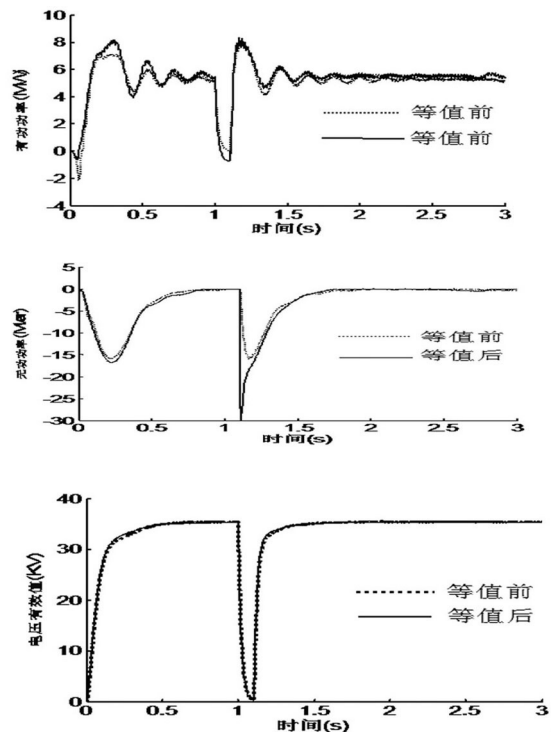


图 10 暂态时等值前后有功、无功及电压曲线

(下转第 45 页)

重大反事故措施》(试行) 继电保护专业重点实施要求 [S]. 2005.

[4] 许继电气股份有限公司. WGQ-871A 微机故障启动装置技术说明书 [R]. 2008.

作者简介:

李凡红(1984) 男, 助理工程师, 研究方向为电力系统

(上接第 14 页)

风速不变时, 分别对风电场全模型和风电场等值模型进行仿真, 有功功率、无功功率和电压的波形如图 10 所示。

由仿真曲线可知: 机群出口 PCC 处发生三相短路扰动时, 风电场 PCC 处有功出力、无功变化和电压幅值在等值前后基本吻合, 只是在扰动发生前后有较为明显的局部误差, 各种动态过程都具有较好的精度。等效风电机组参数对系统扰动具有良好的适应性。说明暂态运行时等值模型也能够很好的反应出风电场特性。

5 总 结

以上建立了变速恒频双馈风电机组的模型, 对阵风风和渐变风下端口的稳态、暂态特性进行了仿真, 仿真结果表明: 双馈风电机组可以实现有功的最大功率跟踪, 有功和无功解耦控制, 输出功率因数为 1, 端口电压稳定, 从而验证了模型的正确性。其次, 在考虑尾流效应的情况下, 对基于不同容量双馈风电机组的风电场进行等值, 在稳态、暂态运行情况下进行仿真分析, 结果表明, 等值前后风电场的有功功率、无功功率及电压基本吻合, 误差较小, 等值模型能够很好反应出风电场特性, 对各类动态过程仿真具有较好的适用性, 这为大规模含变速恒频双馈型机组风电场的等值提供方法参考。

参考文献

[1] 陈雷, 邢作霞. 大型风力发电机组技术发展趋势 [J]. 可再生能源, 2003(1): 27-30.

[2] 冯双磊, 赵海翔, 任普春. 基于 PSCAD/EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真 [J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.

[3] 李光允, 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, 31(1): 42-46.

智能运行及控制理论研究, 从事继电保护及控制方面的工作;

庄秋月(1986) 女, 助理工程师, 研究方向为电力系统运行及暂态分析。

(收稿日期: 2012-01-11)

[4] Yu Zou, Malik Elbuluk, Yilmaz Sozer. A Complete Modeling and Simulation of Induction Generator Wind Power Systems [C]. Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), IEEE, 2010: 1-6.

[5] 张照彦, 马永光. 双馈异步风力发电机建模与仿真研究 [J]. 电力科学与工程, 2010, 26(1): 5-9.

[6] 万航羽, 黄梅. 双馈风力发电机建模及谐波分析 [J]. 电气应用, 2008, 27(6): 53-57.

[7] 徐园. 基于 PSCAD/EMTDC 变速恒频双馈风力发电机组运行及特性分析 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2008: 17-20.

[8] 高一丹, 张步涵. 并网双馈风力发电机组的建模与仿真 [J]. 湖北工业大学学报, 2010, 25(1): 75-80.

[9] 苏常胜, 李凤婷, 晁勤, 等. 异步风力发电机等值及其短路特性研究 [J]. 电网技术, 2011, 35(3): 177-182.

[10] 李环平, 杨金明. 基于 PSCAD/EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 62-66.

[11] L. M. Fernandez, C. A. Gareia, J. R. Saenz. Equivalent Models of Wind Farms by Using Aggregated Wind Turbines and Equivalent Winds [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 12(4): 691-704.

[12] 孙蕾. 变速恒频风力发电机组建模与控制策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009: 47-52.

[13] Daniel J T, Andrew G, Jawad M K and Eric M. Petritz. Fixed-speed Wind-generator and Wind-park Modeling for Transient Stability Studies [J], IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1911-1917.

[14] 张慧群. 基于遗传算法的风电场异步发电机动态等值研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007: 23-31.

作者简介:

李智才(1986) 男, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源发电与风电并网技术;

李凤婷(1965) 女, 教授, 工学博士, 硕士生导师, 研究方向为风电并网技术与电力系统继电保护。

(收稿日期: 2012-05-11)