

# 基于 PSCAD/EMTDC 的 双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真

冯双磊<sup>1</sup>, 赵海翔<sup>1</sup>, 任普春<sup>2</sup>, 王伟胜<sup>1</sup>, 戴慧珠<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085; 2. 东北电网有限公司, 辽宁省 沈阳市 110006)

## PSCAD/EMTDC Based Simulation Study on Dynamic Model of Doubly-Fed Variable Speed Wind Turbine

FENG Shuang-lei<sup>1</sup>, ZHAO Hai-xiang<sup>1</sup>, REN Pu-chun<sup>2</sup>, WANG Wei-sheng<sup>1</sup>, DAI Hui-zhu<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China;

2. Northeast China Grid Company Limited, Shenyang 110006, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** By use of electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC and applying vector control principle of induction motor and serial correction of proportion-integral (PI) regulator, a control system model of variable speed wind turbine (VSWT) based on doubly fed induction generator is established. Combining the established model with the existing models in the model library of PSCAD/EMTDC, a dynamic model of VSWT based on doubly fed induction generator is formed. According to operating characteristic the dynamic model of VSWT is verified and its effectiveness is validated by simulation. Simulation results show that this dynamic model of VSWT can meet the technical requirements from wind turbine manufactures and can be used as a new means for the research on working performance of VSWT based on doubly fed induction generator.

**KEY WORDS:** variable speed wind turbine (VSWT); doubly fed induction generator; control system; dynamic model

**摘要:** 以电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 为平台, 应用电机矢量控制原理与比例-积分调节器串联校正等方法建立基于双馈感应发电机的变速风电机组控制系统模型, 并将该模型与 PSCAD/EMTDC 模型库中的已有模型相结合, 形成基于双馈感应发电机的变速风电机组动态模型。依据变速风电机组的运行特性对该模型进行校验并验证其有效性, 该模型为研究基于双馈感应发电机的变速风电机组的工作特性提供了新的手段。

**关键词:** 变速风电机组; 双馈电机; 控制系统; 动态模型

## 0 引言

随着风电机组的研究、制造与应用水平的不断

提高, 它已从采用鼠笼式感应发电机的固定转速风电机组发展到了基于双馈感应发电机(doubly fed induction generator, DFIG)的变速风电机组。DFIG 变速风电机组具有调节发电机转速和无功功率等优点, 但从电力系统角度看, 采用 DFIG 变速风电机组的风电场仍然是不稳定的间歇性电源, 如何准确模拟 DFIG 变速风电机组的特性并采取措施抑制其可能对电网造成的消极影响已成为设计和制造 DFIG 变速风电机组的关键问题。此外, 在进行风电场接入电力系统的规划、设计时必须针对接入电力系统的具体特性分析风电场并网运行后可能带来的影响。综上所述, 建立 DFIG 变速风电机组的动态模型具有实际意义。文献[1-12]针对不同研究问题分别在 DIgSILENT/PowerFactory、PSS/E、Matlab 等仿真软件中建立了 DFIG 变速风电机组的动态模型。由于 DFIG 变速风电机组采用频率高达 kHz 的绝缘栅双极晶体管(isolation gate bipolar transistor, IGBT)作为开关元件, 为准确模拟 IGBT 的开关动作常采用电磁暂态步长作为研究 DFIG 变速风电机组运行特性的仿真步长, 这样就对 DFIG 变速机组动态建模仿真软件的选择提出了较高要求。PSCAD/ EMTDC 是电力系统电磁暂态计算方面最具权威的计算平台之一, 采用该平台作为 DFIG 变速风电机组的仿真平台能够为研究工作提供便利, 同时也能保证仿真结果的有效性。需要特别指出的是, 为满足近年来风力发电快速发展的要求, PSCAD/EMTDC 的模型库中增加了一些与风电机组相关的模型, 如风力机模型、桨距角调节系统模型

等,但决定 DFIG 变速风电机组运行特性的控制系统模型却一直未能提供,这使得直接应用 PSCAD/EMTDC 研究 DFIG 变速风电机组存在较大的困难。

本文以 PSCAD/EMTDC 为仿真平台建立符合 DFIG 变速风电机组控制目标要求的控制系统模型,并将该模型与 PSCAD/EMTDC 模型库中已有模型相结合,形成完整的基于该平台的 DFIG 变速风电机组动态模型。最后根据 DFIG 变速风电机组运行特性的要求对整个动态模型进行校验,以证明模型的有效性。

## 1 转子侧变流器控制系统

### 1.1 转子侧变流器控制系统模型

DFIG 变速风电机组控制系统主要包括双馈电机控制系统与风力机控制系统,后者的主要部分为桨距角调节系统,PSCAD/EMTDC 模型库已经提供该系统的模型,因此本文着重研究双馈电机控制系统。该系统主要包括转子侧变流器控制系统与电网侧变流器控制系统,前者的控制目标是实现对双馈电机定子绕组有功功率与无功功率的解耦控制。

双馈电机在定子磁场定向方式下的定子绕组有功功率与无功功率的表达式为

$$P_s = -\frac{3}{2} U_s \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \quad (1)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \left( \frac{U_s^2}{w_s L_s} - \frac{U_s L_m i_{dr}}{L_s} \right) \quad (2)$$

式中:  $P_s$ 、 $Q_s$  为定子绕组有功功率与无功功率;  $U_s$  为双馈电机相电压幅值;  $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  分别为转子电流在同步旋转坐标系 d 轴、q 轴上的分量;  $L_s = L_{ls} + L_m$ ,  $L_r = L_{lr} + L_m$ ,  $L_m = 3L_{sr}/2$ ; 其中:  $L_{sr}$  为定、转子互感幅值,  $L_{ls}$ 、 $L_{lr}$  分别为定、转子每相漏感。

可见,在定子磁场定向方式下,转子电流有功分量  $i_{qr}$  可以控制定子绕组有功功率  $P_s$ ,无功分量  $i_{dr}$  可以控制定子绕组无功功率  $Q_s$ ,而  $i_{qr}$  与  $i_{dr}$  之间不存在耦合关系,因此,调节  $i_{qr}$  控制  $P_s$  时不会影响  $Q_s$ ,反之亦然,这样就实现了对双馈电机定子绕组有功功率  $P_s$  与无功功率  $Q_s$  的解耦控制。

DFIG 变速风电机组都采用电压源型变流器,故控制系统的控制作用需要通过作用在变流器上的电压向量来实现,这就需要建立转子电流向量与转子电压向量之间的联系。根据双馈电机在同步旋转坐标系下的电压与磁链方程式可得

$$u_{dr} = r_r i_{dr} + s L_r \frac{di_{dr}}{dt} - w_{slip} s L_r i_{qr} \quad (3)$$

$$u_{qr} = r_r i_{qr} + s L_r \frac{di_{qr}}{dt} + w_{slip} (L_{mm} i_{ms} + s L_r i_{dr}) \quad (4)$$

式中:  $w_{slip} = w_s - w_r$ ;  $s = 1 - L_m^2/L_s L_r$ ;  $L_{mm} = L_m^2/L_s$ ;  $i_{ms} = y_{ds}/L_m$ 。

式(3)(4)给出了转子电压与转子电流之间的关系式,可见如果将  $-w_{slip} s L_r i_{qr}$  与  $w_{slip} (L_{mm} i_{ms} + s L_r i_{dr})$  做为前馈量考虑,就可以通过转子电压向量在同步旋转坐标系 q 轴、d 轴上的分量  $u_{qr}$  与  $u_{dr}$  解耦控制双馈电机定子绕组的有功功率与无功功率。

### 1.2 转子侧变流器控制系统设计

根据 1.1 节的分析可知,若暂不考虑前馈输入则转子侧变流器的控制系统应具有多环结构,包括电流内环与功率外环。按照多环系统的设计原则,首先进行电流内环的设计。对不计前馈量的式(3)(4)进行拉氏变换得到以  $i_r$  为输出量、 $u'_r$  为输入量的电流内环开环传递函数

$$\frac{i_{dr}(s)}{u'_{dr}(s)} = \frac{i_{qr}(s)}{u'_{qr}(s)} = \frac{1}{r_r + s L_r s} \quad (5)$$

为满足控制系统性能指标的要求,本文采用比例-积分(proportion-integral, PI)调节器串联校正法对电流内环进行再设计。接入 PI 调节器后电流内环控制框图变为图 1 所示结构。

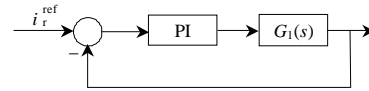


图 1 加入 PI 调节器后电流内环控制框图

Fig. 1 The control block of inner current loop after the PI regulator inserted

根据电流内环开环传递函数的形式,本文应用极点配置法<sup>[13-14]</sup>设计 PI 调节器。对式(5)代入文献[6]中的电机参数并根据极点配置法的设计原则令 PI 调节器的分子项等于式(5)的分母项,由此确定参数  $t$ ; 控制系统从 0 型校正为 1 型,消除了单位阶跃响应下的稳态误差;最后根据一阶系统单位阶跃响应上升时间的求取公式确定另一参数  $K_p$ 。图 2 给出了校正前后电流内环控制系统阶跃响应比较。

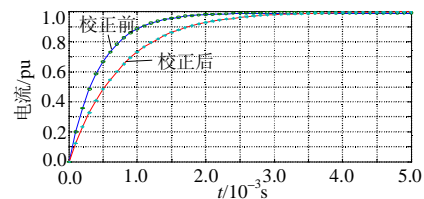


图 2 校正前后电流内环控制系统阶跃响应比较

Fig. 2 The comparison between the unit step response of inner current loop with or without compensation unit

将设计好的电流内环系统看作功率外环的一部分, 并对式(1)(2)进行拉氏变换, 则功率外环开环传递函数为:

$$G'_o(s) = \frac{1320}{s+1320} \times \left( -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s \right) \quad (6)$$

式(6)与式(5)具有相同的形式, 可采用相同方法对控制系统进行再设计。图3给出了校正前与校正后功率外环控制系统阶跃响应比较结果。

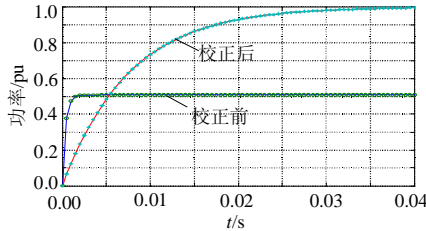


图3 校正前后功率外环控制系统阶跃响应比较

Fig. 3 The comparison between the unit step response of outer power loop with or without compensation unit

## 2 电网侧变流器控制系统

### 2.1 电网侧变流器控制系统模型

电网侧变流器控制系统的控制目标是: ①保持直流电压  $u_{dc}$  恒定; ②保持交流侧相电流的正弦波形; ③保持交流侧相电压和相电流同相位。下面研究如何建立符合上述控制目标的控制系统。

(1) 保持直流电压  $u_{dc}$  恒定。

电网侧变流器结构如图4所示, 根据图4有:

$$\begin{cases} u_{gd} = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - w_e L_g i_{gq} + u_{gcd} \\ u_{gq} = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + w_e L_g i_{gd} + u_{gcq} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $u_{gd}$  与  $u_{gq}$  分别为电网电压向量在 d、q 轴的分量;  $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$ 、 $u_{gcd}$  与  $u_{gcq}$  分别为电网侧变流器电流、电压向量在 d、q 轴上的分量;  $w_e$  为定子电压角速度;  $R_g$  与  $L_g$  分别为感应线圈的电阻。

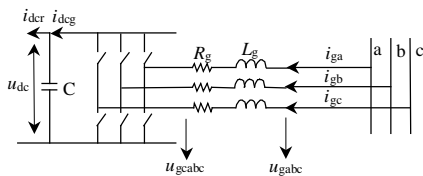


图4 电网侧变流器结构

Fig. 4 The schematic of the grid-side converter

令式(7)中的 d 轴沿电网电压方向, q 轴在旋转方向上超前 d 轴  $90^\circ$ , 则电网侧变流器与电网交换的有功功率  $P_g$  与无功功率  $Q_g$  的表达式为:

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} u_{gd} i_{gd} \\ Q_g = -\frac{3}{2} u_{gd} i_{gq} \end{cases} \quad (8)$$

若认为电网电压恒定则  $u_{gd}$  也恒定, 那么电网侧变流器与电网交换的有功功率  $P_g$  与无功功率  $Q_g$  将分别受控于  $i_{gd}$  与  $i_{gq}$ 。根据瞬时功率理论可知影响直流电压的是有功功率<sup>[7]</sup>, 所以可通过有功电流  $i_{gd}$  控制直流电压, 通过无功电流  $i_{gq}$  控制交流侧电压与电流的相位。

由图4可知, 忽略线路电阻与变流器的功率损耗, 根据文献[8,15]以及电容器自身特性可得直流电压  $u_{dc}$  与电网电流有功分量  $i_{gd}$  的关系式为

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{4\sqrt{2}} m i_{gd} - i_{dcr} \quad (9)$$

同样需要建立电网侧变流器电压向量与电流向量之间的联系。根据式(7)有

$$u_{gcd} = u_{gd} - \left( R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} \right) + w_e L_g i_{gq} \quad (10)$$

式(10)给出了电网侧变流器电网电压向量与电流量之间的关系式。可见, 如果将  $w_e L_g i_{gq}$  做为前馈量处理就可以通过电网侧变流器电压向量在同步旋转坐标系 d 轴上的分量  $u_{gcd}$  控制直流电压  $u_{dc}$ 。

(2) 保持交流侧相电流的正弦波形。

Park 变换可以看作是基于瞬时采样的锁相环节, 保持交流电流的正弦波形可以通过 Park 变换来实现。

(3) 保持相电压和相电流同相位。

由式(8)可知, 电网侧变流器与电网交换的无功功率  $Q_g$  可以通过  $i_{gq}$  来控制, 而保持相电压与相电流同相位就是保持交流侧功率因数为 1, 所以可将控制系统中  $i_{gq}$  的参考输入量  $i_{gq}^{ref}$  值设为零, 即可满足相电压与相电流同相位的要求。

### 2.2 电网侧变流器控制系统设计

#### 2.2.1 保持直流电压 $u_{dc}$ 恒定的控制系统设计

由式(9)(10)可知, 直流电压控制系统包括电流内环与直流电压外环。对不计前馈量的式(10)进行拉氏变换后可知, 直流电压控制系统的电流内环与转子侧变流器控制系统的电流内环具有相同的开环传递函数, 故可采用同样的设计方法。图5给出了校正前与校正后直流电压控制系统中电流内环阶跃响应的比较结果。

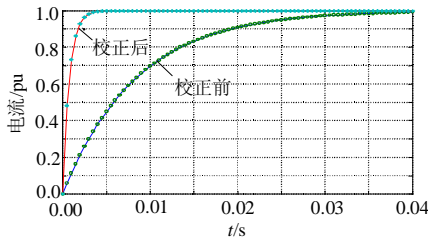


图 5 校正前后电流内环控制系统阶跃响应比较

Fig. 5 The comparison between the unit step response of inner current loop with or without compensation unit

将电流内环系统看作直流电压外环系统的一部分并考虑扰动量的影响, 根据文献[8,15], 式(2)(3)可变为

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{4\sqrt{2}} mi_{gd} - Bu_{dc} \quad (11)$$

式中: 参数  $B$  表示对扰动量  $i_{dcr}$  的阻尼。

对式(11)进行拉氏变换并考虑电流内环的影响, 最终得到电压外环控制系统的开环传递函数。仍然采用同样方法设计 PI 调节器, 图 6 给出了校正前后直流电压外环控制系统单位阶跃响应的比较结果。

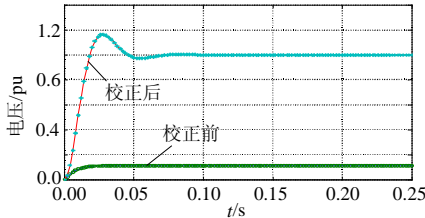


图 6 校正前后直流电压外环控制系统单位阶跃响应比较

Fig. 6 The comparison between the unit step response of inner current loop with or without compensation unit

### 2.2.2 保持相电压和相电流同步的控制系统设计

根据 2.1 节可知, 保持交流侧相电压与相电流同步可通过令  $Q_g = 0$  实现; 又由式(8)可知,  $i_{gq} = 0$  即可保证  $Q_g = 0$ , 因此可得保持交流侧相电压与相电流同相位的控制框图如图 7 所示。采用直流电压控制系统中电流内环系统的设计方法可以确定 PI 调节器的参数。

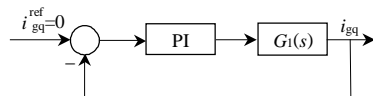


图 7 保持相电压、相电流同相位的控制框图

Fig. 7 The control block of keeping phases equality of ac voltage and ac current

## 3 DFIG 变速风电机组控制策略

### 3.1 跟踪机组最优功率曲线的控制策略

DFIG 变速风电机组有功功率的控制策略为: 风速低于额定风速时, 跟踪机组最优功率曲线; 高

于额定风速时, 保持机组出力恒定。无功功率的控制策略分为恒功率因数控制模式与恒电压控制模式。风速低于额定风速时, 有功功率的控制策略是采用曲线拟合的方法将与风电机组最优功率曲线对应的转速-定子功率曲线拟合为发电机转速  $w_r$  为自变量, 定子优化功率  $P_{sopt}$  为函数的多项式  $f(w_r)$ , 然后按照下列步骤进行控制:

(1) 在每个仿真步长内取双馈电机转子转速为多项式  $f(w_r)$  的自变量, 得出与该转速对应的定子最优功率  $P_{sopt}$ , 而转子回路将自动按照  $P_r = P_s s$  (其中  $s$  为双馈电机转子滑差)与电网进行功率交换。

(2) 将步骤(1)中得到的  $P_{sopt}$  作为转子侧变流器控制系统的输入参考功率, 从而保证了整个变速风电机组发出的功率为最优功率  $P_{opt}$ 。

DFIG 变速风电机组在风速高于额定风速时保持出力恒定的控制目标由桨距角控制系统实现, PSCAD/EMTDC 模型库中已经提供了该系统的模型。

### 3.2 无功功率控制策略

考虑到采用恒功率因数控制模式的变速机组在市场上占主流地位, 本文将主要研究该模式。恒功率因数控制模式要求风电机组发出的无功功率按照  $Q = P \tan j$  变化, 满足风电机组恒功率因数控制模式要求的控制框图如图 8 所示, 其中  $P_{opt}^{ref}$  为有功功率控制系统中的给定参考值。

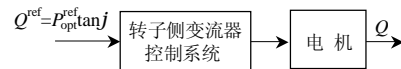


图 8 保持恒功率因数控制框图

Fig. 8 The diagram of constant power factor control

## 4 控制系统校验

### 4.1 转子侧变流器控制系统校验

将上述控制系统与 PSCAD/EMTDC 模型库中的风力机模型、机械传动系统模型、绕线式转子感应电机模型以及风力机桨距角调节系统组合在一起, 形成完整的 DFIG 变速风电机组动态模型。下面根据 DFIG 变速风电机组控制系统在单位阶跃输入下的性能指标对控制系统模型进行校验, 这些指标包括转子侧变流器和电网侧变流器的内环系统无稳态误差, 上升时间不大于 0.002s; 外环系统无稳态误差, 上升时间不大于 0.02s。

假定在仿真时间的第 2s 风速  $v_w$  从 10 m/s 变化到 11 m/s, 双馈电机定子绕组有功功率与无功功率的变化如图 9 所示。假设风电机组运行在恒定功率

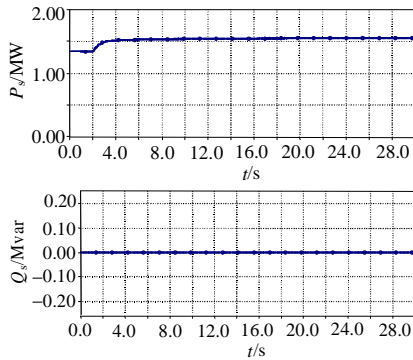


图 9 风速突变时定子绕组有功与无功功率变化过程  
Fig. 9 The change course of the stator-side active and reactive power

因数控制模式下, 且功率因数  $\cos j = 1.0$ 。当风速从 10m/s 变化到 11 m/s 时, 有功功率的变化不会对无功功率造成影响, 满足对定子绕组有功功率与无功功率解耦控制的要求。

#### 4.2 电网侧变流器控制系统校验

##### 4.2.1 保持直流电压 $u_{dc}$ 恒定

风速变化情况同前, 直流电压  $u_{dc}$  的变化过程如图 10 所示。可见风速突变引起了  $u_{dc}$  的波动, 不过在控制系统的作用下  $u_{dc}$  很快恢复到给定运行点, 因此符合控制目标要求。

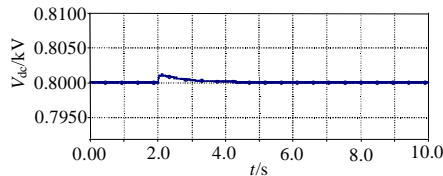


图 10 风速突变时  $U_{dc}$  的变化过程  
Fig. 10 The change course of the DC-link voltage

##### 4.2.2 保持相电压和相电流同相位

DFIG 变速风电机组在次同步与超同步运行状态时, 电网侧变流器交流侧电压与电流波形如图 11

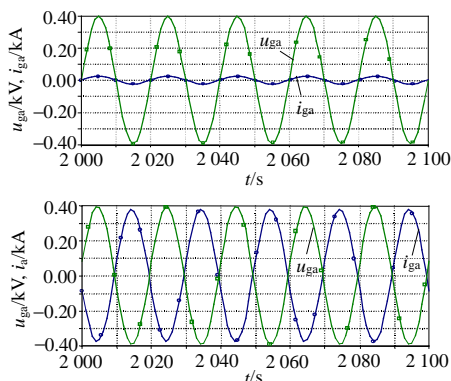


图 11 次同步与超同步运行时电网电压与电网电流波形  
Fig. 11 The voltage and current waveform of sub-synchronous and super-synchronous operation

所示, 图中只给出了 a 相电网电压  $u_{ga}$  与电网电流  $i_{ga}$  的波形。由图 11 可知, DFIG 变速风电机组无论在次同步运行状态或超同步运行状态均可以保持电网侧变流器交流侧电压与电流同相位, 因此符合控制目标要求。

## 5 DFIG 变速风电机组动态模型整体校验

### 5.1 跟踪最优功率曲线

采用本文提出的控制策略得到的计算结果与某变速风电机组给定功率曲线的比较结果如图 12 所示, 可见本文提出的控制策略可以满足变速风电机组按照最优功率曲线运行的要求。

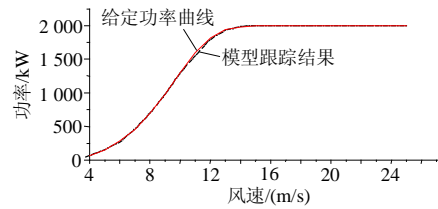


图 12 给定功率曲线与模型跟踪结果比较

Fig. 12 The comparison between a curve provided by a manufacturer and the curve which is the simulation

### 5.2 保持恒定功率因数运行

假定风电机组运行在  $\cos j = 0.99$  (感性) 的恒功率因数模式下, 风速变化情况同前, 机组有功功率与无功功率的变化规律如图 13 所示。可见本文建立的 DFIG 变速风电机组动态模型无论在风速突变前或突变后均严格保持恒定功率因数不变, 符合恒定功率因数控制模式的要求。风电机组运行在其他不同功率因数时, 也可以得到相同的结论。

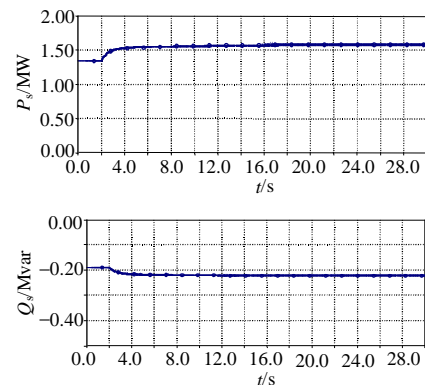


图 13 运行在  $\cos j = 0.99$  (感性) 的恒功率因数模式下的风电机组有功与无功功率变化过程

Fig. 13 The change course of the model output active and reactive power

## 6 结束语

根据 DFIG 变速风电机组中转子侧变流器、电

网侧变流器控制目标的要求,应用电机矢量控制原理、PI串联校正等方法设计了针对双馈电机的控制系统。按照DFIG变速风电机组跟踪最优功率曲线与恒功率因数控制模式的要求给出了控制策略。最后将控制系统与PSCAD/EMTDC模型库中已有模型相结合,形成了基于PSCAD/EMTDC的DFIG变速风电机组动态模型。针对DFIG变速风电机组的运行特性对本文建立的动态模型进行了校验并验证了其有效性。应用本模型可在PSCAD/EMTDC仿真平台上对DFIG变速风电机组的各种运行状态进行详细分析,从而为研究DFIG变速风电机组的运行特性提供新的手段。

## 参考文献

- [1] Pöller M. Doubly-fed induction machine models for stability assessment of wind farms[C]. Proceedings of IEEE-Power-Tech Conference, Bologna, Italy, 2003.
- [2] Akhmatov V. Variable speed wind turbines with doubly-fed induction generators, Part I: Modeling in dynamic simulation tools[J]. Wind Engineering, 2002, 26(2): 85-107.
- [3] 卞松江, 吕晓美, 相会杰, 等. 交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 57-62. Bian Songjiang, Lü Xiaomei, Xiang Huijie, et al. Modeling and simulation of AC excited VSCF in wind power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 57-62(in Chinese).
- [4] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 考虑变频器特性的变速恒频双馈风力发电机组控制策略的研究与仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 11-16. Li Jing, Song Jiahua, Wang Weisheng. Study and dynamic simulation of control strategy for variable speed wind turbine with doubly-fed generator considering frequency converter characteristics[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 11-16(in Chinese).
- [5] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105. Li Jing, Song Jiahua, Wang Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105(in Chinese).
- [6] Holdsworth L, Wu X G, Ekanayake J B, et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed-induction wind turbines during power system disturbances[J]. IEE Proc.-Gener.Transm.Distrib. 2003, 150(3): 343-352.
- [7] 闫耀民. 双馈调速风力发电机系统的研究[D]. 北京: 北方交通大学, 2003.
- [8] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation[J]. IEE proceedings on Electric Power Applications. 1996, 143(3): 231-241.
- [9] Petersson A. Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines[D]. Sweden: Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, 2003.
- [10] Sun Tao. Power quality of grid-connected wind turbines with DFIG and their interaction with the grid[D]. Denmark: Engineering & Science at Aalborg University, 2004.
- [11] Vladislav A. Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power[D]. Denmark: Electric Power Engineering, Technical University of Denmark, 2003.
- [12] Ekanayake J B, Wu X G, Jenkins N. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Trans on power systems, 2003, 18(2): 803-809.
- [13] Lewis P H, Yang C. Basic control system engineering[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [14] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [15] Brune C, Spee R. Experimental evaluation of a variable-speed doubly fed wind power generation system[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1994, 30(3): 648-655.

收稿日期: 2007-03-05.

### 作者简介:

冯双磊(1980—), 男, 博士研究生, 从事电力系统分析与新能源发电领域的研究工作, E-mail: [fengsl@epri.ac.cn](mailto:fengsl@epri.ac.cn);

赵海翔(1969—), 男, 博士, 从事电力系统分析与新能源发电领域的研究工作, E-mail: [zhaohx@epri.ac.cn](mailto:zhaohx@epri.ac.cn);

任普春(1974—), 男, 硕士, 从事电网规划、风力发电领域的相关工作;

王伟胜(1968—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统分析与新能源发电领域的研究工作, E-mail: [wangws@epri.ac.cn](mailto:wangws@epri.ac.cn);

戴慧珠(1939—), 女, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统和风力发电领域的教学和研究工作。

(责任编辑 王金芝)

## 国家电网公司“户户通电”工程完成情况月报

2007年7月份,国家电网公司系统(含内蒙古电力公司)完成无电户通电58462户,完成投资7.3737亿元。2007年累计完成312387户,占2007年通电计划的77.6%,完成投资36.7056亿元。江西电力公司和东北电网公司分别于3月和6月完成“户户通电”任务。“户户通电”工程实施以来,共解决857772户无电户通电问题,占计划的80.3%,完成投资91.2104亿元,新建与改造110kV线路35km,35kV线路1317km,10kV线路38826km,低压线路91488km,新建与改造110kV变电站4座,新建与改造35kV变电站72座,新建与更换配电变压器26715台。