

# 微电网中带蓄电池的 DFIG 动态模型仿真

宋明玉<sup>1</sup>, 曾成碧<sup>1</sup>, 陈嵩峰<sup>2</sup>

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省电力公司 乐山电业局, 四川 乐山 614000)

**摘要:** 通过分析双馈电机的数学模型,建立了基于定子磁链定向矢量控制的双馈异步风力发电机模型,并且在转换器直流侧加入蓄电池,在风力不足和大电网发生故障时给转换器转子侧或电网侧注入功率。以一个 20 kV 电源等效电网模型建立微电网系统,利用电力系统分析软件 PSCAD/EMTDC 分别对不带蓄电池的风力发电机和带蓄电池的风力发电机进行仿真。仿真结果表明,该控制方式能够实现双馈式异步风力发电机的有功、无功解耦。在变换器侧加入蓄电池,可改善电网质量,当负荷产生波动时能提高电压稳定性,还节约了变频器资源,节省了开支。

**关键词:** 微电网; 双馈异步发电机; 蓄电池; 矢量控制; 解耦控制

**中图分类号:** TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2010)03-0015-04

## Dynamical simulation on DFIG with a fuel cell in the micro-grid

SONG Ming-yu<sup>1</sup>, ZENG Cheng-bi<sup>1</sup>, CHEN Shong-feng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Leshan Electric Power Bureau, Leshan 614000, China)

**Abstract:** This paper analyses the mathematical model of the double-fed motor, proposes a doubly-fed induction generator (DFIG) based on the directional vector control of stator flux, and the storage battery is connected across the DC link of the converters injecting power either into the rotor or the grid circuit when the wind is insufficient and a fault occurs in the grid. A voltage source of 20kV is taken as the equivalent power grid model, establishes a micro-grid system. With the power system analysis software PSCAD/EMTDC for simulating DFIG with storage battery and DFIG without storage battery respectively, the results show that the control can realize the active and in-active decoupled control. Adding a storage battery by the converters can improve power quality, and voltage stability when the load fluctuation occurs. Meanwhile, the cost of the converters is saved to some extent.

**Key words:** micro-Grid; doubly-fed induction generator; storage battery; vector control; decoupled control

### 0 引言

微电网 (Micro-Grid) 是由分布式电源 (DG)、储能装置、可控负荷和保护装置组成的低压配电网<sup>[1],[2]</sup>。微电网既可以与大电网并列运行,也可以脱离大电网以孤岛的形式单独运行。并网运行时,微电网通过公共连接点 (PCC) 与大电网相连,当大电网发生故障或出现大的扰动时,微电网迅速断开与大电网的连接,成为孤岛运行模式。

中国是一个风力资源丰富的国家,风力发电作为分布式电源之一受到了越来越多学者的关注。由于风能的随机性和不稳定性,研究人员提出了变速恒频风力发电技术。采用变速恒频发电技术,可使发电机组与电网系统之间实现良好的柔性连接<sup>[3]</sup>。本文以双馈感应电机矢量控制变速恒频风力发电为基础,建立双馈感应风力发电机 (DFIG) 模型,将风力发电与蓄电池结合,构成微电网系统,在电力系统分析软件 PSCAD/EMTDC

收稿日期: 2009-11-09。

作者简介: 宋明玉 (1985-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电技术。E-mail: songmingyu85@163.com

环境下进行了微电网动态仿真。

## 1 系统模型

### 1.1 带蓄电池的 DFIG 模型

带蓄电池的双馈异步风力发电机由风力机,双馈异步发电机,蓄电池和双 PWM 变换器组成(图 1)。DFIG 的定子绕组直接接入电网,同时,DFIG 的转子绕组通过双 PWM 变换器接入电网。

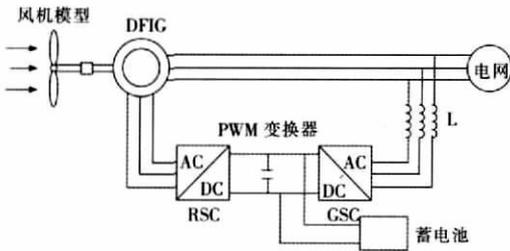


图 1 双馈感应风力发电机结构图

Fig.1 Structure diagram of doubly-fed induction generator

### 1.2 DFIG 的控制

本文假设定子和转子侧都采取电动机惯例,此时,双馈发电机在同步旋转 d-q 坐标系下的数学模型为<sup>[4]</sup>

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + p\psi_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + p\psi_{dr} - \omega_2 \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + p\psi_{qr} - \omega_2 \psi_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\omega_1$  为发电机电源频率对应的角速度; $\omega_2$  为交流励磁电源频率对应的角速度, $\omega_2 = \omega_s - \omega_r$ ;下标 s,r 分别表示定、转子; $u$  为电压; $i$  为电流; $R$  为电阻; $L_m$  为激磁电抗, $L_s = L_m + L_{os}$ , $L_r = L_m + L_{or}$ ; $\psi$  为磁链; $P$  为微分算子。

### 1.3 转子侧变换器的矢量控制

转子侧矢量控制是为了确保对定子绕组有功功率与无功功率进行解耦控制,以实现风能最大捕获的最优速度跟踪。在同步旋转 d-q 坐标参考系下,d 轴方向与定子磁链方向一致,此时, $\psi_{qs} = 0$ ,忽略定子绕组压降,定子磁场方向落后于定子电压方向  $90^\circ$ ,则  $u_{ds} = 0$ 。此时

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r p i_{dr} - \omega_2 \sigma L_r i_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r p i_{qr} + \omega_2 (\frac{L_m}{L_s} \psi_{ds} + \sigma L_r i_{dr}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_{qs} i_{qs} \\ Q_s = \frac{3}{2} u_{qs} i_{ds} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\sigma = 1 - (L_m^2 / L_r L_s)$ 。

根据以上式子,可得出 DFIG 转子侧控制系统框图(图 2)。

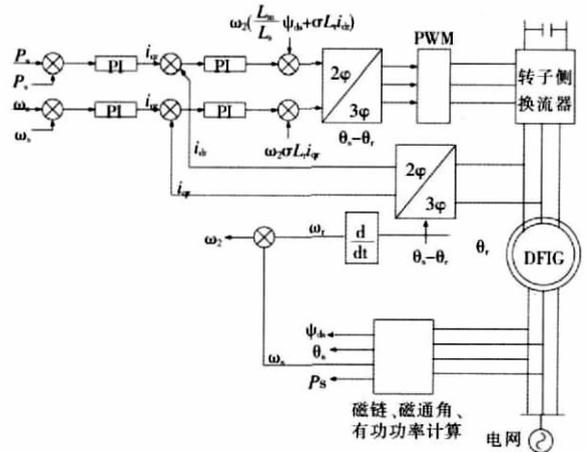


图 2 转子侧变换器矢量控制框图

Fig.2 Vector control diagram of the rotor side converter

### 1.4 电网侧变换器的矢量控制

在两相同步旋转 d-q 坐标系下电网侧 PWM 变换器的数学模型<sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} u_d = LPi_d + Ri_d - \omega_e Li_q + V_d \\ u_q = LPi_q + Ri_q - \omega_e Li_d + V_q \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u_d, u_q$  为电网电动势矢量的 d-q 分量; $V_d, V_q, i_d, i_q$  分别为电网侧变换器电压、电流矢量的 d-q 分量; $\omega_e$  为电网电压电气角速度。

电网侧变换器与电网之间的有功功率  $P$  与无功功率  $Q$  为

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

和转子侧类似,参考坐标系的 d 轴方向和电网的电压方向一致,q 轴沿旋转方向超前 d 轴  $90^\circ$ 。将 d 轴定于电网电压空间矢量方向上,有  $u_q = 0$ 。

此时

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} u_d i_d \\ Q = -\frac{3}{2} u_q i_q \end{cases} \quad (7)$$

由于考虑蓄电池的情况和不考虑蓄电池的情况相同<sup>[6],[7]</sup>,那么

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_g - i_r \quad (8)$$

式中:  $C$  为电容;  $u_{dc}$  为电容两端的直流电压;  $i_g$  为从网侧流入的电流;  $i_r$  为流向转子侧的电流。

$$\begin{aligned} i_g &= \frac{P}{u_{dc}}; \\ i_r &= \frac{P_r}{u_{dc}}; \\ P_r &= \frac{3}{2} (u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr}) \end{aligned} \quad (9)$$

由上式可见,  $d$  轴电流可控制  $u_{dc}$  及有功功率  $P$ ,  $q$  轴电流可控制无功功率  $Q$ 。因此,可得到网侧控制系统(图 3)。

$$\begin{cases} V_d = u_d + \omega_e L i_q - (L P i_d + R i_d) \\ V_q = -\omega_e L i_d - (L P i_q + R i_q) \end{cases} \quad (10)$$

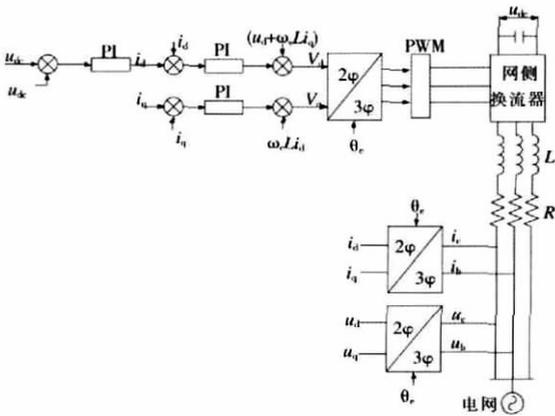


图 3 网侧变换器矢量控制框图

Fig.3 Vector control diagram of the grid side converter

## 2 系统仿真

在本文中,大电网由一个 20 kV 三相电源代替,微电网通过一个断路器与主电网相连,系统频率为 50 Hz,负荷采用恒功率模型,在 PSCAD/EMTDC 软件平台中分别对不考虑蓄电池时的风力发电机和带蓄电池的风力发电机进行仿真,最

后比较仿真结果。

本文采用的风速模型如图 4 所示,仿真时间为 2 s。

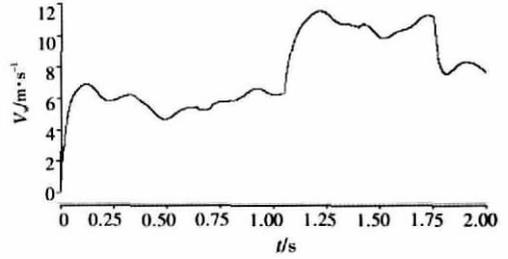
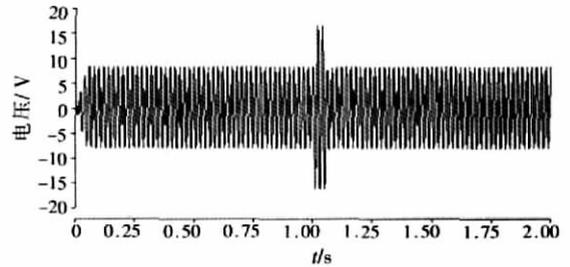


图 4 风速模型

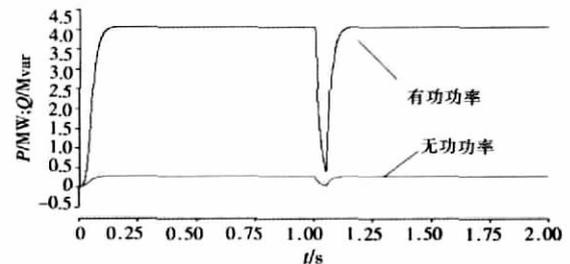
Fig.4 The wind speed model

双馈异步风力发电机仿真参数设置:额定功率 2 MW; 额定电压 380 V;  $R_r=0.021$ ;  $R_s=0.043$ ;  $L_m=1$ ;  $L_c=0.0613$ ;  $L_r=0.0613$ ;  $P=2$ 。

在考虑加蓄电池的情况下,在 1 s 的时候,大电网发生故障,风力发电机与大电网断开,1.05 s 时故障修复,风力发电机再次并网,与大电网相连。由仿真结果显示,网侧电压在 1 s 的时候,由于负载的减少电压突然增加,在 1.05 s 时恢复到原来值[图 5(a)];图 5(b)显示,输出有功功率在 1 s 时突然下降,1.05 s 恢复原值,无功功率产生较小的波动。



(a) 负载端电压



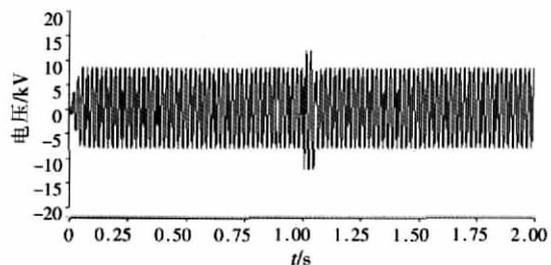
(b) 输出有功、无功功率

图 5 不考虑蓄电池时的仿真结果

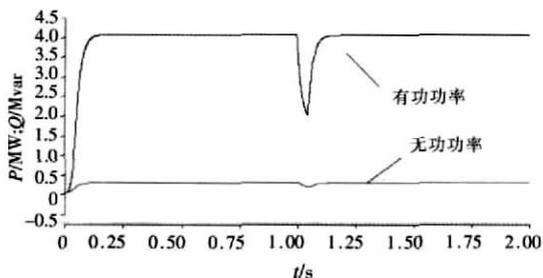
Fig.5 The simulation results without the storage battery

考虑蓄电池情况下的仿真结果显示,在 1 s

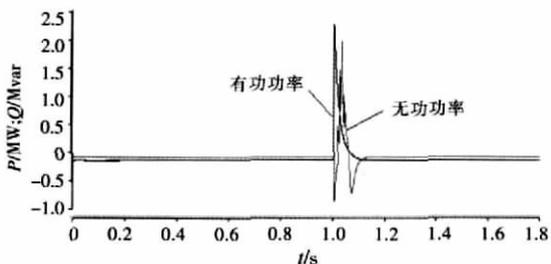
的时候,大电网发生故障,此时由于网侧电压负载的减少,电压将突然增加,但是由于蓄电池的作用,此时负载端电压的增加明显减少 [图 6(a)],有功功率、无功功率的下降也明显减少 [图 6(b)].在大电网断开时蓄电池放电,直到大电网恢复,此时蓄电池发出的有功功率和无功功率如图 6(c)所示。



(a) 负载端电压



(b) 输出有功、无功功率



(c) 蓄电池出力

图 6 加上蓄电池时的仿真结果

Fig.6 The simulation results with a storage battery

### 3 结论

介绍了双馈异步风力发电机模型结构,应用发电机矢量控制技术设计了控制系统。在变频器侧加入蓄电池,节约了变频器资源,节省了开支。在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中,对并网运行发电机状况进行的仿真结果显示,本文设计的双馈异步风力发电机实现了定子有功功率和无功功率的解耦控制,在加入蓄电池的同时,改

善了电网质量,在负荷产生波动时,可以起到稳定电压的作用。

### 参考文献:

- [1] 钱科军,袁越.分布式发电技术及其对电力系统的影响[J].继电器.2007,35(13):25-29.
- [2] YISHU ZHAO, LI GUO. Dynamical simulation of laboratory microGrid [J].IEEE Power and Energy Engineering Conference, 2009, 27(1):1-5.
- [3] 孙蕾,吴涛,樊小伟,等.双馈异步风力发电机组运行特性仿真分析[J].电力科学与工程,2009,25(6):05-09.
- [4] 白廷玉,李和明.基于 DFIG 的变速恒频风力发电机组控制策略[J].电力科学与工程,2008,24(4):1-4.
- [5] 张崇魏,张兴.PWM 整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [6] PALLE B, SIMOES M G. Dynamic integration of a grid connected DFIG wind turbine with a fuel cell[J].IEEE Industry Applications Conference, 2007, 23 (4):650 - 655.
- [7] PALLE B, SIMOES M G, FARRET F A. Dynamic Interaction of an intergrated doubly-fed induction generator and a fuel cell connected to grid[J]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2005, 16:185-190.
- [8] 谢震,张兴,杨淑英.变速恒频双馈风力发电机控制策略[J].变频器世界,2009(5):37-39.
- [9] 尹明,李庚银,赵辉,等.双馈式感应风力发电机组建模及其控制研究[J].华北电力大学学报,2007,35(5):17-21.
- [10] 王成山,肖朝霞,王守相.微网综合控制与分析[J].电力系统自动化. 2008, 32 (7) :98-103.
- [11] 任景. 变速恒频风力发电机组动态模型及并网研究 [J].电网与水力发电进展, 2008, 24(1):8-13.
- [12] 王纯琦,吐尔逊·依布拉音,晁勤. 基于 Matlab 的含风电电网建模与仿真[J].可再生能源, 2006, 24 (5):61-64.
- [13] J B EKANAYAKE, L HOLDSWORTH, XUEGUANG WU, et al. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines [J]. IEEE Trans, 2003, 18 (2): 803-809.
- [14] C J HATZIADONIU, A A LOBO, F POURBOCHRAT, et al. A simplified dynamic model of grid-connected fuel-cell generators [J].IEEE Trans, 2002, 17 (2):467-473.