

# 双馈风电机组低电压穿越能力的研究

李鹏程 晁 勤

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘 要:** 随着风电机组容量的逐年增大,为减少大规模风电接入系统对电网的影响,对风电提出了新要求,即风电机组具有一定的低电压穿越能力。介绍了变速恒频双馈风电机组的基本结构,建立了双馈风电机组动态数学模型。以 Matlab/Simulink 为仿真平台搭建了系统仿真模型,结合风电场低电压穿越能力要求的规定,针对不同电网电压跌落的情况下,仿真研究了变速恒频风电机组的低电压穿越能力。结果表明:双馈风电机组在电网电压跌落时满足继续并网运行的条件,且为电网电压恢复提供了无功,提供的无功功率大小与电网电压跌落程度有关。

**关键词:** 双馈风力发电机; 电压跌落; 低电压穿越能力; 仿真研究

**Abstract:** The installed capacity of wind power generating set is increasing yearly, in order to reduce the impact of a large-scale wind farm on power grid, the new regulations for wind power are proposed, that is, the wind power generating set has the ability of low voltage ride-through (LVRT). The basic structure of variable-speed constant-frequency wind power generating set is introduced and the dynamic mathematical model of doubly-fed wind power generating set is established. The simulation models are set up based on Matlab/Simulink. According to new regulations for the ability of LVRT of wind farm, the low voltage ride-through ability of variable-speed constant-frequency wind power generating set is studied under the different condition of voltage dip. The simulation results show that doubly-fed wind power generating set has met the new requirements in the case of voltage dip and can provide the reactive power which is decided by the amplitude of voltage dip.

**Key words:** doubly-fed wind power generator; voltage dip; low voltage ride-through (LVRT); simulation research

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0036-04

## 0 引 言

由于风力发电具有较好的经济效益和社会效益,使其发展受到世界各国的高度重视,同时也使风电机组的并网特性成为热门研究<sup>[1]</sup>。

目前,风力发电技术大体分为恒速恒频和变速恒频风力发电机组。变速恒频的双馈风电机组能够实现定子有功功率和无功功率的解耦控制,以及其优越的并网运行特性,使得双馈风电机组成为当前风电机组中的主流机型。

随着风力发电规模和单机容量的不断扩大,针对风电机组的并网运行要求也日益严格。目前许多标准规定要求风电机组具有一定的低电压穿越能力即电网电压跌落至一定范围时,风电机组必须不间断并网运行,因此研究风电机组低电压穿越能力意义重大。以往的多数关于低电压穿越能力的研究都集中于

联络线发生故障时电压恢复能力的分析<sup>[2,3]</sup>,文献[4]理论上阐述了提高风电机组低电压穿越能力的措施。根据变速恒频双馈风电机组的特性,在  $d-q$  坐标系下,建立了变速恒频风电机组的数学模型,并以 Matlab/Simulink 为仿真平台搭建了机组系统的仿真模块,结合新的风电场低电压穿越能力要求的规定,针对不同电网电压跌落的情况下,仿真研究了变速恒频双馈风电机组的低电压穿越能力,仿真结果为达坂城新一期的风电机组并网运行提供了理论依据。

## 1 双馈风电机组的结构与数学模型

### 1.1 双馈风电机组的控制结构

基于双馈发电机的风电机组主要包括风力机、绕线式感应电机、变频器和控制环节,其定子绕组直接接入电网,转子绕组采用三相对称绕组,经背靠背的 PWM 变频器与电网相连,为发电机提供交流励磁。其中网侧变流器的控制目的是满足电流波形和功率因数的要求,保证直流电压恒定;转子侧变流器的主

基金项目:国家自然科学基金项目(51067009)、新疆教育厅重点项目(XJEDU2009104)、新疆自然科学基金项目(2010211A10)

要任务是调节有功功率,实现最大风能捕获,同时为转子侧回路提供励磁,调节定子无功功率,其结构示意图见图1。

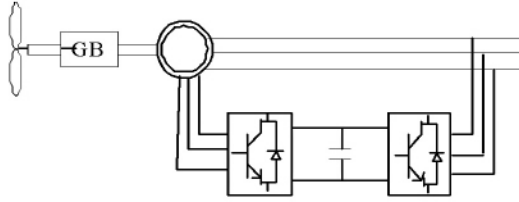


图1 双馈风电机组结构示意图

## 1.2 双馈风电机组的数学模型

### 1.2.1 风力机的数学模型

风力机通过叶片捕获风能,将风能转换为作用在轮毂上的机械转矩,风速与转矩之间的关系可表示为<sup>[5]</sup>

$$T_M = \frac{1}{2} \rho A C_p \frac{v_w \omega_N}{\omega} \times 10^3 \quad (1)$$

式中,  $T_M$  为风机叶片的转矩, p. u.;  $\rho$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_p$  为风机功率系数;  $A$  为风机叶片扫过的面积,  $\text{m}^2$ ;  $v_w$  为作用于风机的风速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\omega_N$  为风力机额定机械角速度,  $\text{rad}/\text{s}$ ;  $P_N$  为风力机的额定功率,  $\text{MW}$ 。

发电机转轴上的机械转矩  $T_m$  与发电机的电磁转矩  $T_e$  共同作用调节转子转速,设  $J$  为惯性时间常数,则

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (2)$$

从轮毂到发电机转子之间的联轴器和齿轮用一阶惯性环节来描述<sup>[6]</sup>,即

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{T_d} (T_M - T_m) \quad (3)$$

风电机组的电磁转矩  $T_e$  与机端电压  $U$  的平方成正比<sup>[7]</sup>,则方程式为

$$T_e = KsU^2 \quad (4)$$

式中,  $K$  为与机型有关的常数;  $s$  为滑差。

### 1.2.2 双馈发电机的暂态数学模型

选择以  $d-q$  同步旋转坐标系建立异步发电机的状态方程式<sup>[9]</sup>。

$$\begin{aligned} u_{ds} &= -R_s i_{ds} + \omega_s \psi_{qs} - \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} \psi_{ds} \\ u_{qs} &= -R_s i_{qs} - \omega_s \psi_{ds} - \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} \psi_{qs} \\ u_{dr} &= -R_r i_{dr} + s\omega_s \psi_{qr} - \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} \psi_{dr} \\ u_{qr} &= -R_r i_{qr} - s\omega_s \psi_{dr} - \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} \psi_{qr} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \\ \psi_{dr} &= X_r i_{dr} + X_m i_{ds} \\ \psi_{qr} &= X_r i_{qr} + X_m i_{qs} \\ s &= \frac{\omega_s - \omega_g}{\omega_s} \end{aligned} \quad (6)$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_g}{\omega_s} \quad (7)$$

其中  $\psi_{ds}$ 、 $\psi_{qs}$  表示定子磁链;  $\psi_{dr}$ 、 $\psi_{qr}$  表示转子磁链;  $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$  为定子电压;  $u_{dr}$ 、 $u_{qr}$  为转子电压;  $i_{ds}$ 、 $i_{qs}$  表示定子电流;  $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  为转子电流;  $s$  表示转差率;  $\omega_s$  为转子转速;  $\omega_g$  为同步转速;  $\omega_{base}$  为基频; 电机参数  $X_s$ 、 $R_s$ 、 $X_m$ 、 $X_r$ 、 $R_r$  分别表示定子电抗和电阻、互感电抗和转子电抗、电阻。

## 2 低电压穿越能力

风电机组的低电压穿越 (low voltage ride through, LVRT) 功能就是指机组在端电压降低到一定值的情况下不脱离电网而继续并网运行,甚至还可以为电网提供一定的无功以帮助电网电压恢复的能力。低电压穿越的提出主要是基于有功功率平衡的考虑,但对局部无功平衡也有好处。LVRT 功能可躲过保护动作时间,故障切除后恢复正常运行,可大大减少风电机组在故障时反复并网次数,减少对电网的冲击,图2给出了风机并网的规程<sup>[5]</sup>。

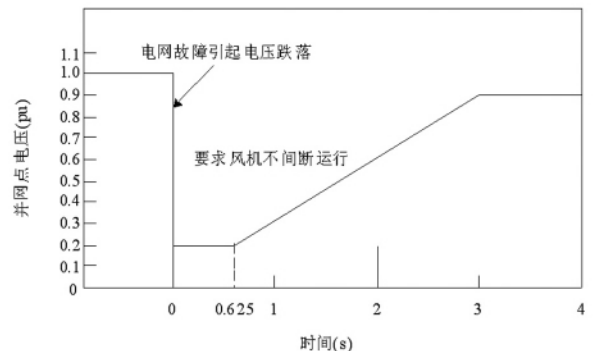


图2 风电机组 LVRT 运行曲线

## 3 仿真算例

### 3.1 仿真算例

采用的双馈风电机组的参数如下:风机的额定容量 1 500 kW,额定电压 690 V,风力机叶片半径  $R = 30$  m,发电机的转子电阻  $R_r = 0.0073$  p. u.,定子电阻  $R_s = 0.0076$  p. u.,定子电抗  $X_s = 0.1248$  p. u.,转

子电抗  $X_r = 0.0884 \text{ p.u.}$  ,发电机转动部分惯性时间常数  $T_j = 7.1$  极对数  $p = 3$  。含双馈风电机组的仿真示意图见图3。

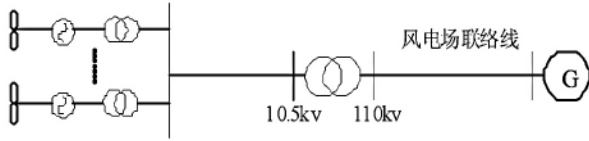


图3 风电机组接入系统示意图

### 3.2 运行特性

仿真中双馈机组稳定运行时基本风速为  $8 \text{ m/s}$  ,在  $5 \text{ s}$  时出现风速为  $14 \text{ m/s}$  的阵风干扰,持续在风速为  $14 \text{ m/s}$  下稳定运行,仿真结果见图4。

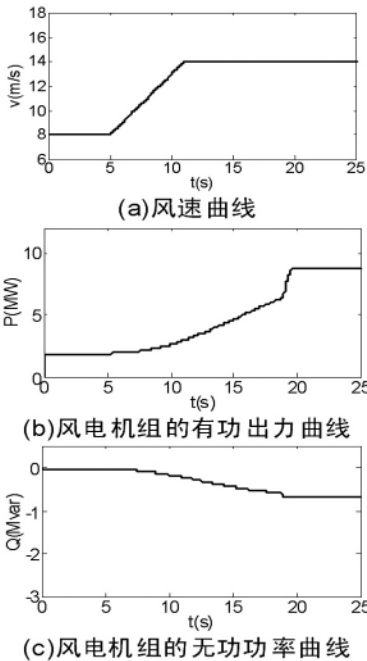


图4 双馈风电机组的运行特性曲线

仿真结果表明:随着风速的变化,其有功出力跟随风速的变化进行调节,使得变速恒频的风力发电机组实现了最大风能捕获,无功功率保持在0左右,即保持功率因数为1,实现了双馈风电机组的有功和无功的解耦控制,也验证了所建模型的合理性。

## 4 双馈机组的低电压穿越能力的研究

### 4.1 20% - 3 s 电压跌落

电网电压跌落20%持续时间为3s时,双馈风电机组的端电压、有功功率和无功功率变化曲线如图5所示。

仿真结果如图5表明:当电网电压跌落20%持续时间3s时,双馈风机端口电压略有所下降保持在

$0.9 \text{ p.u.}$  以上,电压跌落期间风机有功功率为0,并向电网提供了无功功率6.5 Mvar,风机能够不脱网继续运行且为发出的无功功率有利于电网电压恢复。

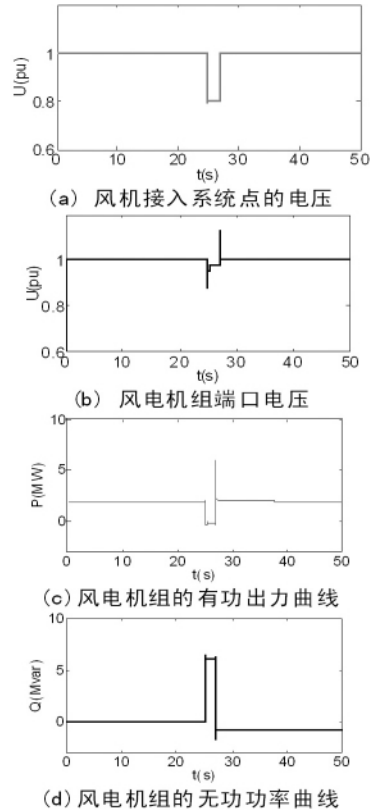


图5 20% - 3 s 电压跌落时风电机组的参数变化曲线

### 4.2 50% - 1s 电压跌落

电网电压跌落50%持续时间为1s时,双馈风电机组的端电压、有功功率和无功功率变化曲线如图6所示。

仿真结果表明:当电网电压跌落5%持续时间1s时,双馈风机端口电压略有所下降保持在  $0.7 \text{ p.u.}$  以上,电压跌落期间风机有功功率为0,并向电网提供了无功功率5 Mvar。电网电压跌落期间,风机能够不脱网继续运行,电压跌落消失后风机端电压能恢复至稳定运行的电压水平。

### 4.3 80% - 0.625 s 电压跌落

在电网电压要求中跌落最为严重的情况下(电网跌落至  $0.2 \text{ p.u.}$  ,持续时间625 ms),双馈风电机组的端电压、有功功率和无功功率变化曲线如图7所示。

由图7仿真结果可知:在电网电压跌落最严重的情况下,风机发出的无功功率为4.5 Mvar,待电网电压恢复至额定值时,风电机组能够不脱网继续并网运行,风机端电压恢复至稳定运行前电压水平。

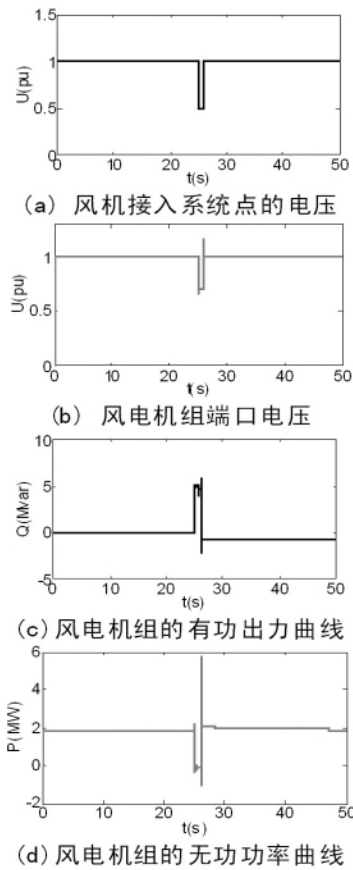


图6 20% -3 s 电压跌落时风电机组的参数变化曲线

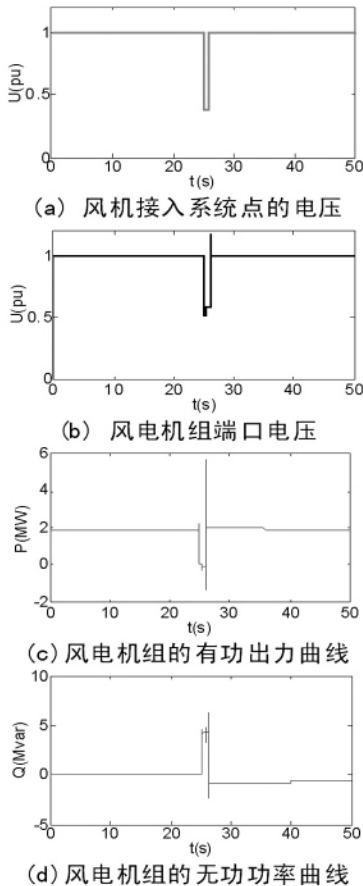


图7 80% -625 ms 电压跌落时风电机组的参数变化曲线

## 5 结论

基于 Matlab/Simulink 建立了含双馈式异步风力发电机的仿真模型,参照风电场低电压穿越能力要求的规定,对双馈风电机组的低电压穿越能力进行了仿真研究。仿真结果表明:双馈风电机组在电网电压跌落时能够继续并网运行,待电压跌落消失后能够恢复稳定运行,满足新的风电并网标准。电压跌落期间,风机发出一定无功功率,其无功功率的大小与电网电压跌落程度有关,也为电网电压恢复提供了无功支撑。

### 参考文献

- [1] 雷亚洲. 与风电电网的有关课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
- [2] 闫广新, 晁勤, 刘新刚, 等. 并网型双馈风电机组动态稳定性仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 63-66.
- [3] 邢文琦, 晁勤. 不同风电机组的低电压穿越能力分析[J]. 华东电力, 2008, 36(12): 21-25.
- [4] 操瑞发, 朱武, 涂祥寸, 等. 双馈式风力发电系统低电压穿越技术分析[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 72-76.
- [5] 关宏亮, 赵海翔, 王伟胜, 等. 风电机组的低电压穿越功能及其应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 173-177.
- [6] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊·依布拉音, 等. 关于风电场适应性继电保护的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 37(5): 47-51.
- [7] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊·依布拉音. 风电场对电网继电保护的影响[J]. 电网技术, 2007, 32(14): 15-18.
- [8] 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): 101-105.
- [9] Daniel J T, Andrew G, Jawad M K. Fixed-speed Wind-generator and Wind-park Modeling for Transient Stability Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1911-1917.

### 作者简介:

李鹏程(1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电及其并网技术;

晁勤(1959), 女, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定及风电并网技术。

(收稿日期: 2011-04-06)