

基于变结构控制的变速恒频双馈风力发电机并网控制

赵宇, 王奔, 仇乐兵, 吴维鑫

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 将矢量控制技术、逆系统方法、变结构控制技术相结合, 提出了一种新的变速恒频双馈风力发电机空载并网控制策略。双馈异步发电机的数学模型在 $m-t$ 坐标系下是一个非线性耦合系统。采用逆系统方法将转子电压方程线性化解耦, 构造出伪线性系统; 然后, 设计伪线性系统的变结构控制律; 利用 Matlab 软件搭建了变速恒频双馈风力发电系统的仿真模型, 进行仿真分析。仿真结果表明, 所采用的控制策略能够完成发电机平滑接入电网, 并网运行效果理想, 实现了定子输出有功与无功功率的独立调节。与 PI 控制方案相比, 变结构控制方案具有更好的动态响应性能。

关键词: 风力发电; 双馈异步发电机; 矢量控制; 变结构控制; 并网

中图分类号: TM 315; TM 614

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0077-05

0 引言

随着我国风力发电技术的迅速发展, 国内建设了一批大规模的并网风力发电工程, 对于大功率风力发电机组的需求越来越大。但是随着风力发电机组功率的增加, 并入电网时产生的冲击电流也随之增大, 严重时可能会导致风力发电系统无法接入电网。目前大型风力发电机组中, 双馈感应式变速恒频风力发电机组的应用最广泛, 实现变速恒频双馈风力发电机组无冲击电流并网技术越来越重要。

双馈风力发电机组采用的发电机为转子交流励磁的双馈异步发电机(DFIG)^[1-2]。定子绕组直接接入电网, 转子绕组由一台频率、电压可调的低频交流励磁变频器供给三相低频励磁电流, 在转子中形成一个低速旋转磁场, 这个磁场的旋转速度与转子的机械转速相加等于定子磁场的同步转速, 从而在发电机定子绕组中感应出工频电压。

目前已有不少文献应用矢量控制技术研究了双馈风力发电机的并网控制策略^[3-4]。传统的矢量控制结合 PI 控制来实现双馈风力发电机并网控制, 很难做到精确解耦控制。本文采用变结构控制与矢量控制技术相结合的控制策略, 来完成发电机组的并网控制, 利用 Matlab 软件建立空载并网仿真模型, 研究了变速恒频双馈风力发电机的空载运行及并网全过程。

1 控制策略

1.1 风力发电机空载并网原理

交流发电机的并网条件是, 发电机的输出电压与电网电压的幅值、频率和相位完全相同。因此, 并

网之前要对发电机的输出电压进行调节, 当满足并网条件时进行并网操作, 并网成功后, 发电机切换到发电控制。空载运行时, 取电网电压的频率、相位、幅值作为控制信息提供给控制系统, 据此调节发电机的励磁电压, 按并网条件控制发电机定子空载电压。

为了实现双馈风力发电机组并网前的端电压准确调节, 并网后的输出有功、无功功率的解耦控制, 本文采用了电机磁场定向的矢量控制策略。

1.2 DFIG 数学模型

定子侧电压、电流正方向取发电机惯例, 转子侧电压、电流正方向取电动机惯例, 可得到 DFIG 在定子同步速度 $m-t$ 两相坐标系下的数学模型^[5-6]。

定、转子电压方程为

$$\begin{cases} u_{m1} = -r_1 i_{m1} - p\psi_{m1} + \omega_1 \psi_{t1} \\ u_{t1} = -r_1 i_{t1} - p\psi_{t1} - \omega_1 \psi_{m1} \\ u_{m2} = r_2 i_{m2} + p\psi_{m2} - (\omega_1 - \omega_2) \psi_{t2} \\ u_{t2} = r_2 i_{t2} + p\psi_{t2} + (\omega_1 - \omega_2) \psi_{m2} \end{cases} \quad (1)$$

定、转子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{m1} = l_1 i_{m1} - l_M i_{m2} \\ \psi_{t1} = l_1 i_{t1} - l_M i_{t2} \\ \psi_{m2} = -l_M i_{m1} + l_2 i_{m2} \\ \psi_{t2} = -l_M i_{t1} + l_2 i_{t2} \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩、运动方程为

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} n_p l_M (i_{m1} i_{t2} - i_{t1} i_{m2}) \\ T_m - T_e = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_2}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

其中, r_1 、 r_2 分别为定、转子绕组等效电阻; l_1 、 l_2 、 l_M 分别为 $m-t$ 轴定、转子绕组自感及互感; i_{m1} 、 i_{t1} 、 i_{m2} 、 i_{t2} 、 u_{m1} 、 u_{t1} 、 u_{m2} 、 u_{t2} 分别为 $m-t$ 轴定、转子电流与电压; ψ_{m1} 、 ψ_{t1} 、 ψ_{m2} 、 ψ_{t2} 分别为 $m-t$ 轴定、转子磁链; ω_1 为定子同步电角速度; ω_2 为转子电角速度; $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$ 为转差角速度; p 为微分算子; J 为转动惯量; n_p 为电机极对数; T_e 、 T_m 分别为电磁转矩和机械转矩。

将式(2)代入式(1)整理得:

$$\begin{cases} u_{m1} = (-r_1 - l_1 p) i_{m1} + \omega_1 l_1 i_{l1} + l_{M1} p i_{m2} - \omega_1 l_{M1} i_{l2} \\ u_{l1} = -\omega_1 l_1 i_{m1} - (r_1 + l_1 p) i_{l1} + \omega_1 l_{M1} i_{m2} + l_{M1} p i_{l2} \\ u_{m2} = -l_{M1} p i_{m1} + \omega_s l_{M1} i_{l1} + (r_2 + l_2 p) i_{m2} - \omega_s l_2 i_{l2} \\ u_{l2} = -\omega_s l_{M1} i_{m1} - l_{M1} p i_{l1} + \omega_s l_2 i_{m2} + (r_2 + l_2 p) i_{l2} \end{cases} \quad (4)$$

空载时, $i_{m1} = i_{l1} = 0$, 代入式(4)化简得:

$$\begin{cases} u_{m1} = l_{M1} p i_{m2} - \omega_1 l_{M1} i_{l2} \\ u_{l1} = \omega_1 l_{M1} i_{m2} + l_{M1} p i_{l2} \\ u_{m2} = (r_2 + l_2 p) i_{m2} - \omega_s l_2 i_{l2} \\ u_{l2} = \omega_s l_2 i_{m2} + (r_2 + l_2 p) i_{l2} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)即为发电机空载时的数学模型。

1.3 定子磁场定向下发电机空载并网控制策略

为了使定子电压的相位、幅值、频率同电网电压保持一致, 满足并网要求, 需要根据电网电压的信息对转子励磁电流进行控制。由于大容量发电机在工频下电感远大于电阻, 所以电阻可以忽略不计。本文选取 m 轴方向与定子磁链方向重合, 定子端电压 u 滞后定子磁链 ψ_1 90° , U_m 为三相系统相电压的幅值, Ψ_1 为定子磁链幅值, 如图 1 所示。

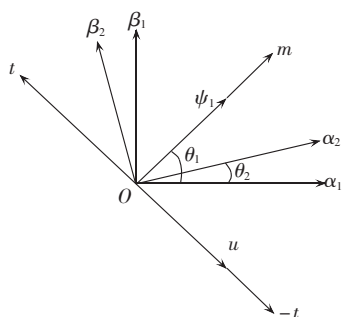


图 1 定子磁场定向示意图

Fig.1 Orientation of stator magnetic field

于是, 可得:

$$\begin{cases} \psi_{m1} = \Psi_1 \\ \psi_{l1} = 0 \\ u_{m1} = 0 \\ u_{l1} = -U_m \end{cases} \quad (6)$$

将式(4)代入式(1), 略去定子电阻, 得:

$$\dot{\psi}_1 = 0, \quad \psi_1 = U_m / \omega_1 \quad (7)$$

式(2)可化简为以下两式:

$$\psi_1 = -l_{M1} i_{m2}, \quad i_{l2} = 0 \quad (8)$$

$$\psi_{m2} = l_2 i_{m2}, \quad \psi_{l2} = 0 \quad (9)$$

将式(9)代入式(5)可得:

$$\begin{cases} u_{m2} = (r_2 + l_2 p) i_{m2} \\ u_{l2} = \omega_s l_2 i_{m2} \end{cases} \quad (10)$$

考虑到实际动态调节过程中的磁场定向误差, i_{l2} 可能不为零, 更通用的转子电压计算公式应为

$$\begin{cases} u_{m2} = (r_2 + l_2 p) i_{m2} - \omega_s l_2 i_{l2} \\ u_{l2} = (r_2 + l_2 p) i_{l2} + \omega_s l_2 i_{m2} \end{cases} \quad (11)$$

根据式(6)~(11)可得到变速恒频双馈风力发电机并网控制策略。空载并网时, 依据检测到的电网电压, 计算出参考定子磁链后对转子电流进行闭环控制。从式(11)可知, 转子电压、电流间除一阶微分关

系外, 还存在着交叉耦合。以往根据式(11)设计 PI 调节器, 转子电流经闭环调节后加上耦合补偿项得到转子电压, 很难做到精确解耦控制。本文采用逆系统线性化非线性控制技术实现系统解耦, 然后设计系统的变结构控制器完成控制。

1.4 转子电流变结构控制器设计

对于转子电压方程

$$\begin{cases} u_{m2} = (r_2 + l_2 p) i_{m2} - \omega_s l_2 i_{l2} \\ u_{l2} = (r_2 + l_2 p) i_{l2} + \omega_s l_2 i_{m2} \end{cases} \quad (12)$$

选取状态变量 $[x_1, x_2] = [i_{m2}, i_{l2}]$, 选取输入变量 $[u_1, u_2] = [u_{m2}, u_{l2}]$, 选取输出变量 $[y_1, y_2] = [x_1, x_2]$, 得到状态变量的表达式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = (-r_2 x_1 + \omega_s l_2 x_2 + u_1) / l_2 \\ \dot{x}_2 = (-r_2 x_2 - \omega_s l_2 x_1 + u_2) / l_2 \\ y_1 = x_1, \quad y_2 = x_2 \end{cases} \quad (13)$$

采用逆系统方法可得其逆系统如下:

$$\begin{cases} u_1 = l_2 \dot{y}_1 + r_2 x_1 - \omega_s l_2 x_2 \\ u_2 = l_2 \dot{y}_2 + r_2 x_2 + \omega_s l_2 x_1 \end{cases} \quad (14)$$

则在式(14)中, 取 $v_1 = \dot{y}_1, v_2 = \dot{y}_2$, 把逆系统串联在原系统之后, 原系统与逆系统就构成了一个伪线性系统。伪线性系统可解耦成 2 个独立的子线性系统:

$$\dot{x}_1 = v_1, \quad x_1 = y_1 \quad (15)$$

$$\dot{x}_2 = v_2, \quad x_2 = y_2 \quad (16)$$

对于式(15)子系统, 控制器的设计目标是: $x_1 \rightarrow x_1^*$, 应用变结构控制原理^[7-8], 取切换面 $s_1 = x_1 - x_1^*$, 采用趋近律设计方法^[10], 令 $\dot{s}_1 = -k_1 s_1 - \varepsilon_1 \text{sgn}(s_1)$, 则可得系统的变结构控制律如下:

$$v_1 = k_1(x_1^* - x_1) + \varepsilon_1 \text{sgn}(x_1^* - x_1) + \dot{x}_1^* \quad (17)$$

其中, $\text{sgn}(s_1)$ 为符号函数。

同理, 可设计式(16)子系统的控制律:

$$v_2 = k_2(x_2^* - x_2) + \varepsilon_2 \text{sgn}(x_2^* - x_2) + \dot{x}_2^* \quad (18)$$

图 2 所示为变结构控制与矢量控制相结合的风力发电系统空载并网控制原理图。

2 建模仿真

2.1 系统的仿真模型

本文利用 Matlab 软件, 构建了变速恒频双馈风力发电系统的仿真模型, 如图 3 所示。

发电机空载时定子电压为输出量, 并网时定子电压受电网电压的制约, 为输入量, 为此本文建立了空载与并网 2 个模型。仿真时, 空载模型首先运行, 进行并网控制过程仿真; 并网过程完成后, 将空载运行最后数据转移到并网模型, 转入并网运行, 实施最大风能追踪控制^[9-10], 实现有功、无功功率的独立调节。

2.2 系统仿真结果

在 Matlab 仿真模型基础上, 对系统空载、并网过渡过程进行仿真研究。DFIG 的仿真参数为: 定子绕

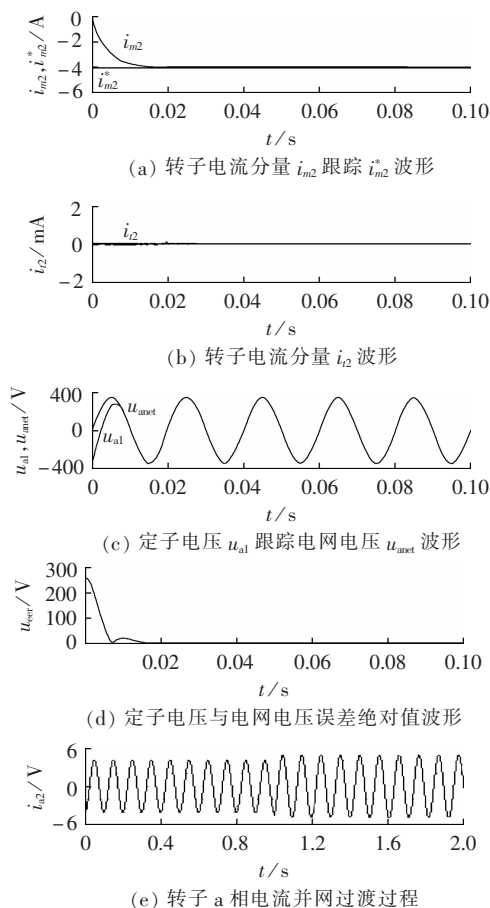


图 4 并网过程仿真波形

Fig.4 Simulative curves of cutting-in control

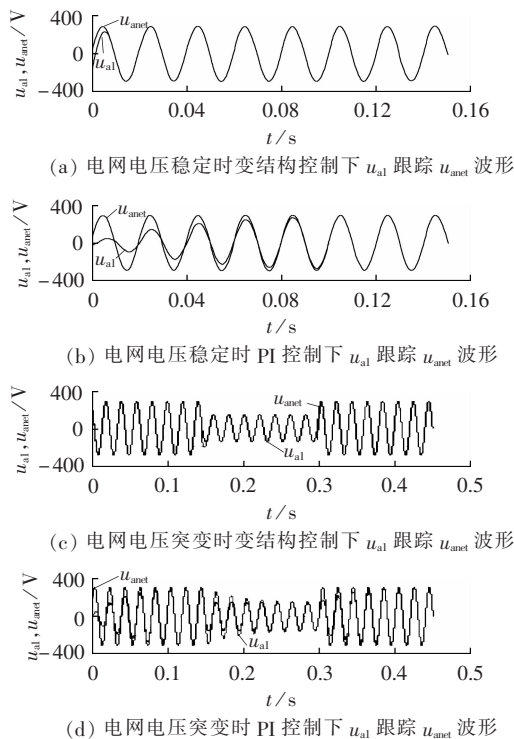


图 5 变结构控制与 PI 控制的仿真结果

Fig.5 Simulative results of variable structure control and PI control

跟踪指令值 P^* , 有功功率指令 P^* 需要从风能追踪的

角度求取。如图 6(b) 所示, 定子侧无功功率 Q 很好地跟踪给定值 600 var 保持不变, 这说明有功功率和无功功率能够实现独立调节。可见, 变结构控制方案很好地实现了系统有功功率与无功功率的解耦, 并且响应速度快, 在风速变化情况下跟踪效果比较理想。转子转速曲线如图 6(c) 所示, 当风速由 7.5 m/s 变为 8 m/s 时, 电机转速由 7.5 m/s 风速所对应的最佳转速 1225.4 r/min 变为 8 m/s 风速所对应的最佳转速 1306.8 r/min; 当风速由 8 m/s 变回 7.5 m/s 时, 电机转速又由 1306.8 r/min 变回 1225.4 r/min。这表明, 在风速的变化过程中, 控制系统能够实现最大风能捕获。

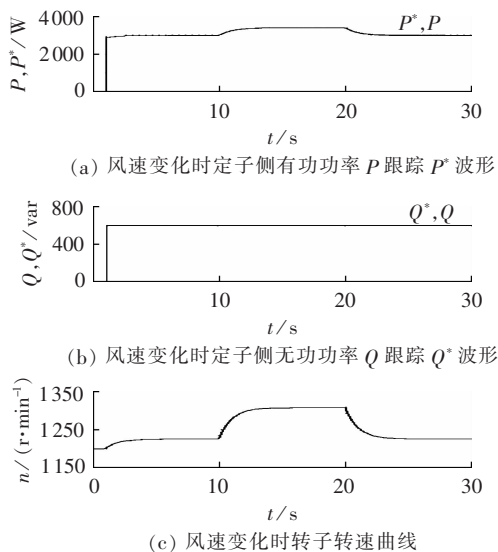


图 6 变结构控制下系统空载并网全过程

Fig.6 Simulative results of variable structure cutting-in control

3 结论

本文建立了变速恒频双馈风力发电系统的完整仿真模型, 采用变结构控制与矢量控制相结合的控制策略, 对发电机空载运行、并网全过程进行了仿真研究。仿真结果证明, 该控制策略能够实现发电系统平滑接入电网; 系统并网运行时, 有功功率与无功功率能够实现独立调节, 完成最大风能追踪控制; 该策略与 PI 控制的策略相比, 具有更好的动态响应性能。

参考文献:

- [1] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 30-36.
- [2] 陈伯时, 陈敏逊. 交流调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 66-69.
- [3] 史林军, 潘文霞, 白先红. 双馈型变速恒频风力发电机矢量控制模型的研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 15-17.
- SHI Linjun, PAN Wenxia, BAI Xianhong. Study on vector control model of variable-speed constant-frequency double-fed wind generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 15-17.
- [4] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.

- LIU Qihui, HE Yikang, BIAN Songjiang. Study on the no load cutting in control of the Variable Speed Constant Frequency (VSCF) wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11.
- [5] 孙国霞, 李啸懿, 蔡义明. 大型变速恒频风电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(10): 69-72.
- SUN Guoxia, LI Xiacong, CAI Yiming. Modeling and simulation of variable-speed wind generator system with large capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(10): 69-72.
- [6] 李晶, 王伟胜, 宋家骅. 双馈发电机简化动态模型及在风电系统中应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 58-62.
- LI Jing, WANG Weisheng, SONG Jiahua. Simplified dynamic model of double-fed induction generator and its application in wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1): 58-62.
- [7] 夏长亮, 王慧敏, 宋战锋, 等. 变速恒频双馈风力发电系统空载并网积分变结构控制[J]. 天津大学学报, 2008, 11(11): 1281-1286.
- XIA Changliang, WANG Huimin, SONG Zhanfeng, et al. Integral variable structure controller for no-load cutting-in control of variable speed constant frequency wind-power system with doubly-fed induction generator[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 11(11): 1281-1286.
- [8] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 34-36.
- [9] 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-Electric Power Applications, 1996, 143(3): 231-241.
- [10] TANG Y, XU L. A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 10(4): 472-478.

(编辑: 康鲁豫)

作者简介:

赵宇(1985-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为非线性控制技术在风力发电系统中的应用 (E-mail: zhaoyu_198502@126.com);

王奔(1960-), 男, 湖南衡阳人, 教授, 研究方向为电力系统非线性与变结构控制;

仇乐兵(1985-), 男, 湖南汨罗人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制;

吴维鑫(1985-), 男, 江西于都人, 硕士研究生, 研究方向为新型高压直流输电。

Cutting-in control based on variable structure control for VSCF doubly fed wind power generator

ZHAO Yu, WANG Ben, QIU Lebing, WU Weixin

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A control strategy is presented for the no-load cutting-in of VSCF doubly fed wind power generator, which combines the vector control, inverse system method and variable structure control. The math model of doubly fed induction generator is a nonlinear coupling system in $m-t$ coordinates. With the inverse system method, the rotator voltage equations are linearized and decoupled to build a pseudo linear system, for which the variable structure controller is designed. The simulative model of VSCF doubly fed wind power generation system is established with Matlab. Simulative results prove that the generator cuts in grid smoothly under the decoupled control of stator active power and reactive power. Compared with the PI controller, the variable structure controller shows better dynamic performance.

Key words: wind power generation; doubly fed induction generator; vector control; variable structure control; cutting-in