

变速恒频双馈风力发电机并网控制策略仿真研究

赵宇, 王奔, 张喜海, 李慧

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:根据变速恒频双馈风力发电机组的运行特点, 将矢量变换控制技术应用于发电机并网控制。利用 Matlab 软件建立空载并网仿真模型, 对并网前的空载运行、并网时的过渡过程进行了仿真研究。仿真结果表明, 所采用的空载并网技术是变速恒频双馈风力发电机的一种较理想并网方式。

关键词:交流励磁; 双馈风力发电机; 矢量控制; 并网

Abstract According to the operation performance of variable speed constant frequency (VSCF) doubly-fed wind-energy generator set vector control technique is presented to be used for grid connection control of generator. Using the Matlab software a no-load grid-connected simulation model is established and applied to make a comprehensive system simulation on the no-load operation before the connection with the grid and the transient process at the connection moment. Both simulation and experiment studies prove that the proposed no-load grid-connected scheme is a relatively ideal approach for VSCF doubly-fed wind-energy generator.

Key words: A. C. excitation; doubly-fed wind-energy generator; vector control; grid connection

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)02-0007-03

随着中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, 这给电力系统的安全运行带来了隐患。目前大型风力发电机组、双馈感应式变速恒频风力发电机组得到的应用最广, 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。

变速恒频双馈风力发电机采用双馈型异步发电机, 与传统的直流励磁同步发电机以及通常的异步发电机相比, 其并网过程有所不同。变速恒频双馈风力发电机采用交流励磁, 可根据电网电压和发电机转速来调节转子励磁电流, 以此来调节发电机输出电压以满足并网条件^[2], 可实现在变速的条件下进行并网。

采用矢量控制技术来设计风力发电机组的并网控制策略, 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并网过程。

1 变速恒频双馈风力发电机并网控制策略

1.1 风力发电机空载并网原理

交流发电机并网条件是发电机输出电压和电网

电压在幅值、频率以及相位上完全相同。因而并网前应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, 并网成功后从并网控制切换到发电控制。并网前发电机空载, 取电网电压(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, 按并网条件控制发电机定子空载电压。

为了实现交流励磁发电机并网前的端电压准确调节和并网后的输出有功、无功功率的解耦控制, 必须实施发电机磁场定向的矢量控制。

为此, 首先需要建立磁场定向 m-t 旋转坐标系内发电机的数学模型。

1.2 双馈发电机 (DFIG) 的数学模型

定子侧电压、电流正方向按照发电机惯例, 转子侧电压、电流正方向按照电动机惯例, 可写出双馈发电机在定子同步速 m-t 两相坐标系下的数学模型^[3]。

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

$$\begin{cases} \psi_{m1} = l_{m1} i_{m1} - l_m i_{h2} \\ \psi_{u1} = l_{u1} i_{u1} - l_m i_{h2} \\ \psi_{m2} = -l_m i_{h1} + l_{m2} i_{h2} \\ \psi_{u2} = -l_m i_{u1} + l_{u2} i_{h2} \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩、运动方程为

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} n_p l_m (i_{m1} i_{h2} - i_{u1} i_{h2}) \\ T_l - T_e = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_2}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中, r_s 、 r_r 分别为定转子绕组等效电阻; l_{m1} 、 l_{u1} 、 l_{m2} 、 l_{u2} 分别为 $m-t$ 轴定转子绕组自感及互感; i_{m1} 、 i_{u1} 、 i_{h2} 、 i_{h2} 、 u_{m1} 、 u_{u1} 、 u_{m2} 、 u_{u2} 分别为 $m-t$ 轴定转子电流与电压; ψ_{m1} 、 ψ_{u1} 、 ψ_{m2} 、 ψ_{u2} 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_l 分别为电磁转矩和机械转矩。

将式 (2) 代入式 (1) 整理得

$$\begin{cases} u_{m1} = (-r_s - l_p) i_{m1} + \omega_1 l_{u1} i_{u1} + l_m p i_{h2} - \omega_1 l_m i_{h2} \\ u_{u1} = -\omega_1 l_{m1} i_{m1} - (r_s + l_p) i_{u1} + \omega_1 l_m i_{h2} + l_m p i_{h2} \\ u_{m2} = -l_m p i_{h1} + \omega_s l_m i_{h1} + (r_r + l_p) i_{h2} - \omega_s l_{u2} i_{h2} \\ u_{u2} = -\omega_s l_{m1} i_{m1} - l_m p i_{u1} + \omega_s l_{u2} i_{h2} + (r_r + l_p) i_{h2} \end{cases} \quad (4)$$

空载时, $i_{h1} = i_{u1} = 0$ 代入式 (4) 化简得

$$\begin{cases} u_{m1} = l_m p i_{h2} - \omega_1 l_m i_{h2} \\ u_{u1} = \omega_1 l_m i_{h2} + l_m p i_{h2} \\ u_{m2} = (r_r + l_p) i_{h2} - \omega_s l_{u2} i_{h2} \\ u_{u2} = \omega_s l_{u2} i_{h2} + (r_r + l_p) i_{h2} \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 即为发电机空载时的数学模型。

1.3 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来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。选取 m 轴方向与定子磁链方向重合, 定子端电压矢量 u 滞后磁链矢量 $\psi_1 90^\circ$, u_m 为三相系统相电压的幅值, 如图 1 所示。

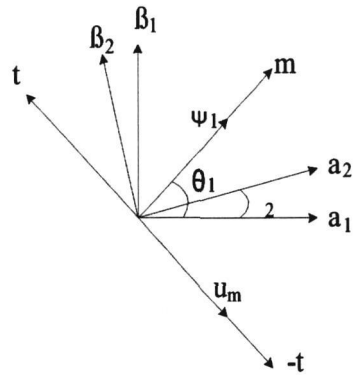


图 1 定子磁场定向示意图

于是, 可得

$$\begin{cases} \psi_{m1} = \psi \\ \psi_{u1} = 0 \\ u_{m1} = 0 \\ u_{u1} = -u_m \end{cases} \quad (6)$$

将式 (4) 代入式 (1), 略去定子电阻, 得

$$\begin{cases} \psi_1 = 0 \\ \psi_1 = u_m / \omega_1 \end{cases} \quad (7)$$

于是式 (2) 可化简为以下两式

$$\begin{cases} \psi_1 = -l_m i_{h2} \\ i_{h2} = 0 \\ \psi_{m2} = l_{u2} i_{h2} \\ \psi_{u2} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \psi_{m2} = l_{u2} i_{h2} \\ \psi_{u2} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (5) 可得

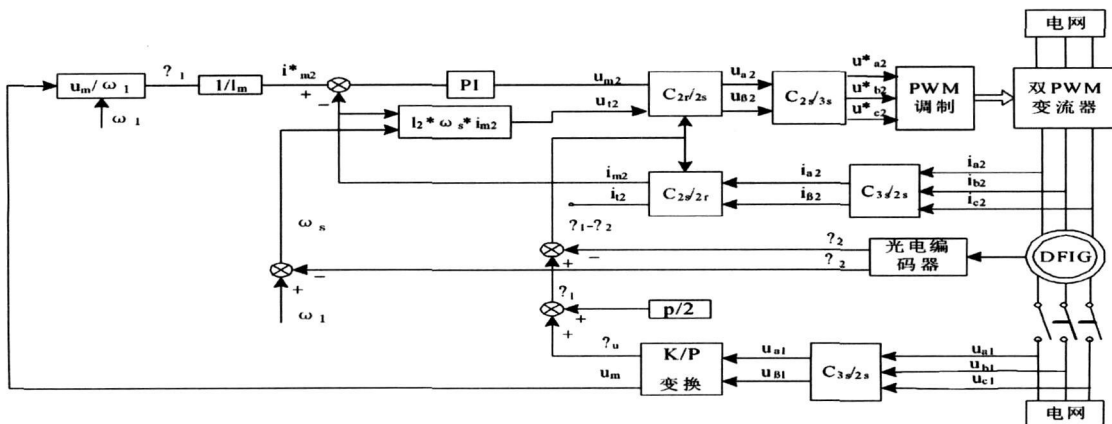


图 2 变速恒频双馈风力发电机并网控制策略框图

$$\begin{cases} u_{m2} = (\varepsilon + \lambda p) \dot{i}_{m2} \\ u_{p2} = \omega_s \lambda \dot{i}_{m2} \end{cases} \quad (10)$$

根据式 (6)~(10) 可得到变速恒频双馈风力发电机并网控制策略^[4], 图 2 为其原理图。

2 系统仿真分析

利用 Matlab 软件建立空载并网仿真模型, 以下对系统空载、并网过渡过程进行了仿真研究。

双馈异步发电机的仿真参数为: 定子绕组电阻 $R_1 = 1.9188 \Omega$; 转子绕组电阻 $R_2 = 2.5712 \Omega$; 定子自感 $L_1 = 0.24144 \text{ H}$; 转子自感 $L_2 = 0.24144 \text{ H}$; 定子转子互感 $L_m = 0.2340 \text{ H}$; 电网电压取 $u_{net} = 300 \text{ V}$; $n_p = 2$; 转动惯量 $J = 0.2 \text{ kgm}^2$ 。

并网前, 取电网电压幅值、频率、相位信息作为控制依据, 经过控制系统调节发电机的转子励磁电压, 控制发电机的输出定子电压, 满足并网条件后进行并网。并网成功后切换为发电控制模式。

仿真过程如下, 发电机在 1200 r/min 转速下空载稳态运行 1 s 后并网, 空载调节过程、并网过渡过程转子电流波形如图 3、4、5 所示。

由图 3 可见, \dot{i}_{m2} 很快跟踪到 \dot{i}_{m2}^* 上, \dot{i}_p 也很快稳定且几乎为零, 这与前文中式 (8) 相符, 说明达到了控制目的。由图 4 可见, 定子 a 相输出电压 u_{a1} 能迅速

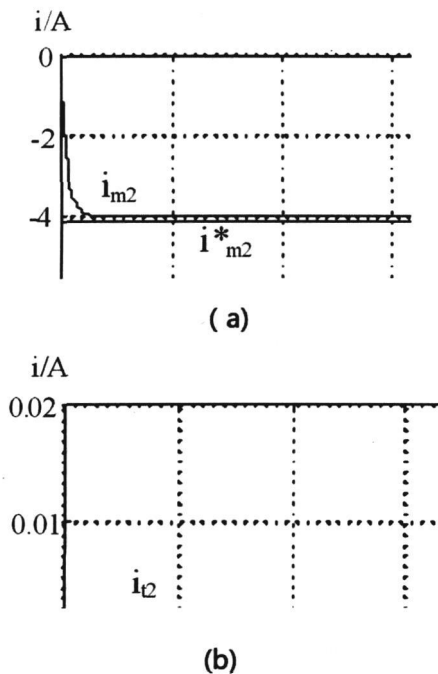
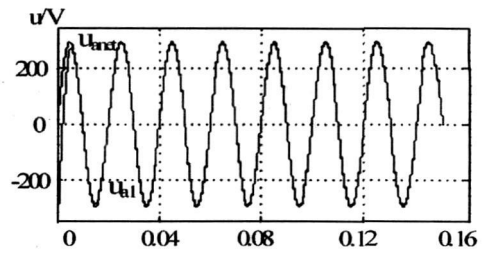
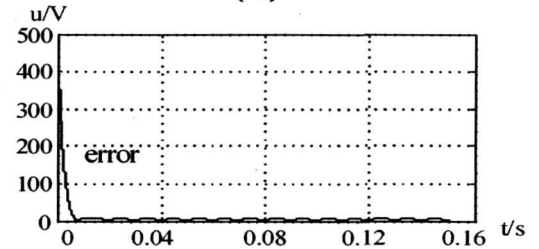


图 3 转子电流分量 \dot{i}_{m2} 、 \dot{i}_p 的波形



(a)



(b)

图 4 定子电压、定子电压与电网电压误差波形

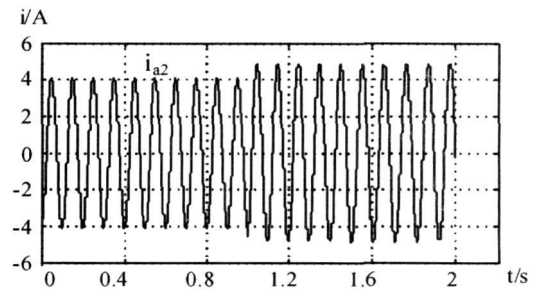


图 5 转子 a 相电流并网过渡过程波形

跟踪电网 a 相电压 u_{net} , 两者之间的误差在半个周波之内就达到 10 V 以下, 说明调节过程快、精度高。图 5 为转子 a 相电流并网过渡过程的波形, 可见在并网过渡过程中, 转子 a 相电流 i_{a2} 没有太大波动, 过渡比较平稳, 对电网不会造成太大影响, 完全满足并网要求。

3 结 论

建立了变速恒频双馈风力发电系统的空载仿真模型, 采用矢量控制技术, 进行了发电机空载仿真、并网过渡过程仿真研究。仿真结果表明, 空载调节过程速度快, 精度较高, 并网过程电流冲击较小, 此种并网策略是变速恒频双馈风力发电机一种较理想的并网方式。

参考文献

- [1] Pettersson A, Hamfors L, Thitinger T. Evaluation of

(下转第 37 页)

4 结 论

4.1 可靠性分析结论

(1)各种接线模式的可靠性随负荷密度的增大而提高,负荷密度最大时,相应的可靠性最高。这是因为负荷密度增大而保持变电站容量不变,意味着供电半径将缩小,变电站到负荷的出线长度将会减短。由于线路的平均故障率与线路长度成正比关系,所以配电系统的可靠性指标会相应地提高。

(2)对于完全由架空线组成的电网,可靠性由低到高的顺序依次是单辐射接线模式、手拉手接线模式、分段两联络接线模式和分段三联络接线模式。对于分段联络接线模式,由于出现故障时每条线路都能通过各自的联络线路恢复供电,这样使每条线路的故障范围缩小,即受影响的用户数比手拉手接线要有所减少,因此它的可靠性比手拉手接线模式略有提高。

(3)对于完全由电缆线组成的电网,可靠性由低到高的顺序依次是单辐射接线模式、手拉手接线模式、双Ⅱ接线(分段两联络接线)模式、“N-1”接线模式。在“N-1”接线中,N值越大,则线路发生多重故障时有负荷不能转出的概率越大,倒闸操作也越复杂,因此可靠性也会有所降低。对于电缆线路形成的电网,从可靠性分析角度来看,分段两联络接线模式和“N-1”接线模式最优。

4.2 经济性分析结论

(1)随着负荷密度的增大,各接线模式的总费用减小。这是因为负荷密度增大而保持变电站容量不

变,意味着供电半径将缩小,变电站到负荷的出线长度减短,线路投资也相应的减小,年总费用就会下降。

(2)对于由架空线组成的电网,当负荷密度较低时,采用单辐射接线模式最经济。当负荷密度逐渐增大时,由于总的年费用降低,各接线模式之间的年总费用差距越来越小,因而此时采用可靠性和导线利用率较高的分断联络接线模式会更好。

(3)对于电缆的“N-1”接线而言,“5-1”接线的经济性比其他几种要好一些,原因是它所需要的备用线路最少。在全部的电缆线路接线模式中,当负荷密度较低时,采用单辐射接线模式最经济;当负荷密度逐渐增大时,由于总的年费用降低,各接线模式之间的年总费用差距越来越小,因而此时采用可靠性和导线利用率较高的双Ⅱ接线和“N-1”接线模式会更好。

参考文献

- [1] DL/T 599-2005. 城市中低压配电网改造技术导则 [S]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- [2] 能源部, 建设部. 城市电力网规划技术导则 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1995.
- [3] 王晓文. 供用电系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [4] 王成山, 王赛一, 葛少云, 等. 中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 34-39.

(收稿日期: 2009-10-12)

(上接第 9 页)

Current Control Methods for Wind Turbines Using Doubly-fed Induction Machines [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(1): 227-235.

- [2] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125.
- [3] 卞松江, 吕晓美, 相会杰. 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.
- [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.

作者简介:

赵 宇 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为非线性控制在风力发电系统中的应用;

王 奔 (1960-), 男, 教授, 研究方向为电力系统非线性与变结构控制。

张喜海 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电系统控制技术;

李 慧 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制。

(收稿日期: 2010-01-10)