

# 变速恒频双馈风力发电负载并网控制

曾志勇, 王清灵, 冯婧

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 探讨双馈发电机并网过程运行原理, 研究了基于定子磁链定向矢量控制技术的发电机并网控制策略, 对比和分析空载并网和负载并网的控制原理, 负载并网方式并网前接有独立负载, 发电机可以参与风力机的能量控制, 降低了对风力机调速能力的要求和减小风对风力机的应力; 建立了负载并网控制的仿真模型, 仿真结果表明: 并网后冲击电流较小, 负载并网方式是一种较理想的变速恒频(VSCF)风力发电并网方式。

**关键词:** 变速恒频风力发电; 定子磁链定向控制; 负载并网

## Study on the load cutting-in control of the variable-speed constant-frequency(VSCF)wind-power generator

ZENG Zhi-yong, WANG Qing-ling, FENG Jing

(School of Electrical Engineering and Communication, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Running principle of the grid-connection process of doubly-fed generator is discussed. Grid-connection control strategy of generator is investigated based on stator-oriented vector control technique. The principles of the grid-connection with load and on no load are contrasted and analyzed. The generator of the load cutting-in control can control wind energy in cooperation with wind turbine, which can relieve the stress of wind turbine from wind and improve the speed adjustment ability of system. The simulation model of grid-connection process of doubly-fed generator is founded. The simulation result verifies the impact current is very small and the validity and feasibility of the grid-connection control strategy of doubly-fed generator.

**Key words:** VSCF; stator field-oriented control; load cutting-in control

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0033-05

## 0 引言

交流励磁变速恒频风力发电定子侧并网方式分为: 空载并网和负载并网。空载并网: 并网前发电机空载, 定子电流为零。以电网电压为给定量, 控制定子侧空载电压幅值、相位、频率与电网电压一致。负载并网: 并网前发电机定子侧接独立负载, 根据电网信息和定子电压、电流对发电机进行控制, 在满足并网条件时进行并网。负载并网方式的特点就是并网前发电机已有独立负载, 定子有电流, 发电机参与与风力机的能量控制。因此负载并网控制所需要的信息不但取自于电网, 同时还取自发电机定子侧。详细的仿真验证了负载并网的可靠性与可行性。

## 1 负载并网原理

### 1.1 概述

交流励磁风力发电并网条件是发电机输出的电压在幅值、频率以及相位上完全与电网电压相同。

为此需要在并网前对发电输出电压进行调节, 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(最大风能追踪)发电控制, 如图1(a)所示。图1(b)表示了变速恒频发电机负载并网控制系统结构, 并网前发电机带独立负载, 取电网电压(频率、相位、幅值)定子电压电流(频率、相位、幅值)作为控制信息提供给控制系统, 据此调节发电机励磁, 根据并网条件进行并网, 切换控制系统。

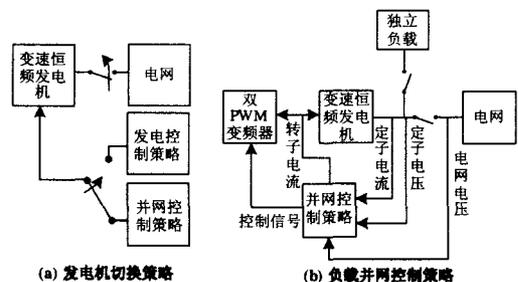


图1 变速恒频发电机负载并网控制

Fig.1 Control of VSCF generator cut-in with load

为实现交流励磁发电机并网前的定子端电压准确调节, 必须将矢量定向控制技术应用于发电机并网控制。为此, 首先要建立磁场定向 M-T 旋转坐标系下发电机的数学模型。

### 1.2 基于定子磁链定向控制的发电机数学模型

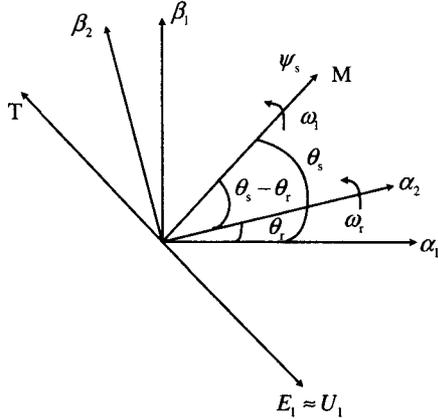


图 2 坐标变换图

Fig.2 Relation of coordinates

如图 2 所示: M-T 为以同步转速旋转的两相旋转坐标系, 令 M 轴与定子磁链重合。 $\alpha_1 - \beta_1$  为两相静止坐标系,  $\alpha_1$  轴取为定子 A 相绕组轴线正方向;  $\alpha_2 - \beta_2$  为以转子速旋转的两相旋转坐标系,  $\alpha_2$  取转子绕组 a 相绕组轴线正方向;  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  的夹角为  $\theta_r$ , M 与  $\alpha_1$  的夹角为  $\theta_s$ 。

在工频下可忽略定子电阻, 则发电机端电压  $U_1$  滞后于定子磁链  $\psi_1$   $90^\circ$ 。即位于 T 轴负方向上。此时,  $\psi_{m1} = \psi_1$ ,  $\psi_{t1} = 0$ ,  $u_{t1} = -U_1$ ,  $u_{m1} = 0$ 。将  $R_1 = 0$ ,  $u_{m1} = 0$ ,  $\psi_{m1} = \psi_1$ ,  $\psi_{t1} = 0$

采用发电机惯例, 在定子磁链定向控制下发电机数学模型如下式:

$$\begin{cases} \psi_1 = \frac{U_1}{\omega_1} \\ p\psi_1 = 0 \\ u_{m2} = R_2 i_{m2} + p\psi_{m2} - \omega_s \psi_{t2} \\ u_{t2} = R_2 i_{t2} + p\psi_{t2} + \omega_s \psi_{m2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_{m2} = \frac{1}{L_m} (L_1 i_{m1} - \psi_1) \\ i_{t2} = \frac{L_1}{L_m} i_{t1} \\ \psi_{m2} = L_2 i_{m2} - L_m i_{m1} \\ \psi_{t2} = L_2 i_{t2} - L_m i_{t1} \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e = 1.5 p_n L_m (i_{m1} i_{t2} - i_{t1} i_{m2}) \quad (3)$$

式中:  $R_1$ 、 $R_2$  为定、转子绕组各相电阻;  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_m$  为 M-T 坐标系中定、转子等效自感及互感。 $u_{m1}$ 、 $u_{t1}$ 、 $u_{m2}$ 、 $u_{t2}$  为定、转子电压在 M 轴和 T 轴上的分量;  $i_{m1}$ 、 $i_{t1}$ 、 $i_{m2}$ 、 $i_{t2}$  为定、转子电流在 M 轴和 T 轴上的分量;  $\psi_{m1}$ 、 $\psi_{t1}$ 、 $\psi_{m2}$ 、 $\psi_{t2}$  为定、转子磁链在 M 轴 T 轴上的分量;  $\omega_1$ 、 $\omega_s$  为同步转速和转差速,  $p_n$  为发电极对数。

### 1.3 磁场定向下发电机负载并网控制策略

如前分析, 负载并网控制的主要目的是使电机定子端电压与电网电压在幅值、相位、频率上一致。为此, 将定子端电压、电网电压分别换算到图 3 的旋转坐标系 M-T 中的  $U_1$  和  $U_s$ , 而后再两者进行比较。若在旋转坐标系中两者幅值相同, 那么定子端电压与电网电压在幅值、相位、频率上也就相同。

与空载并网不同, 负载并网由于并网前发电机已带有独立负载, 定子存在电流, 为此需定义定子等效励磁电流  $i_{ms}$ , 它满足以下关系:

$$\psi_1 = L_m i_{ms} \quad (4)$$

$$i_{ms} = \frac{L_1}{L_m} i_{m1} - i_{m2} \quad (5)$$

由式(4)可知:  $i_{ms}$  与  $\psi_1$  成正比。由于同步速恒定, 发电机电压  $U_1$  和定子磁链  $\psi_1$  成线性关系, 所以调节  $i_{ms}$  可以调节  $U_1$ 。由式(5)可知通过调节  $i_{m2}$  可最终调节发电机定子端电压  $U_1$ 。

由前分析可知: 为使发电机定子端电压与电网电压在幅值、频率、相位一致, 特将定子、电网电压换算至定子磁链定向的 M-T 坐标系中进行比较。为此, 定子磁链的准确观测成为并网控制成功与否的关键。传统的定子磁链观测模型过于依赖系统参数, 准确性不高, 无法与电网同步的缺点。为此需要建立一个基于电网信息的发电机磁链观测器, 使之能根据电网信息计算出发电机定子磁链的幅值  $\psi_1$  和相角  $\theta_s$ 。由图 2 可知, 当忽略定子电阻时, 电网电压矢量与定子磁链角度相差  $90^\circ$ 。定子磁链矢量  $\psi_1$  相位角为  $\theta_s = \theta_u + 90^\circ$ ,  $\theta_u$  为检测到的电网电压矢量角。由于  $\psi_1$  的幅值可以按式(1)算出, 这样定子磁链的幅值和相位均可通过计算得出。

简言之: 变速恒频风力发电负载并网的实质是根据电网信息和定子电压、电流来调节发电机的励磁, 使发电机输出符合并网要求的电压。

综合前面分析, 建立了负载并网控制的原理框图如图 3, 系统采用电压闭环控制, 外环为电压环, 内环为电流环。保证了负载变化时, 定子端电压迅

速与电网电压吻合。

框图中电压补偿项, 已有较多文献进行了详细的讨论, 限于篇幅在此不再赘述。

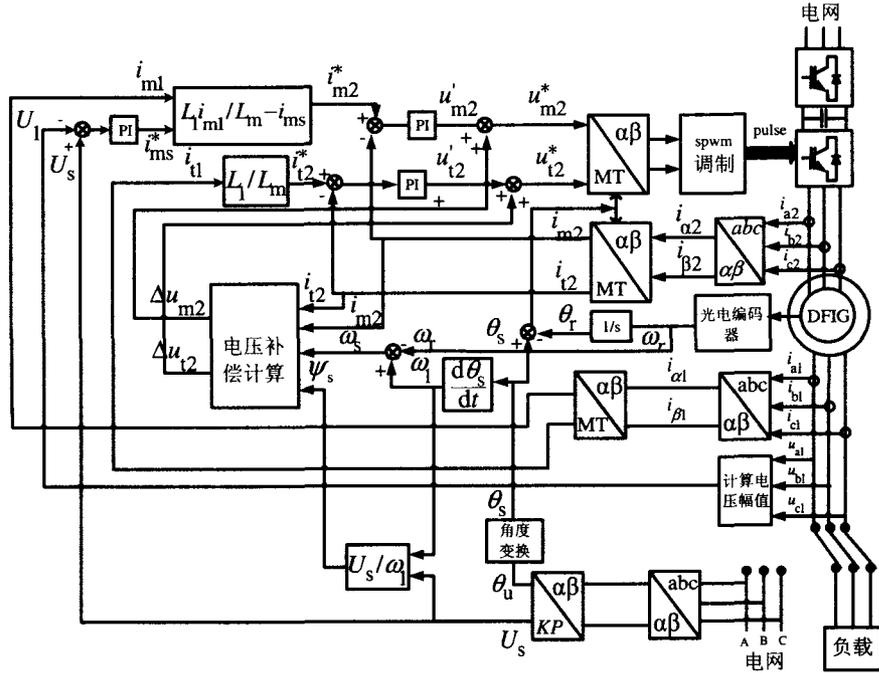


图 3 交流励磁变速恒频双馈风力发电机负载并网控制框图

Fig.3 Block diagram of the cutting-in control scheme for the VSCF generator with load

### 1.4 并网前功率与速度调节

由贝茨理论可知: 风力机输出的机械能

$$P_v = 0.5 \rho S_w v^3 C_p \quad (6)$$

其中:  $\rho$  为空气密度;  $v$  为风速;  $S_w$  为风力机掠过的面积;  $C_p$  为风力机风能利用系数, 在定桨距下它直接与风力机角速度  $\omega_w$  相关,  $\omega_w$  的改变引起  $C_p$  的改变, 影响风力机输出的机械能。

若为空载并网, 并网发电机定子开路, 定子电流为 0。为此电磁转矩亦为  $T_e = 0$ , 而风力机输出的转矩不为 0。因此, 需依靠风力机来控制机组转速, 增加了风对风力机的应力。同时易造成发电机能量失衡引起发电机转速失控。

负载并网的特点是并网前发电机带有独立负载, 若发电机带三相星形连接的电阻性负载, 相电阻为  $R_{load}$ 。因此稳态时  $i_{m1} = 0$ ,

$$i_{t1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{u_a}{R_{load}}, \quad T_e = -1.5 \sqrt{\frac{2}{3}} p_n L_m \frac{u_a}{R_{load}} i_{m2}$$

式中:  $u_a$  为电网 a 相相电压。因采用电压闭环控制,

定子端电压与电网电压能迅速吻合, 稳态时  $i_{m2}$  的值基本恒定。因此  $T_e$  与  $i_{t1}$  近似线性关系。

为此, 当调整  $R_{load}$  的大小可调整  $i_{t1}$ , 进而改变  $T_e$  的大小。由运动方程

$$T_1 - T_e = \frac{J_g}{P_n} \frac{d\omega_m}{dt} \quad (7)$$

改变  $T_e$  调节了发电机转速  $\omega_m$ 。发电机转速与  $R_{load}$  呈正比关系。在发电系统中, 风力机与发电机通过一增速比为  $N$  齿轮箱连接。为此, 调节了发电机的转速也间接调节  $\omega_w$ 。因此, 与空载并网不同, 负载并网可通调整  $R_{load}$  改变机组转速而非通过风力机自身调节, 降低了对风力机调速能力的要求和减小风对风力机的应力。

当稳态时发电机输出的能量  $P_1$  为:

$$P_1 = 3 \frac{u_a^2}{R_{load}} \quad (8)$$

则发电机从风力机吸收的能量:

$$P_0 = (1-s) \left( 3 \frac{u_a^2}{R_{load}} + P_{cul} + P_{fel} \right) \quad (9)$$

式中： $P_{cul}$ ， $P_{fel}$ 为定子铜耗、铁耗， $s$ 为转差率。

在发电机系统中，风力机输出的机械能与发电机吸收的机械能相等，因此有：

$$0.5 \rho S_w v^3 C_p = (1-s) \left( 3 \frac{u_a^2}{R_{load}} + P_{cul} + P_{fel} \right)$$

由上分析可知：调节 $R_{load}$ 的大小可调节风力机转速 $\omega_m$ ，调节了 $C_p$ 。在相同风速下，不同的 $C_p$ 风力机输出的机械能也不同。同时，由于发电机转速的变化，引起转差率 $s$ 改变，调节了能量在发电机内部的分配。有力地防止了空载并网时发电机能量失衡引起的速度失控。

以上分析建立在电机端电压与电网电压吻合的基础之上。由于并网控制系统采用的电压闭环控制，定子电压在负载改变后能迅速回到期望值。

## 2 系统仿真

发电机的并网是一个瞬变过程，受制于并网前发电机的运行状况、影响并网后发电机的运行行为。并网前、后发电机的运行状态和运行控制均不相同：并网前负载运行，实施负载并网控制；并网后发电运行，实施最大风能追踪控制。因此，系统由两套控制子系统组成，一个为负载并网控制策略组成的并网控制子系统，另一个为发电机最大风能追踪控制子系统。两个子系统切换由并网信号控制。控制系统的切换策略直接影响到并网瞬间转子控制电压的平稳过渡，进一步影响到定子冲击电流的大小。并网前后 $i_{m2}$ 、 $i_{t2}$ 内回路控制结构相同，可以统一。外回路设定不同，需要进行切换。如图4所示，1为并网前，2为并网后。

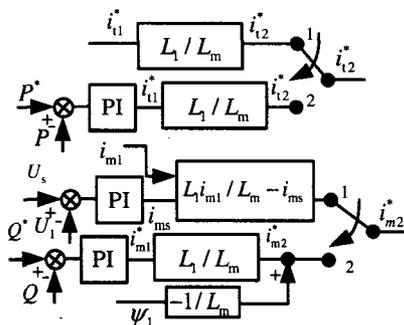


图4 切换策略

Fig.4 Cut-in strategy

仿真参数：风力机参数：桨叶半径 $R=2.4$  m，额定功率 11 kW，最佳风能利用系数 $C_{pmax}$ 和最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}$ 分别为 0.468 和 9。空气密度 $\rho=1.25$  kg/m<sup>3</sup>，风力机与发电机的增速比 $N=7.846$ 。

双馈电机：极对数：2 对；额定功率 10 kW，额定电压：220 V，额定频率：50 Hz；定子电阻 $R_s$ 和漏感 $L_{s\sigma}$ 分别为：0.039 83  $\Omega$ ，0.002 58 H；转子电阻 $R_r$ 和漏电感 $L_{r\sigma}$ 分别为 0.031 38  $\Omega$ ，0.002 61 H；互感 $L_m=0.046$  18 H；转动惯量 $J=0.18$  kg·m<sup>2</sup>

### 2.1 并网前系统仿真

为验证负载并网时发电机可以参与风力机的能量控制，降低了对风力机调速能力的要求和减小风对风力机的应力。特将仿真过程设置为： $t=0$  s，独立负载为 $R=20$   $\Omega$ ，在 $t=0.5$  s时，负载跳变为 $R=35$   $\Omega$ 。观察风力机输出机械能量和发电机转速度的变化。

由图5、6可以看出，当在同一风速（6 m/s），负载改变时，发电机的转速上升、风力机输出的机械能减小。因此，通过调整负载大小进而调节风力机输出能量与发电机转速是可行的。同时由于速度的改变，改变了能量在电机内部的分配，转差功率减小。由于发电机运行于次同步，所以定子侧输出的电能大于风力机输出的机械能。

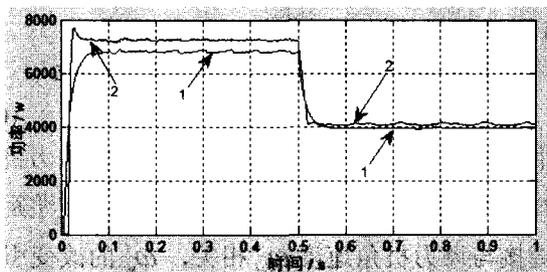


图5 并网前功率曲线图（1为风力机输出机械能，2为发电机定子输出功率）

Fig.5 Power diagram before cutting-in

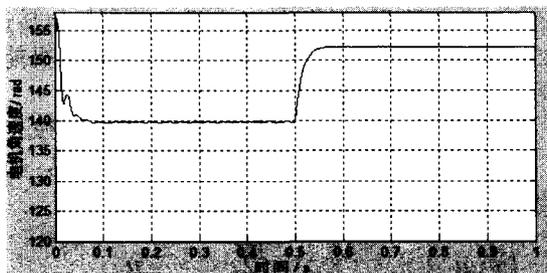


图6 发电机转速图

Fig.6 Rotational speed of DFIG

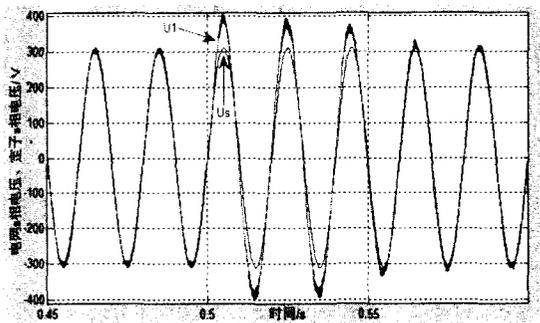


图 7 并网前定子电压与电网电压

Fig.7 Stator voltage and grid voltage before cutting-in

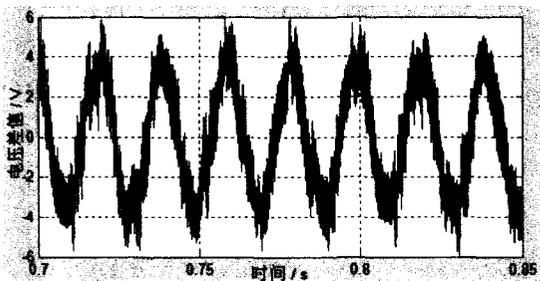


图 8 定子电压与电网电压差值

Fig.8 Error in stator voltage and grid voltage

由图 7 可知, 由于采用电压闭环控制, 电网电压与定子电压较好的吻合, 当调整负载时, 定子电压经动态变化后迅速与电网电压吻合, 吻合时间较短仅为 1.5 个工频周期。图 8 可看出稳态时, 电压差值较小, 满足并网条件。

因此, 采用负载并网控制时, 适当调整负载可以调节发电机转速, 控制风力机输出的机械能, 有效防止空载并网时因能量失衡而引起的转速失控, 也为并网时候选择一个最佳并网转速提供了实现的条件。

## 2.2 并网仿真

并网前发电机带负载  $R=35 \Omega$ , 在  $t=1.1 \text{ s}$  时进行并网切换。切换后控制系统变成最大风能追踪控制子系统。仿真结果如图 9。

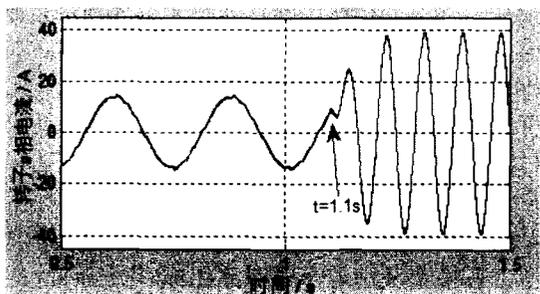


图 9 并网瞬间转子电流

Fig.9 Rotor current at the cutting-in moment with load

图 9 为并网瞬间转子电流图, 可以看出转子电流缓慢增加且相位发生改变。由于并网后采用最大风能追踪控制, 由图可知发电机输出功率增加。

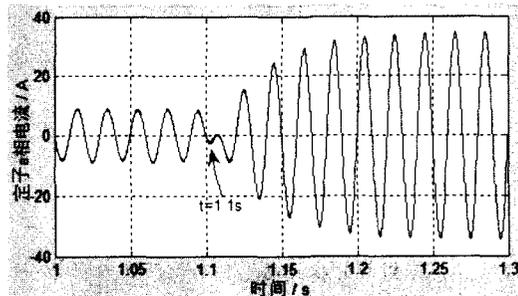


图 10 并网瞬间定子电流

Fig.10 Stator current at the cutting-in moment with load

图 10 为并网瞬间定子电流图, 可以看出定子电流缓慢增加, 冲击电流较小。因并网后采用最大风能追踪控制, 定子电流增大。

因此负载并网时, 定子电压能迅速与电网电压吻合, 且抗扰动性较好。在并网过程对电网的冲击电流较小。

## 3 结论

讨论了双馈电机风力发电负载并网控制策略, 借鉴了定子磁链定向矢量控制技术的思想, 可迅速地控制发电机定子端电压满足并网条件, 并网过程平稳、电流冲击较小。更为重要的是, 由于并网前发电机带独立负载, 发电机参与风力机能量控制, 可与风力机配合控制发电机的转速, 防止并网前由于能量失衡而引起转速失控。同时由于减小风对风力机的应力, 因此减小了风力机的机械损耗。

## 参考文献

- [1] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [2] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 汤蕴缪, 张奔黄, 范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

收稿日期: 2008-09-12; 修回日期: 2008-11-07

作者简介:

曾志勇(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为变速恒频风力发电并网控制技术; E-mail: austzeng@163.com

王清灵(1948-), 男, 教授 研究领域为双馈电机及其控制;

冯婧(1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电网无功补偿。