

交流励磁变速恒频风力发电机的 运行控制及建模仿真

刘其辉¹, 贺益康², 张建华¹

(1. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Operation Control and Modeling-Simulation of AC-excited Variable-speed Constant-frequency(AEVSCF) Wind Power Generator

LIU Qi-hui¹, HE Yi-kang², ZHANG Jian-hua¹

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: The function principle of AC-excited VSCF wind power generation system is discussed and the control task and run characteristic of doubly-fed asynchronous wind generator before and after grid-connection are analyzed in this paper. Grid-connection control and maximal wind power tracing control of generator are investigated based on stator field-oriented vector control technique. By modeling generator respectively and time-sharing simulation, the AC-excited VSCF wind power generation simulation system is founded, which includes two modules named grid-connection module and wind power tracing module. These modules in which generator model and control strategy are different can simulate the whole progress before and after grid-connection based on time-sharing and data-transferring method. Fully simulation verified the correctness and validity of the modeling and control of AC-excited VSCF wind power generator discussed in this paper.

KEY WORDS: AC-excited; Variable-speed constant-frequency (VSCF); Stator field-orient; Vector control; Modeling and simulation

摘要: 探讨了交流励磁变速恒频风力发电系统的运行原理, 分析了并网前、后双馈异步风力发电机的运行特点和控制目标, 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和最大风能追踪控制。采用分开建模、分时仿真的思路,

建立了包括并网控制和风能追踪两大模块的交流励磁变速恒频风力发电仿真系统。两个模块包括不同的发电机模型和控制策略, 通过分时工作和数据转移的方式完成并网前、后整个过程的系统仿真。完整的仿真研究验证了交流励磁变速恒频风力发电机建模及控制的正确性与有效性。

关键词: 交流励磁; 变速恒频; 定子磁链定向; 矢量控制; 建模仿真

1 引言

交流励磁变速恒频(AC-Excited Variable-Speed Constant-Frequency, AEVSCF)发电技术是一种全新、高效的发电方式, 具有显著的优越性^[1-6]: 不但可以大大提高能量转换效率, 降低原动机承受的机械应力, 而且还能实现有功、无功功率的解耦控制, 提高电力系统的调节能力及稳定性^[4]。AEVSCF发电技术适用于风力、水力等绿色能源开发领域, 尤其在风力发电方面得到了广泛的应用^[2,7]。

AEVSCF风力发电系统如图1所示。双馈异步发电机定子并网发电, 转子接电力变换器^[7-10]。交流励磁是指通过变换器可改变转子励磁电流的频率、幅值和相位。发电机的运行可分为并网前和并网后两大区域。并网前为并网控制区, 其目的是调节发电机输出满足并网条件, 为发电机并网做准备; 并网后又分为三大运行区: 最大风能追踪区、转速恒定区和功率恒定区^[11], 其中最大风能追踪区

基金项目: 国家863高技术基金项目(2001AA512023)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program(2001AA512023).

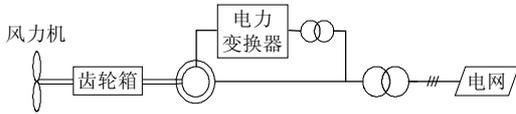


图1 交流励磁变速恒频风力发电系统
Fig.1 AEVSCF wind power generation system

是主要运行区域，目的是追踪最大风能^[4]，提高机组运行效率。

AEVSCF 风力发电系统规模庞大，运行控制复杂，而发电机及其控制又是其中的核心部分，决定着整个系统的性能。从系统的角度对发电机的建模和控制进行理论上的探讨，研究不同运行区域，尤其是并网控制区和最大风能追踪区发电机的运行特点和控制方法具有重要的意义。有关文献虽然不少，但大多数就发电机某一区域内的运行与控制展开讨论，能将发电机在各主要运行区内的运行控制综合分析的文献比较少。文献[1]分析了交流励磁双馈异步发电机的并网控制，给出了性能优越、不依赖于机组转速的并网控制方法，但对并网后发电机的控制没有深入分析。文献[2]运用矢量控制技术讨论了并网后双馈异步发电机的有功、无功功率解耦控制，但对发电机的并网过程和旨在提高运行效率的最大风能追踪没有加以研究。文献[3-4]讨论了并网后双馈异步发电机的功率解耦控制和最大风能追踪控制，但同样忽略了对并网过程的讨论。文献[12]详细地介绍了 AEVSCF 风力发电系统中各部件的建模方法，对变频器及风力机的控制进行了深入的仿真研究，但没有探讨发电机空载时的建模过程和并网控制技术，也没有涉及对最大风能追踪控制的讨论。

本文首先分析了 AEVSCF 风力发电系统的运行机理，对并网区和最大风能追踪区的发电机运行特点和控制方法进行了探讨。应用磁场定向矢量控制技术，分别建立了发电机并网控制策略和最大风能追踪控制策略。采用分开建模、分时仿真的思路解决了并网前、后发电机难以统一建模的问题，构建了由并网控制和风能追踪两大模块组成的 AEVSCF 风力发电仿真系统，对 AEVSCF 风力发电机的并网控制和最大风能追踪控制进行了研究和验证。

2 双馈异步发电机的运行控制

2.1 综述

AEVSCF 风力发电机在并网前实施并网控制，并网后实施最大风能追踪控制，在并网瞬间切换控制策略。为了获得较高的控制性能，将应用磁场定

向矢量控制技术对发电机的运行控制加以研究。控制策略的切换和矢量控制坐标变换关系如图2所示。

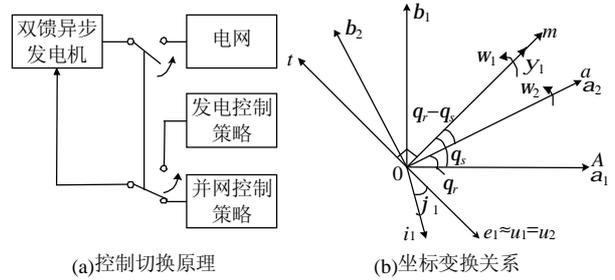


图2 控制切换原理和坐标变换关系
Fig.2 Control switch principle and coordinates transformation relation

mt 为以同步速 w_1 旋转的两相坐标系， m 轴定于发电机定子磁链矢量 y_1 的方向。 a_1b_1 为定子两相静止坐标系， a_2b_2 为转子两相坐标系， a_1 轴、 a_2 轴分别取定、转子 A 相绕组轴线正方向。 a_2b_2 坐标系相对于转子静止，相对于定子以转子角速度 w_r 逆时针旋转。 a_2 轴与 a_1 轴的夹角为 q_r ， m 轴与 a_1 轴夹角为 q_s 。

2.2 并网控制

发电机并网条件为：定子电压和电网电压的幅值、频率以及相位相同。发电机并网控制就是在并网之前调节定子电压，满足并网条件后进行并网操作^[1]。发电机并网前定子空载，并网控制的实质就是依据电网电压（频率、相位和幅值）信息，通过变换器调节转子的励磁电流，调节发电机定子电压符合并网条件。

mt 坐标系下发电机的电压、磁链和转矩运动方程分别为^[3-4,13]

$$\begin{cases} u_{m1} = -R_1 i_{m1} - D y_{m1} + y_{t1} w_1 \\ u_{t1} = -R_1 i_{t1} - D y_{t1} - y_{m1} w_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{m2} = R_2 i_{m2} + D y_{m2} - y_{t2} w_s \\ u_{t2} = R_2 i_{t2} + D y_{t2} + y_{m2} w_s \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} y_{m1} = L_1 i_{m1} - L_m i_{m2} \\ y_{t1} = L_1 i_{t1} - L_m i_{t2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} y_{m2} = L_2 i_{m2} - L_m i_{m1} \\ y_{t2} = L_2 i_{t2} - L_m i_{t1} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} T_L - T_e = \frac{J}{p_n} \frac{dw_r}{dt} \\ w_r = \frac{dq}{dt} \\ T_e = p_n L_m (i_{m1} i_{t2} - i_{t1} i_{m2}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 R_1 、 R_2 为定、转子绕组电阻（1、2 分别代表

定、转子); L_1 、 L_2 、 L_m 分别为 mt 坐标系定、转子等效自感及等效互感; u_{m1} 、 u_{t1} 、 u_{m2} 、 u_{t2} 分别为定、转子电压 m 、 t 轴分量; i_{m1} 、 i_{t1} 、 i_{m2} 、 i_{t2} 分别为定、转子电流 m 、 t 轴分量; y_{m1} 、 y_{t1} 、 y_{m2} 、 y_{t2} 分别为定、转子磁链 m 、 t 分量; w_1 、 w_r 、 w_s 分别为发电机的同步速、角速度和转差角速度 ($w_s = w_1 - w_r$); J 、 p_n 分别为发电机的转动惯量和极对数; D 为微分算子。

工频下, R_1 可忽略不计, 则发电机定子电压矢量 u_1 比 y_1 滞后 90° , 即位于 t 轴负方向上。设 u 、 y_1 分别为 u_1 、 y_1 的幅值, 则 $y_{m1} = y_1$, $y_{t1} = 0$, $u_{t1} = -u_1$, $u_{m1} = 0$, 空载情况下 $i_{m1} = i_{t1} = 0$, 式(1)可化为

$$\begin{cases} Dy_1 = 0 \\ u_1 = w_1 y_1 \end{cases} \quad (6)$$

式(3)、(4)可化为

$$\begin{cases} y_1 = -L_m i_{m2} \\ i_{t2} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} y_{m2} = L_2 i_{m2} \\ y_{t2} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(2)得

$$\begin{cases} u_{m2} = (R_2 + L_2 D) i_{m2} \\ u_{t2} = w_s L_2 i_{m2} \end{cases} \quad (9)$$

根据式(6)~(9)可得出变速恒频风力发电机并网控制策略, 如图 3 所示。

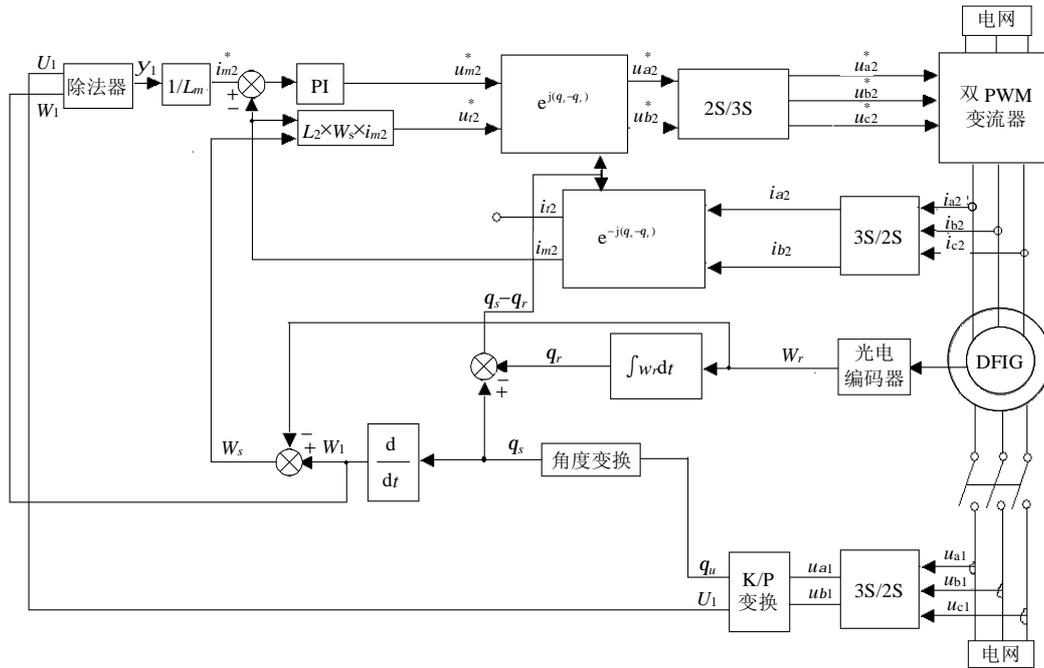


图 3 交流励磁变速恒频风力发电机并网控制

Fig. 3 Grid-connection control of the AEVSCF wind power generator

并网控制要依据于电网, 为此必须建立一个基于电网信息的发电机磁链观测器, 以计算 y_1 的幅值 y_1 和相角 q_s 。由前面分析可知, y_1 较 u_1 超前 90° , 设 u_1 的相角为 q_u , 则 y_1 的相角为

$$q_s = q_u + 90^\circ \quad (10)$$

y_1 可根据式(6)求出, 由此可设计出定子磁链观测器如图 4 所示。

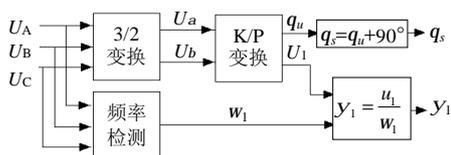


图 4 定子磁链观测器

Fig. 4 Stator flux linkage estimator

2.3 最大风能追踪控制

发电机的最大风能追踪控制方式有多种^[4,14]: 有免测风速的功率控制模式, 也有检测风速的转速控制模式; 有矢量控制方式, 也有标量控制方式。本文采用磁场定向矢量控制技术实现发电机的功率解耦控制, 在此基础上完成无需检测风速的最大风能追踪控制, 这种方案特点是动态响应快, 鲁棒性较好, 实用价值较高。

依然采取定子磁链定向, 即 $y_{m1} = y_1$, $y_{t1} = 0$, $u_{t1} = -u_1$, $u_{m1} = 0$, 代入式(1)~(4)有

$$\begin{cases} y_1 = u_1 / w_1 \\ Dy_1 = 0 \\ u_{m2} = R_2 i_{m2} + Dy_{m2} - w_s y_{t2} \\ u_{t2} = R_2 i_{t2} + Dy_{t2} + w_s y_{m2} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i_{m2} = \frac{1}{L_m}(L_1 i_{m1} - y_1) \\ i_{t2} = \frac{L_1}{L_m} i_{t1} \\ y_{m2} = -L_m i_{m1} + L_2 i_{m2} \\ y_{t2} = -L_m i_{t1} + L_2 i_{t2} \end{cases} \quad (12)$$

根据 $u_{t1} = -u_1$, $u_{m1} = 0$, 定子输出功率为^[13]

$$\begin{cases} P = -u_1 i_{t1} \\ Q = -u_1 i_{m1} \end{cases} \quad (13)$$

可以看出,有功功率 P 、无功功率 Q 分别与定子电流在 m 、 t 轴上的分量成正比,调节转矩电流分量 i_{t1} 和励磁电流分量 i_{m1} 可分别独立地调节 P 和

Q , 实现功率解耦控制。

由发电机的电压和磁链方程可以导出

$$\begin{cases} u_{m2} = u'_{m2} + \Delta u_{m2} \\ u_{t2} = u'_{t2} + \Delta u_{t2} \end{cases} \quad (14)$$

其中, u'_{m2} 、 u'_{t2} 为解耦项; Δu_{m2} 、 Δu_{t2} 为补偿项。

$$\begin{cases} u'_{m2} = (R_2 + bD)i_{m2} \\ u'_{t2} = (R_2 + bD)i_{t2} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \Delta u_{m2} = -b\omega_s i_{t2} \\ \Delta u_{t2} = a\omega_s y_1 + b\omega_s i_{m2} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $a = -L_m/L_1$; $b = L_2 - L_m^2/L_1$ 。

按式(11)~(16)可设计出 AEVSCF 风力发电系统最大风能追踪控制策略,如图5所示。

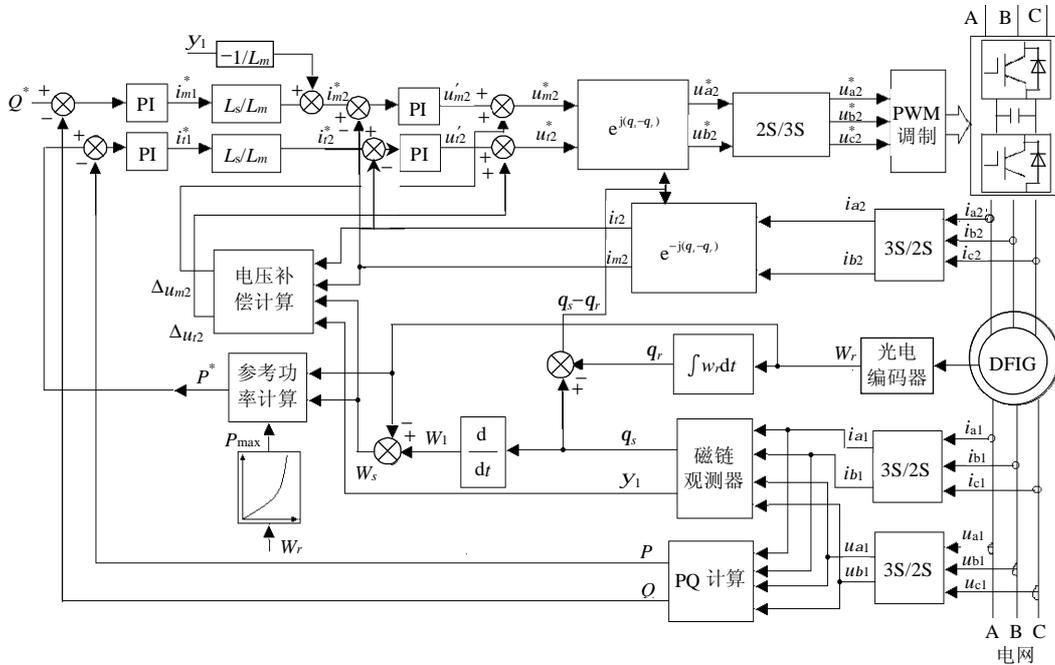


图5 交流励磁变速恒频风力发电机最大风能追踪控制

Fig. 5 The maximal wind power tracing control of the AEVSCF wind power generator

控制 P 的目的是实现最大风能追踪,因此图5中的发电机有功功率指令 P^* 需要从风能追踪的角度求取。图6为不同风速下定桨距风力机的功率特性,其中 P_{opt} 曲线为最佳功率曲线,运行在这条曲线上,风力机就能捕获到最大风能^[4]。

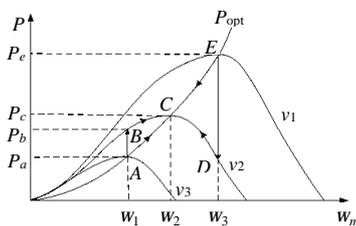


图6 风力机的功率特性

Fig. 6 The power characteristics of a wind turbine

如果令发电机输入机械功率为风力机的最佳功率 P_{opt} , 则受负载(发电机)的制约,风力机会稳定运行于最佳功率曲线上,实现最大风能追踪。其原理可参照图6解释,图中 v_i ($i=1,2,3$) 为3种不同的风速且 $v_1 > v_2 > v_3$ 。假设在风速 v_3 下机组稳定运行于 P_{opt} 曲线上的A点,此时风力机的输出功率和发电机的输入机械功率相平衡,风力机的稳定转速为 ω_1 。如果某时刻风速升至 v_2 , 风力机跳至B点运行,其输出功率由 P_a 突增至 P_b 。由于惯性作用,发电机仍暂时运行在A点,风力机提供的功率大于发电机的输入功率,从而导致机组转速上升。在转速上升的过程中,风力机和发电机分别沿着B

→C 曲线和 A→C 曲线增速。当到达 C 点时，功率再一次平衡，转速稳定为 w_2 (对应 v_2 的最佳转速)。同理也可分析从风速 v_1 到 v_2 的逆调节过程。

根据风能追踪的原理和双馈异步发电机的功率关系可导出 P^* 的计算公式

$$\begin{cases} P^* = \frac{P_{opt}}{1-s} - \Delta P \\ \Delta P = P_{Cu1} + P_{Fe1} + \frac{P'_m}{1-s} \end{cases} \quad (17)$$

式中 P_{Cu1} 、 P_{Fe1} 分别为发电机定子铜耗、铁耗； s 为发电机转差率； P_{opt} 、 P'_m 分别为风力机最佳功率、发电机机械损耗。

3 双馈异步发电机的建模与运行仿真

3.1 仿真模型的建立

并网前、后发电机的运行特性和控制方法均不相同，要进行并网区和风能追踪区的完整仿真研究需要合适的双馈异步发电机模型。Matlab/ Simulink 提供的电机模型不能空载运行^[15-16]，必须在探讨双馈异步发电机空载运行和发电运行不同机理的基础上，自行建立满足要求的模型。

发电机空载时定子电压为输出量；发电时定子电压受电网电压的箝制，为输入量。由于工作机理不同，建立统一的发电机模型比较困难^[17-19]。本文采用分开建模、分时工作的方案，其思路是：建立空载和发电两个模型，仿真时空载模型首先运行，进行并网控制的仿真，此时发电模型未被激活；并网时空载仿真停止工作，并将最后的运行数据转移到发电模型中并激活发电模型，后者工作后进行最大风能追踪的仿真。

发电机在空载时， $i_{m1} = i_{t1} = 0$ ，式(1)~(4)化为

$$\begin{cases} u_{m1} = L_m D i_{m2} - w_1 L_m i_{t2} \\ u_{t1} = w_1 L_m i_{m2} + L_m D i_{t2} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} u_{m2} = (R_2 + L_2 D) i_{m2} - w_s L_2 i_{t2} \\ u_{t2} = w_s L_2 i_{m2} + (R_2 + L_2 D) i_{t2} \end{cases} \quad (19)$$

设输入向量 $u = [u_{m2}, u_{t2}]^T$ ，输出向量 $y = [u_{m1}, u_{t1}]^T$ ，状态向量 $x = [i_{m2}, i_{t2}]^T$ ，将式(18)、(19)改写为状态方程的形式

$$dx = Ax + Bu \quad (20)$$

其中， $A = \begin{bmatrix} L_2 & 0 \\ 0 & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -R_2 & w_s L_2 \\ -w_s L_2 & -R_2 \end{bmatrix}$ ； $B = \begin{bmatrix} L_2 & 0 \\ 0 & L_2 \end{bmatrix}^{-1}$ 。

用扩展矩阵将式(20)转换为齐次状态方程

$$d\bar{x} = \bar{A}\bar{x} \quad (21)$$

其中，扩展状态向量 $\bar{x} = [i_{m2}, i_{t2}, u_{m2}, u_{t2}]^T$ ；扩展矩

阵 $\bar{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。式(21)的解为

$$\bar{x}(t) = e^{\bar{A}\bar{x}(t_0)}$$

离散化为

$$\bar{x}(k+1) = e^{\bar{A}}\bar{x}(k) \quad (22)$$

根据式(22)和式(18)，在 Simulink 中编写 S 函数，可建立双馈异步发电机的空载模型 (图 7)。其中转移状态向量 $\bar{x} = [u_{m2}, u_{t2}, i_{m1}, i_{t1}, i_{m2}, i_{t2}, w_1, w_s]^T$ 在空载模型中引出，它包含并网时刻需转移到发电模型的各个参数。

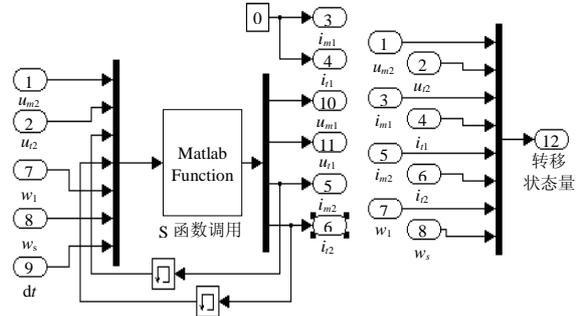


图 7 交流励磁变速恒频风力发电机空载仿真模型
Fig. 7 Simulation model of the AEVSCF wind power generator with no load

发电运行时，输入向量 $u = [u_{m1}, u_{t1}, u_{m2}, u_{t2}, T_L]^T$ ，状态向量 $x = [i_{m1}, i_{t1}, i_{m2}, i_{t2}]^T$ ，输出向量 $y = [T_e, w_r]^T$ ，为了便于发电机状态方程的线性处理，将 T_L 分离出来单独处理，则 $u = [u_{m1}, u_{t1}, u_{m2}, u_{t2}]^T$ ，将式(1)~(4)改写为状态方程的形式

$$dx = Cx + Du \quad (23)$$

其中，

$$C = \begin{bmatrix} -L_1 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & -L_1 & 0 & L_m \\ -L_m & 0 & L_2 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_2 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} R_1 & -w_1 L_1 & 0 & w_1 L_m \\ w_1 L_1 & R_1 & -w_1 L_m & 0 \\ 0 & -w_s L_m & -R_2 & w_s L_2 \\ w_s L_m & 0 & -w_s L_2 & -R_2 \end{bmatrix};$$

$$D = \begin{bmatrix} -L_1 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & -L_1 & 0 & L_m \\ -L_m & 0 & L_1 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_1 \end{bmatrix}^{-1}.$$

将式(23)扩展为齐次状态方程

$$d\bar{x} = \bar{C}\bar{x} \quad (24)$$

其中， $\bar{x} = [i_{m1}, i_{t1}, i_{m2}, i_{t2}, u_{m1}, u_{t1}, u_{m2}, u_{t2}]^T$ ； $\bar{C} = \begin{bmatrix} C & D \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

根据式(5)和式(24)可类似地建立双馈异步发电机的发电模型^[20]，如图 8 所示。

发电模型中，转移状态向量 \bar{x} 通过一个由并网

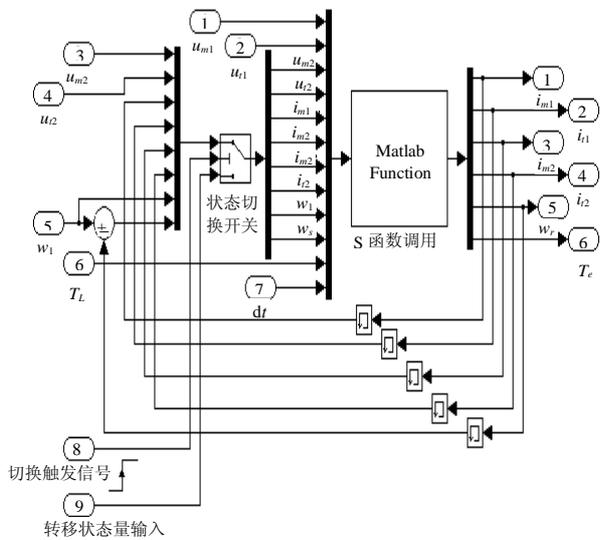


图8 交流励磁变速恒频风力发电机发电仿真模型
Fig. 8 Simulation model of the AEVSCF wind power generator with load

信号控制的状态开关进行切换，并网瞬间 \bar{x} 从空载模型转移到发电模型作为其运行初始状态。

仿真系统如图9所示，它包括并网和发电两大模块，前者包括发电机空载模型和空载并网控制策略，后者包括发电模型和最大风能追踪控制策略。两个模块的“使能信号”按相反的逻辑关系取自并网信号，保证了按先后次序分时工作的需求。

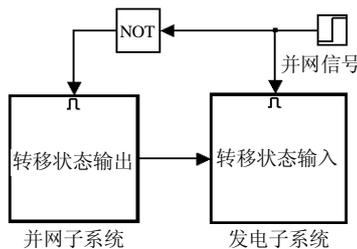


图9 交流励磁变速恒频风力发电仿真系统
Fig. 9 Simulation system of the AEVSCF wind power generation

3.2 并网控制及最大风能追踪控制的仿真

仿真参数为：三相四极双馈异步发电机；额定功率为 2.1kW；额定电压为 220V；定子电阻和漏感分别为 0.435Ω、2mH；转子电阻和漏感分别为 0.816Ω、2mH；互感为 69.31mH；同步转速为 1800r/min。

图10(a)、(b)分别为并网前两个时段内发电机定子电压 U_1 和电网电压 U_1^* 以及电压误差 e_{rr} ($e_{rr}=|U_1-U_1^*$)。在并网控制下，定子电压逐渐逼近电网电压，电压误差迅速变小，调节过程不受机组转速的影响。

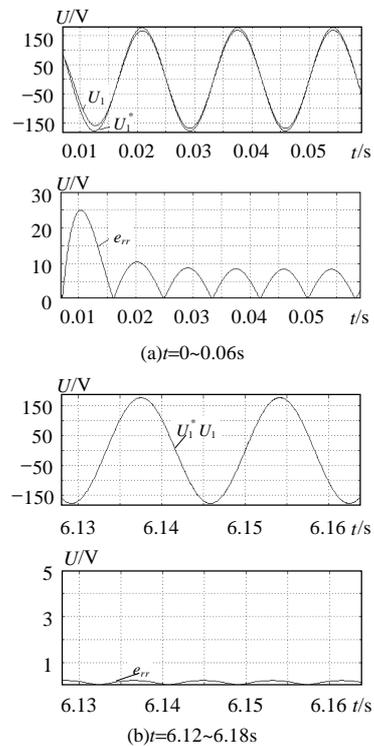


图10 并网控制下发电机端电压 U_1 、电网电压 U_1^* 和电压误差 e_{rr}

Fig. 10 Terminal voltage of the generator U_1 , voltage of grid U_1^* and voltage error e_{rr} under grid-connection control

图11~图15为从并网前（并网控制）到并网后（最大风能追踪控制）的完整过程的仿真情况。仿真条件为：发电机并网前空载运行，0.5s时刻并网，并网后风速为 4m/s，第10s时风速升至 6.8m/s。图11为风速和发电机角速度的变化过程，并网前发电机角速度为 167.5rad/s，并网后在最大风能追踪控制下，经过大约5s的调节过程后稳定在对应4m/s风速的最佳角速度（122.6rad/s）上。第10s风速升为 6.8m/s，经过大约10s后，角速度又稳定在对应6.8m/s风速的最佳转速（207.92rad/s）上。

图12为发电机定、转子电流变化情况。图12(a)

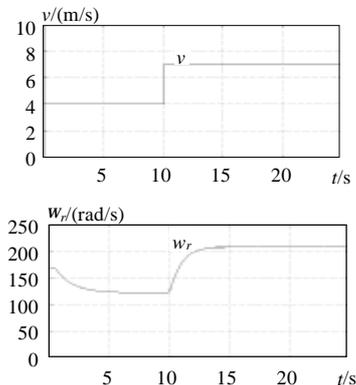


图11 风速 v 和发电机角速度 w_r
Fig. 11 Wind velocity v and generator angle speed w_r

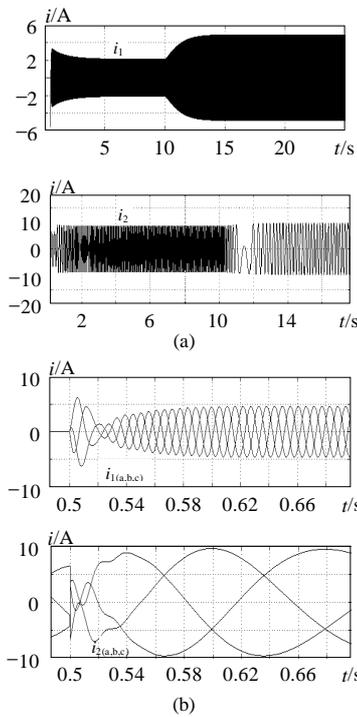


图 12 发电机定子电流 i_1 和转子电流 i_2 及其在并网瞬间的过渡过程

Fig. 12 Stator current i_1 and rotor current i_2 and their transition process

为并网前、后的定、转子电流，转速变化时定子电流频率保持恒定，实现了变速恒频，定子电流幅值的变化体现了机组在追踪最大风能时的发电机输出有功功率的变化情况；转子电流的频率随着机组转速的变化而改变，同步转速时频率为零。图 12(b)为并网瞬间定、转子电流过渡过程，并网控制下的定子电流冲击很小，转子电流过渡平稳。

图 13~15 表示了发电机功率变化情况。图 13

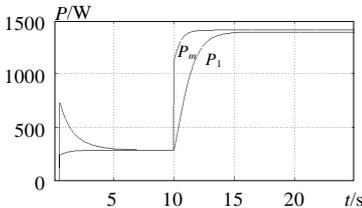


图 13 发电机输出有功功率 P_1 和风力机输出机械功率 P_m
Fig. 13 Output active power P_1 of the generator and output mechanical power P_m of the wind-turbine

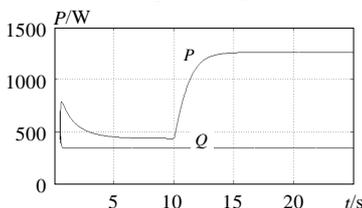


图 14 发电机输出有功功率 P 和无功功率 Q
Fig. 14 Output active power P and reactive power Q of the generator

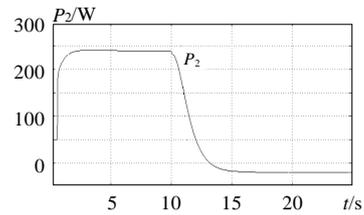


图 15 发电机转子侧有功功率 P_2

Fig. 15 Rotor side active power P_2 of the generator

为发电机输出有功功率和风力机输出机械功率的变化，从中可看出风力机的输出追踪最佳功率曲线的情况。图 14 为发电机输出有功、无功功率的解耦情况。图 15 为发电机转子侧的能量流动情况，亚同步运行时为正，能量从电网流向转子；超同步时为负，能量从转子流向电网。

4 结论

本文应用磁场定向矢量控制技术，研究了 AEVSCF 风力发电机并网控制和最大风能追踪控制，然后通过分开建模，分时仿真的方法建立了发电机的空载模型和发电模型，在此基础上构成了交流励磁变速恒频风力发电仿真系统。对交流励磁变速恒频风力发电机的并网控制和最大风能追踪控制的仿真研究表明：发电机并网过程平稳、电流冲击较小；并网后发电机能可靠地在变速恒频运行的基础上追踪风况的变化，最大限度地将风能转换为电能，可显著提高机组运行效率。

参考文献

- [1] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.
Liu Qihui, He Yikang, Bian Songjiang. The investigation of cutting-in control of variable-speed constant-frequency wind-power generator with no-load[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11.
- [2] 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.
- [3] 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]. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 1996, 143(3): 231-241.
- [4] 辜承林, 韦忠朝, 黄声华, 等. 对转子交流励磁电流实行矢量控制的变速恒频发电机[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 119-124.
Gu Chenglin, Wei Zhongzhao, Huang Shenghua, et al. VSCF generator with vector control for rotor AC exciting current [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 119-124.
- [5] Boldea I, Tutelea L, Serban I. Variable speed electric generators and their control: an emerging technology[J]. Journal of Electrical Engineering, 2002, (3): 20-28.
- [6] Bhowmik S, Spee R, Enslin J H R. Performance optimization for

- doubly fed wind power generation systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(4): 949-958.
- [7] 廖勇, 杨顺昌. 交流励磁发电机励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 87-90.
- Liao Yong, Yang Shunchang. The excitation control of alternation current excited generator[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(2): 87-90
- [8] 黄科远, 贺益康, 卞松江. 矩阵式变换器交流励磁的变速恒频风力发电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 100-105.
- Huang Keyuan, He Yikang, Bian songjiang. Investigation of a matrix converter-excited variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 100-105.
- [9] 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[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125.
- Lin Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125.
- [10] 邱瑞昌, 闫耀民, 姜学东. 准稳态转子感应电动势定向的双馈双馈调速风力发电机的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 133-139.
- Qiu Ruichang, Yan Yaomin, Jiang Xuedong. Research on a quasi-stable state rotor EMF_oriented doubly fed winding induction machine in wind-energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 133-139.
- [11] 叶杭冶. 风力发电系统控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [12] 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): 100-105.
- Li Jing, Song Jiahua, Wang Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105.
- [13] 陈伯时, 陈敏逊. 交流调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [14] 杰克·派克著, 孙云龙译. 风能及其利用[M]. 北京: 能源出版社, 1984.
- [15] 张志涌. 精通 Matlab 6.5 版[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [16] 贺益康. 交流电机调速系统的计算机仿真[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1993.
- [17] Lie Xu. Fault ride through of DFIG based on wind turbines[J]. IEE Proc., Electrical Power Application, 2003, 143(3): 1-8.
- [18] Yamamoto M, Motoyoshi O. Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator[J]. IEEE Trans. On Power Electronics, 1997, 6(4): 624-629.
- [19] Datta R, Ranganathan V T. Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2001, 16(3): 390-399.
- [20] 许大中. 交流电机调速理论[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.

收稿日期: 2006-01-04。

作者简介:

刘其辉 (1974-), 男, 博士, 讲师, 主要从事变速恒频风力发电、FACTS 等方向的研究;

贺益康 (1941-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要从事电机及其控制以及电力电子的研究;

张建华 (1952-), 男, 教授, 电力自动化技术研究所所长, 博士生导师。主要研究方向为配电自动化新技术, 人工智能在电力系统中的应用。

(责任编辑 云爱霞)