

变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制

刘其辉, 贺益康, 赵仁德

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 根据风力机的特性, 探讨了追踪、捕获最大风能的方法; 在分析双馈型异步发电机数学模型和磁场定向矢量变换控制的基础上, 提出了变速恒频风力发电机的有功、无功功率解耦控制策略, 详细的仿真研究验证了控制策略的正确性和可行性。

关键词: 变速恒频风力发电系统; 最大风能捕获; 矢量变换控制; 交流励磁

中图分类号: TM614; TM761

0 引言

变速恒频发电是 20 世纪末发展起来的一种新型发电方式, 它将电力电子技术、矢量变换控制技术和微机信息处理技术引入发电机控制之中, 改变了以往恒速才能恒频的传统发电概念, 在变水头的水力发电、能量随机变化的风力发电, 以及舰船、飞机、车辆等变速主轴驱动的特殊发电场合中获得了越来越广泛的应用, 并表现出了卓越的运行性能, 成为电力技术研究中的热点^[1,2]。

在风力发电应用中, 变速恒频发电技术更表现出了其独特的优越性^[3]:

a. 风力是一种具有随机性、爆发性、不稳定性特征的能源, 用于风能捕获的风力机在不同风速下有一个最佳运行转速, 此时对风能的捕获效率最高, 而且风施加给风力机的应力最小, 所以应控制风力发电机组运行在这个优化的转速下。传统的恒速恒频发电方式由于只能固定运行在同步转速上, 当风速改变时风力机就会偏离最佳运行转速, 导致运行效率下降, 不但浪费风力资源, 而且增大风力机的磨损。采用变速恒频发电方式, 就可按照捕获最大风能的要求, 在风速变化的情况下实时地调节风力机转速, 使之始终运行在最佳转速上, 从而提高了机组发电效率, 优化了风力机的运行条件。

b. 变速恒频发电是在异步发电机的转子侧施加三相低频电流实现交流励磁, 控制励磁电流的幅值、频率、相位, 实现输出电能恒频恒压。同时采用矢量变换控制技术, 实现发电机输出有功功率、无功功率的解耦控制^[3,4]。控制有功功率可调节风电机组转速, 进而实现最大风能捕获的追踪控制; 调节无

功功率可调节电网功率因数, 提高风力发电机组及电力系统运行的动、静态稳定性。

c. 采用变速恒频发电技术, 可使发电机组与电网系统之间实现良好的柔性连接, 比传统的恒速恒频发电系统更易实现并网操作及运行。

d. 采用现代电力电子手段, 可构造出输入、输出特性良好, 功率可双向流动的 PWM 整流-PWM 逆变形式的全控双 PWM 变频器, 将其用做交流励磁电源, 在实现发电机同步速上、下变速恒频发电的基础上又保障了发电质量, 大大减少了电力系统谐波污染, 真正意义上实现了能源的绿色变换。

变速恒频技术在水力、风力等可再生能源的应用研究中已有不少成果, 解决了很多基础理论及疑难技术问题^[3,4], 但变速恒频风力发电系统是一个庞大复杂的机电能量转换系统, 包含了流体与机械力学、电工学与电子学、控制理论与微机控制等众多学科的交叉知识和技术, 其深入研究应从系统的角度综合进行。目前国内有关文献大多是从某单一学科的角度开展讨论, 对整个系统进行综合分析的比较少。

针对这些现状, 本文从分析风力机特性出发, 研究实现最大风能捕获的风电系统控制方法。根据双馈型异步发电机的特性, 采用定子磁链定向的矢量变换控制技术, 对发电机转子进行交流励磁, 实现发电机有功、无功的解耦控制, 从而实现最大风能捕获的高效发电运行。完整的风电系统仿真研究验证了本文提出的控制策略的正确性和有效性。

1 风力机最大风能捕获控制机理

根据贝兹证明, 风力机从风能中吸收的功率 P 为^[5]:

$$P = \frac{1}{2} C_p A \rho v^3 \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; v 为风速; A 为风力机扫掠面积; C_p 为风力机的功率系数, 它是叶尖速比 λ 和桨叶节距角 α 的函数; $\lambda = \omega_m R / v$; ω_m 为风力机机械角速度; R 为风轮半径。

在 α 一定时, 风力机 C_p - λ 曲线如图 1 所示。可以看出, 对于一台确定的风力机, 在 α 不变时总有一个对应着最佳功率系数 $C_{p\max}$ 的最佳叶尖速比 λ_{opt} , 此时风力机的转换效率最高。换言之, 对于一个特定的风速 v , 风力机只有运行在一个特定的转速 ω_m 下才会有最高的风能转换效率。

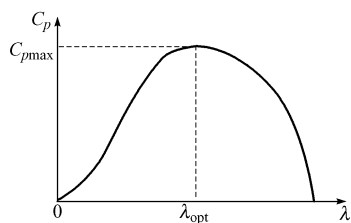


图 1 风力机 C_p - λ 曲线

Fig. 1 C_p - λ curve of a wind-turbine

图 2 是一组在不同风速 ($v_1 > v_2 > v_3$) 下风力机的输出功率特性, P_{opt} 曲线是各风速下最大输出功率点的连线, 即最佳功率曲线。

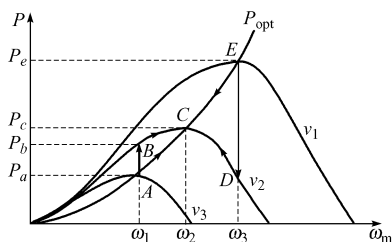


图 2 风力机的功率特性

Fig. 2 Power characteristics of a wind-turbine

风力机运行在 P_{opt} 曲线上将会输出最大功率 $P_{\max}$, 其值为:

$$P_{\max} = k \omega_m^3 \quad (2)$$

式中: $k = \rho A (R / \lambda_{\text{opt}})^3 C_{p\max} / 2$ 。

可以看出, 在同一个风速下, 不同转速会使风力机输出不同的功率, 要想追踪 P_{opt} 曲线, 必须在风速变化时及时调整转速 ω_m , 保持最佳叶尖速比。

风机转速 ω_m 可以通过风力机桨叶变节距调节, 也可以通过控制发电机输出功率调节。采用风力机变节距调速的困难在于风速难检测, 调速精度低, 变距系统结构复杂, 维护困难。为避免这些问题, 本文通过控制发电机输出有功功率来调节发电机的电磁转矩, 进而调节发电机的转速。

由双馈型异步发电机的功率关系可知:

$$\begin{cases} P_1 = P_e - P_{\text{cul}} - P_{\text{fel}} \\ P_e = \frac{P_M - P_m'}{1-s} = \frac{P_m}{1-s} \\ P_e = \frac{P_2 \pm P_2'}{s} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_1, P_{\text{cul}}, P_{\text{fel}}$ 分别为发电机定子的输出功率、铜耗、铁耗; P_e 为发电机电磁功率; s 为发电机转差率; P_M, P_m', P_m 分别为发电机输入机械功率、机械损耗和吸收的净机械功率; P_2, P_2' 分别为发电机转子功率和转子损耗。

为实现最大风能追踪控制, 应依据风力机最佳功率曲线和风力机转速 ω_m 来实时计算发电机的输出有功功率指令 P^* 。令式(3)中的 $P_M = P_{\max}$, 由式(2)和式(3)可得:

$$\begin{cases} P^* = \frac{P_{\max}}{1-s} - \Delta P = \frac{k \omega_m^3}{1-s} - \Delta P \\ \Delta P = P_{\text{cul}} + P_{\text{fel}} + \frac{P_m'}{1-s} \end{cases} \quad (4)$$

按照指令 P^* 控制发电机的输出有功功率, 就可实现最大风能的追踪与捕获。追踪最大风能的过程可由图 2 定性解释: 假设原先在风速 v_3 下风力机稳定运行在 P_{opt} 曲线的 A 点上, 此时风力机的输出功率和发电机的输入机械功率相平衡, 都为 P_a , 风力机稳定运行在转速 ω_1 上。如果某时刻风速升高至 v_2 , 风力机就会由 A 点跳至 B 点运行, 其输出功率由 P_a 突变至 P_b 。由于惯性作用和调节过程的滞后, 发电机仍暂时运行在 A 点, 其输入功率大于输出功率, 功率的失恒导致转速上升。在转速增加的过程中, 风力机和发电机分别沿着 BC 和 AC 曲线增速。当到达风力机功率曲线与最佳曲线相交的 C 点时, 功率再一次平衡, 转速稳定为 ω_2 , ω_2 就是对应于风速 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。

由式(4)知, 发电机有功功率指令 P^* 应根据转速 ω_m 和发电机损耗 ΔP 来计算, 其中转速可以精确测得, 但发电机损耗却难以准确估算, 这势必产生 P^* 的计算误差, 影响对最佳风能的追踪效果。

设计算所得功率指令为 $P' = P^* + P_e$, 其中 P^* 为准确的功率指令, P_e 为计算误差。设根据 P^* 和 P' 追踪获得的最大功率分别为 $P_{\max}$ 和 $P_{\max}'$, 则根据式(4)可得:

$$P_{\max}' = P_{\max} + (1-s)P_e \quad (5)$$

可以看出, 由于功率指令的计算误差, 追踪的“最佳曲线”比理想的最佳曲线上下平移了 $(1-s)P_e$ 的偏差, 如图 3 所示。 $P_e > 0$, 机组跟踪的是图中的 $P_{\text{opt}1}$ 曲线; $P_e < 0$, 跟踪的是 $P_{\text{opt}2}$ 曲线。由于 P_e 不

大, $P_{\text{opt}1}$ 或 $P_{\text{opt}2}$ 都很接近理想最佳曲线。这样, 即使对 P^* 的计算不很准确, 也能使发电系统运行在“次最佳状态”, 所获得的最大风能追踪控制效果仍较理想, 具有很大的实用价值。

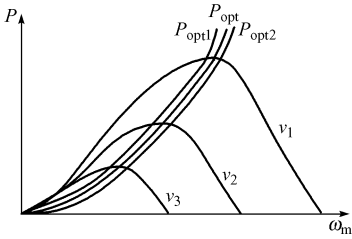


图3 最大风能追踪误差

Fig. 3 Maximum wind energy tracing error

2 变速恒频发电机 P, Q 解耦控制

通过以上分析得知, 风电系统中发电机控制的目标是: ①实现变速恒频运行, 满足电网对电能质量的要求; ②对有功功率 P 、无功功率 Q 进行解耦控制, 实现最大风能追踪的目的。为此, 应采用磁场定向矢量变换控制技术, 通过对励磁用 PWM 变频器各分量电压、电流的调节来实现这个控制过程。

2.1 定子磁链定向 $m-t$ 坐标系中双馈型异步发电机数学模型

为分析控制变量关系, 按发电机惯例建立双馈型异步发电机数学模型, 坐标系选择如图 4 所示。图中, $m-t$ 为两相同步速旋转坐标系, m 轴定在定子磁链矢量 Ψ_1 的方向。这样 m, t 轴上的磁链分量分别为: $\Psi_{m1} = \Psi_1, \Psi_{t1} = 0$ 。

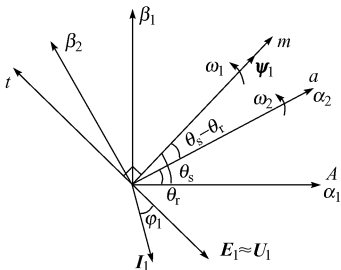


图4 坐标变换系统

Fig. 4 Coordinate transformation system

由于发电机定子侧频率为工频, 定子电阻远小于定子绕组电抗, 可以忽略, 因而发电机感应电动势 E_1 可看做等于定子侧端电压 U_1 。因为 E_1 比 Ψ_1 落后 90° , 故 E_1 和 U_1 位于 t 轴的负方向, 从而有 $U_{m1} = 0, U_{t1} = -U_1$ 。忽略定子电阻时发电机电压和磁链方程为^[6~8]:

$$\begin{cases} \Psi_1 = \frac{U_1}{\omega_1} \\ p\Psi_1 = 0 \\ U_{m2} = r_2 I_{m2} + p\Psi_{m2} - \omega_s \Psi_{t2} \\ U_{t2} = r_2 I_{t2} + p\Psi_{t2} + \omega_s \Psi_{m2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} I_{m2} = \frac{1}{L_m} (L_s I_{m1} - \Psi_1) \\ I_{t2} = \frac{L_s}{L_m} I_{t1} \\ \Psi_{m2} = -L_m I_{m1} + L_r I_{m2} \\ \Psi_{t2} = -L_m I_{t1} + L_r I_{t2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: L_s, L_r, L_m 分别为发电机定、转子等效自感和互感; r_2 为转子绕组电阻; $I_{m1}, I_{t1}, I_{m2}, I_{t2}$ 分别为定、转子电流的 m, t 轴分量; ω_1, ω_s 分别为同步角速度及转差角速度; p 为微分算子。

从式(6)可看出, 不计定子电阻影响时, 发电机的定子磁链 Ψ_1 为常数, 其值为定子电压与同步角速度之比。

2.2 发电机矢量变换控制系统结构

按 $U_{m1} = 0, U_{t1} = -U_1$ 关系, 发电机的功率方程为:

$$\begin{cases} P = -U_1 I_{t1} \\ Q = -U_1 I_{m1} \end{cases} \quad (8)$$

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} 可分别独立调节 P 和 Q 。

由前面发电机的电压和磁链方程可以导出:

$$\begin{cases} U_{m2} = U_{m2}' + \Delta U_{m2} \\ U_{t2} = U_{t2}' + \Delta U_{t2} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} U_{m2}' = (R_2 + bp) I_{m2} \\ U_{t2}' = (R_2 + bp) I_{t2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta U_{m2} = -b\omega_s I_{t2} \\ \Delta U_{t2} = a\omega_s \Psi_1 + b\omega_s I_{m2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_{m2}', U_{t2}' 为分别与 I_{m2}, I_{t2} 具有一阶微分关系的电压分量; $\Delta U_{m2}, \Delta U_{t2}$ 为电压补偿分量, 为消除转子电压、电流交叉耦合的补偿项; $a = -L_m/L_s; b = L_r - L_m^2/L_s$ 。

这样将转子电压分解为解耦项和补偿项后, 既简化了控制, 又能保证控制的精度和动态响应的快速性。

按式(6)~式(11)可设计出变速恒频发电机定子磁链定向的矢量变换控制系统框图, 如图 5 所示。系统采用双闭环结构, 外环为功率控制环, 内环为电流控制环。在功率环中, 有功功率指令 P^* 按式(4)计算得到, 无功功率指令 Q^* 可根据电网对无功功

理论最佳角速度 ω_{ropt} 为:

$$\omega_{\text{ropt}} = \frac{\lambda_{\text{opt}} N v}{R} = \frac{9 \times 7.846 v}{2.3} \approx 30.7 v \quad (13)$$

假定第 10 s 时风速由 4 m/s 升至 6.8 m/s, 按式(13)得到两个风速下发电机的理论最佳转速分别为 122.8 rad/s 和 208.7 rad/s。发电机并网前空载运行, 角速度为 167.5 rad/s, 0.5 s 时刻切入电网(并网过程分析将另文讨论)。

图 8 所示为随着风速的变化发电机转速调节的过程, 第 1 次调节是从并网时刻的 167.5 rad/s 开始, 5 s 后转速达到稳定; 第 2 次调节开始于风速发生阶跃的 10 s 时刻, 在 15 s 时刻转速趋于平稳, 调节后两个最佳角速度分别稳定在 122.6 rad/s 和 207.92 rad/s, 与理论计算值非常吻合。

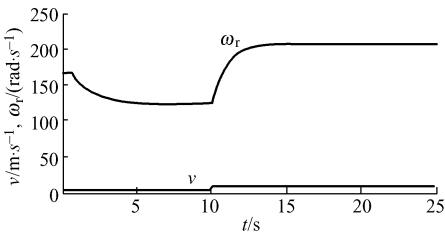


图 8 风速 v 和发电机角速度 ω_r
Fig. 8 Wind velocity v and generator angle speed ω_r

图 9 和图 10 分别描述了在追踪最大风能过程中发电机和风力机的功率与转矩的调节过程。

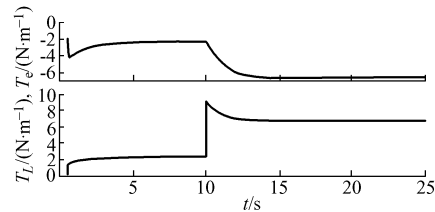


图 9 发电机的电磁转矩 T_e 和
风力机驱动转矩 T_L
Fig. 9 Electromagnetic torque T_e of the generator
and driving torque T_L of the wind-turbine

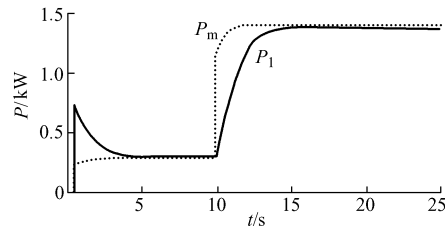


图 10 发电机输出有功功率 P_1 和风力机
输出机械功率 P_m
Fig. 10 Output active power P_1 of the generator and
output mechanical power P_m of the wind-turbine

图 11 为发电机定子电流波形。可以看出, 在最

大风能追踪控制下, 发电机输出有功功率相应地变化, 在电网电压恒定的情况下表现为定子电流的幅值相应地变化, 整个过程中定子电流频率始终保持恒定(60 Hz)。

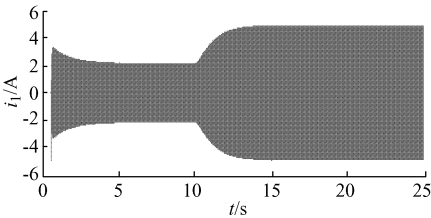


图 11 发电机定子电流 i_1
Fig. 11 Stator current i_1 of the generator

从图 8~图 11 可知, 在风速变化时, 发电机不但能自动调节至最佳转速, 使风力机捕获到最大风能, 而且还能将捕获的能量转换为恒定频率的电能进行输出, 以满足电网的要求。

图 12 为转子电流的变化过程, 随着发电机转速的变化, 转子电流频率相应地变化, 转速过同步点时其频率为 0。

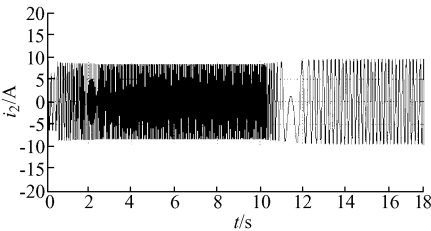


图 12 发电机转子电流 i_2
Fig. 12 Rotor current i_2 of the generator

图 13 和图 14 描述了发电机定、转子侧的功率情况。

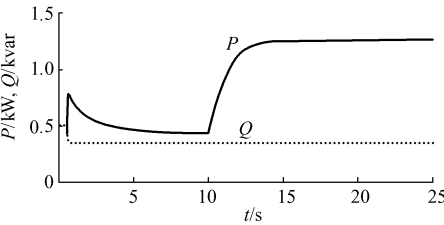


图 13 发电机输出有功功率 P 和无功功率 Q
Fig. 13 Output active power P and reactive
power Q of the generator

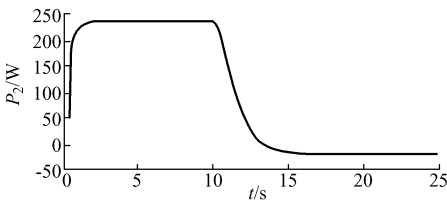


图 14 发电机转子侧有功功率 P_2
Fig. 14 Rotor active power P_2 of the generator

从图 13 可以看出,随着风速的变化发电机输出有功功率 P 相应变化时,无功功率 Q 不受其影响,保持设定的 350 var 不变,实现了 P 和 Q 的解耦控制。图 14 表示了在追踪最大风能过程中发电机转子侧功率 P_2 的流向。当发电机亚同步速运行时, $P_2 > 0$, 表示功率从电网流向发电机;超同步运行时, $P_2 < 0$, 表示功率从发电机流向电网,采用功率可双向流动的双 PWM 变频器作为发电机转子侧的交流励磁电源,不但改善了电能的质量,而且很好地解决了发电机运行在亚同步和超同步转速下的功率流向问题。

4 结语

本文在分析了风力机特性和双馈型异步发电机数学模型的基础上,研究了追踪最大风能的控制策略,其特点是通过控制发电机输出有功功率来调节电磁转矩和转速,在风速变动情况下保持恒定的最佳叶尖速比,从而实时追踪最佳功率曲线。本文将定子磁场定向的矢量变换控制技术应用在对双馈型异步发电机的控制上,获得了发电机有功功率和无功功率的解耦控制能力,为追踪与捕获最大风能创造了条件。计算机建模与仿真验证了文中所提出的变速恒频风力发电系统控制策略满足变速恒频和追踪最大风能的要求,具有良好的动、静态性能和较高的鲁棒性,对实际系统的运行控制具有指导意义。

参考文献

- 1 Ion Boldea, Lucian Tutelea, Ioan Serban. Variable Speed Electric Generators and Their Control: An Emerging Technology. Journal of Electrical Engineering, 2002, 3:20~28
- 2 Tang Y, Xu L. A Flexible Active and Reactive Power Control

- Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System. IEEE Trans 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. IEE Proceedings—Electric Power Applications, 1996, 143(3):231~241
- 4 廖勇,杨顺昌(Liao Yong, Yang Shunchang). 交流励磁发电机励磁控制(The Excitation Control of Alternation Current Excited Generator). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1998, 18(2):87~90
- 5 黄科远,贺益康,卞松江(Huang Keyuan, He Yikang, Bian Songjiang). 矩阵式变换器交流励磁的变速恒频风力发电系统研究(Investigation of a Matrix Converter-excited Variable-speed Constant-frequency Wind-power Generation System). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2002, 22(11):100~105
- 6 韦忠朝,辜承林(Wei Zhongchao, Gu Chenglin). 变速恒频双馈发电机矢量控制策略及特性分析(Vector Control Strategy of the VSCF DFIG and the Analysis of Its Characteristics). 华中理工大学学报(J of Huazhong Univ of Sci & Tech), 1996, 24(9)
- 7 朱振东(Zhu Zhendong). 发电机交流励磁变速运行的研究[博士学位论文](Investigation of Variable Speed AC Excited Generator, Doctoral Dissertation), 杭州:浙江大学(Hangzhou: Zhejiang University), 1996
- 8 陈伯时,陈敏逊(Chen Boshi, Chen Minxun). 交流调速系统(AC Drive System). 北京:机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 1998

刘其辉(1974—),男,博士研究生,主要从事电机及其控制以及电力电子的研究。E-mail:liuqihuifei@sohu.com

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。E-mail:ykhe@public1.hz.zj.cn

赵仁德(1976—),男,博士研究生,主要研究方向为电机及其控制、变速恒频风力发电技术。

THE MAXIMAL WIND-ENERGY TRACING CONTROL OF A VARIABLE-SPEED CONSTANT-FREQUENCY WIND-POWER GENERATION SYSTEM

Liu Qihui, He Yikang, Zhao Rende
(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on the analysis of wind-turbine characteristics, the idea of tracing and capturing maximal wind energy is investigated. By analyzing the mathematical model of a doubly-fed induction generator (DIFG) and the field-oriented vector transformation control scheme, the control strategy of a variable-speed constant-frequency (VSCF) wind energy generator which can realize the independent regulation of the active power and reactive power of DIFG is put forward. Detailed simulation study verifies the correctness and feasibility of the proposed control strategy.

This work is supported by National Key Technologies R&D Program(No. 2001AA512023).

Key words: VSCF wind energy generation system; maximal wind energy capture; field-oriented vector transformation control; AC excitation