

风电参与一次调频的小扰动稳定性分析

李军军, 吴政球

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082)

Small Signal Stability Analysis of Wind Power Generation Participating in Primary Frequency Regulation

LI Junjun, WU Zhengqiu

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: The effect of wind power system which participated in grid primary frequency regulation on power system stability was analyzed, a small signal stability analysis mathematical model of single machine infinite system base on directly driven permanent magnet wind power system was established. According to wind speed variation, under rated wind speed, wind power system was controlled by maximum power point tracking (MPPT) scheme, wind power system maximum output power was realized; above rated wind speed, constant power control scheme was adopted, system safe operation was guaranteed. Eigenvalues variation with wind speed change was researched when load dynamic model considered, the result shows power system can keep small signal stability in whole wind speed variation section. On theory analysis basis, time domain simulation was performed and theory analysis correctness was tested. Simulation result shows wind power system can participate in grid primary frequency regulation and effectively improve grid frequency characteristics, which provides useful theory reference for stable and safe connected operation of direct-driven wind power system.

KEY WORDS: primary frequency regulation; directly driven permanent magnet wind power system; small signal stability; maximum power point tracking

摘要: 为了分析参与电网一次调频的风电系统对电力系统稳定性的影响, 建立基于直驱永磁型风电系统的单机无穷大系统小扰动稳定性分析数学模型。根据风速的变化, 在额定风速以下采用最大功率点追踪控制, 以实现风电系统输出功率最大; 额定风速以上采用恒功率控制, 保证风电系统安全运行。研究考虑负荷动态模型时风速变化对系统特征值的影响, 结果表明, 在整个风速变化区间系统均能保持小扰动稳定。在理论分析的基础上进行时域仿真, 来验证理论分析的正确性。仿真结果表明, 风电系统能够参与电网一次调频, 可有效改善电网的频率特性, 为直驱型风电安全稳定并网运行提供了可借鉴的理论依据。

关键词: 一次调频; 直驱永磁风电系统; 小扰动稳定; 最大功率点跟踪

0 引言

随着越来越多的大容量风电场直接并入电网, 风电在电网中所占的比例不断提高, 使得风电与电网的相互影响越来越复杂。在传统发电模式中, 系统频率特性与系统惯性有关, 但是发电机组与系统惯性间的这种固有联系并没有出现在风力发电中, 这是因为并网的风力发电机组多采用全电力电子变换器接口的运行技术, 致使机械和电气系统解耦, 阻断了风电机组与电网间频率变化的响应。若不采取有效措施, 越来越多的传统发电被风电取代后, 系统频率的变化速率将会增大, 给电网安全运行带来极大的威胁。为此国内外学者对此进行了一系列研究: 文献[1]研究了变速风力发电系统在改进惯性控制方法下快速、有效地参与电网的一次调频; 文献[2-6]研究了双馈风电系统通过辅助频率控制环节, 参与电力系统的一次调频; 文献[7-9]研究了直驱永磁型风电系统的模型、控制策略以及如何有效参与电网的一次调频; 文献[10-14]研究了在风电中利用惯性响应改善电力系统的频率特性; 文献[15-17]研究了含风电的电网中风电参与频率调节的有关技术; 文献[18-20]对风电中控制系统及大功率变换器进行了研究。本文在对上述文献整理、分析的基础上, 研究基于双脉宽调制(pulse width modulation, PWM)变换器的直驱永磁型风电系统, 在增加频率控制环节后对电力系统稳定性的影响以及如何有效地参与电网的一次调频。

基于上述目的, 建立直驱永磁型风电系统参与一次调频的单机无穷大系统的小扰动稳定性分析数学

模型。针对风速的变化,研究不同的控制策略:在额定风速以下采用最大功率点追踪控制(maximum power point tracking, MPPT),叶尖速比(tip speed ratio, TSR)保持最佳,保证风力发电机输出功率最大;额定风速以上采用恒功率控制,保证功率输出不超出极限,使风电系统安全运行。研究考虑负荷动态模型时,风速在4~25 m/s 区间变化对系统特征值的影响,并通过仿真研究风力发电如何有效地参与电力系统一次调频。

1 风电机组参与系统调频的原理

风力机储存的旋转动能^[10]可表示为

$$E = 0.5J\omega_m^2 \quad (1)$$

式中: J 为风力机转动惯量; ω_m 为风力机机械转速。风力机输出功率表示为

$$P = dE/dt = J\omega_m d\omega_m/dt \quad (2)$$

惯性常量 H 定义为

$$H = E/S = J\omega_s^2/2S \quad (3)$$

式中: ω_s 为额定转速; S 为视在功率。将式(3)中的

J 代入式(2)得

$$\frac{P}{S} = 2H \frac{\omega_m}{\omega_s} \frac{d(\omega_m/\omega_s)}{dt} \quad (4)$$

用标幺值表示有

$$\bar{P} = 2H\bar{\omega}_m \frac{d\bar{\omega}_m}{dt} \quad (5)$$

引入频率控制环节(转速变化可等效频率的变化),既可保持风力发电机组转速可控的优点,又可实现系统频率变化时,通过改变转子转速释放或吸收部分旋转动能来改变风电机组输出功率,为系统提供频率支持,使风电机组有效参与系统频率的控制。

2 一次调频的直驱永磁风电系统小信号模型

2.1 系统结构

直驱永磁风电系统参与一次调频,对系统机侧控制结构稍作修改,增加辅助频率控制环节,如图1所示。图中频率控制环节^[1]如图2所示。

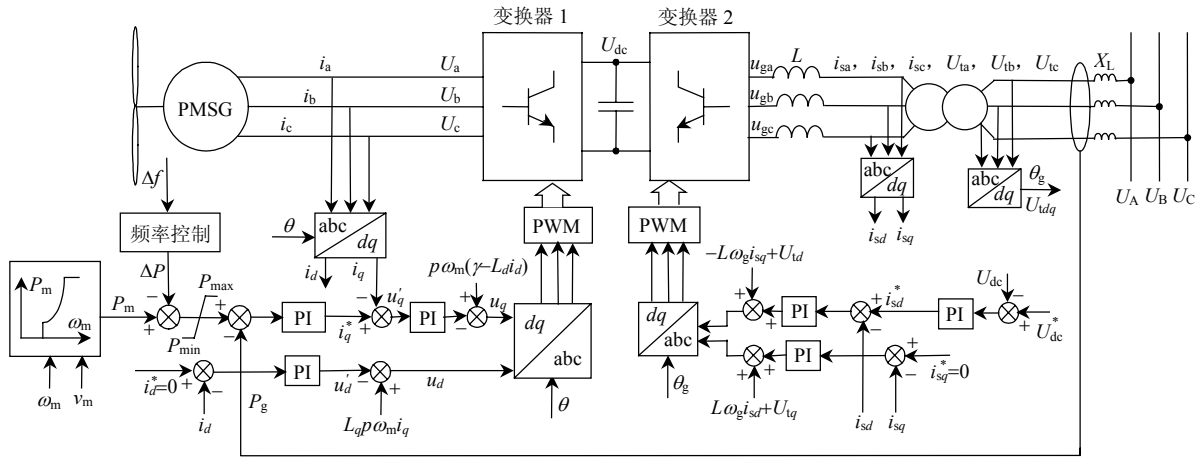


图1 考虑频率控制的双变换器控制结构图

Fig. 1 Dual converters control structure considering frequency control

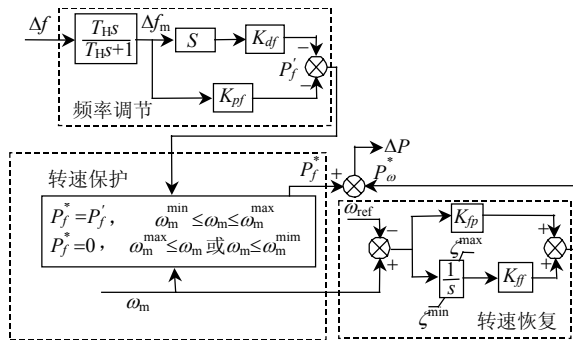


图2 频率控制模型

Fig. 2 Frequency control model

该控制环节主要包括3个部分,即频率调节模

块、转速保护模块及转速恢复模块。频率调节模块的作用是传递频率调节的功率信号,频率调节如下:

$$P_f^* = -K_{df} d\Delta f_m/dt - K_{pf} \Delta f_m \quad (6)$$

式中: K_{df} 、 K_{pf} 为控制器参数; P_f^* 为控制器频率调节功率信号; Δf_m 为通过高通滤波器频率信号,滤波器使稳态频率信号对控制过程无影响。

转速保护模块可避免风力机转速变化过大给风力发电系统造成破坏,当转速到达安全运行范围极限值时,使 $P_f^* = 0$,退出参与系统调频的调节。

转速恢复模块的作用是使转速更快地恢复到

最佳运行状态, 该模块采用 PI 控制器, 有

$$P_{\omega}^* = K_{fp}(\omega_{\text{ref}} - \omega_m) + K_{ff} \int (\omega_{\text{ref}} - \omega_m) dt \quad (7)$$

式中: P_{ω}^* 为转速调节功率信号; ω_{ref} 为参考转速; K_{fp} 、 K_{ff} 为 PI 控制器参数。

2.2 风轮机

风轮机主要由叶片、轮毂和联轴器等装置组成。叶片将风能转换成作用在轮毂上的机械转矩; 轮毂用于连接叶片和联轴器; 联轴器为传动装置, 传递风轮机和发电机间的转矩。由空气动力学可知风轮机捕获的功率为

$$P_m = 0.5 \rho \pi r^2 v_m^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (8)$$

式中: ρ 为空气密度; r 为叶片半径; v_m 为风速; λ 为叶尖速率比; C_p 为风轮机转换效率系数, 是风轮机叶尖速率比 λ 和桨距角 β 的非线性函数。

2.3 永磁同步电机模型

设 dq 坐标系以同步速度旋转且 q 轴超前于 d 轴, 将 d 轴定位于转子永磁体的磁链方向上, 永磁同步电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)在 dq 坐标系下的等效电路如图 3 所示, 电气部分可表示为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{1}{L_d} U_d - \frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_m i_q \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{1}{L_q} U_q - \frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega_m i_d + \frac{\gamma p \omega_m}{L_q} \end{cases} \quad (9)$$

式中: R_s 为定子电阻; γ 为永磁体在定子上感应出的磁链; L_d 、 L_q 为定子 d 、 q 轴电感; U_d 、 U_q (i_d 、 i_q) 为定子 d 、 q 轴电压(电流); p 为极对数。

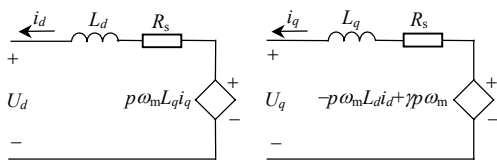


图 3 PMSG 在 dq 坐标系下的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of PMSG under dq coordinate

机械部分方程表示为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - T_e - F \omega_m) \quad (10)$$

式中: F 为转子阻尼系数; J 为转子转动惯量; T_m 为风轮机输出机械转矩。

PMSG 的电磁转矩为

$$T_e = 1.5p(\gamma i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (11)$$

从式(11)可看出, 对于隐式 PMSG 有 $L_d = L_q$, 电磁转矩仅仅取决于 q 轴电流, 要控制 PMSG 输出的有功功率, 只要对 i_q 进行控制即可, 很方便。

2.4 网侧及直流环节模型

根据图 1, dq 坐标系下网侧满足

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega_g \\ -\omega_g & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_{gd} - U_{td} \\ u_{gq} - U_{tq} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: ω_g 为电网角频率; u_{gd} 、 u_{gq} 为网侧变换器输出电压 dq 分量; i_{sd} 、 i_{sq} 为网侧电流 dq 分量; U_{td} 、 U_{tq} 为母线电压 dq 分量。

直流电容器的电压、电流满足

$$C dU_{dc} / dt = i_s - i_g \quad (13)$$

式中: C 为直流母线电容; i_s 、 i_g 分别为变换器 1、变换器 2 的输出和输入电流。

忽略变换器自身损耗, 根据功率不变原则有

$$C U_{dc} dU_{dc} / dt = U_{dc} i_s - U_{dc} i_g = P_o - P_g \quad (14)$$

机侧、网侧有功功率 P_o 、 P_g 可表示为(机侧、网侧电流 i_d 、 i_{sq} 在运行中控制为 0)

$$P_o = 1.5(U_d i_d + U_q i_q) = 1.5 U_q i_q$$

$$P_g = 1.5(u_{gd} i_{sd} + u_{gq} i_{sq}) = 1.5 u_{gd} i_{sd}$$

在变换器的 PWM 调制中, 设三相调制波为

$$\begin{bmatrix} m_a \\ m_b \\ m_c \end{bmatrix} = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \sigma) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3 + \sigma) \\ \cos(\omega t - 4\pi/3 + \sigma) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: 在机侧 σ 为 PMSG 感应电动势 e_i 与电枢电压(即机侧变换器输入电压) U_i 间的夹角($i=a, b, c$), 在网侧 σ 为 u_{gi} (即网侧变换器输出电压)与母线电压间 U_{ti} 的夹角; M_0 为调制深度(在 $0 \leq M_0 \leq 1$ 范围内调制效果最好)。占空比与调制波有如下关系:

$$d_i = 0.5(m_i + 1) \quad (16)$$

另外三相电压型整流器输入端电压 U_i 与调制波、直流电压 U_{dc} 之间还存在如下关系:

$$U_i = 0.5 U_{dc} m_i \quad (17)$$

dq 变化可得, 在机侧有

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \frac{M_1}{2} \begin{bmatrix} \cos \sigma_1 \\ \sin \sigma_1 \end{bmatrix} U_{dc} \quad (18)$$

式中: $\sigma_1 = \tan^{-1} \frac{U_q}{U_d}$; $M_1 = \frac{2\sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{U_{dc}}$ 。

同理对于网侧也满足上述关系, 代入式(14), 得

$$C dU_{dc} / dt = 0.75(-M_2 \cos \sigma_2 i_{sd} + M_1 \sin \sigma_1 i_q) \quad (19)$$

2.5 风力机功率控制策略

额定风速以下, 当桨距角一定时, 风力机保持最佳叶尖速比 λ_{opt} 就可获得最大风能利用系数 C_{pmax} , 此时风力机的转换效率最高。因此, 对于某

一特定风速, 风力机应在一个特定的转速下运行才能实现风能的最大捕获。MPPT 的要求是在风速变化时及时调整风力机转速, 使其始终保持最佳叶尖速比运行, 从而可保证系统运行于最佳功率曲线上。风力机的最佳功率 P_{m-opt} 只与其转速有关, 有

$$P_{m-opt} = k \omega_m^3 \quad (20)$$

式中 $k=0.5\rho\pi r^2(r/\lambda_{opt})^3 C_{pmax}$ 。本文采用 TSR 控制策略, 如图 4 所示。TSR 控制算法就是要维持风力机的叶尖速比 λ 在最佳处, 即为 λ_{opt} , 在任何风速下风力机对风能的利用率都最大, 达到风力机最大功率点追踪的目的, 该方法控制原理简单, 容易实现, 一个 PI 控制器即可满足风力机的控制要求。

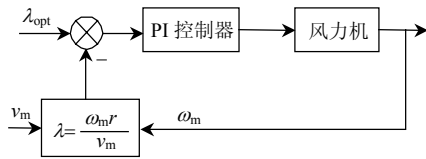


图 4 TSR 控制

Fig. 4 Tip speed ratio control

风速及功率变化情况如图 5 所示。切入风速为 4 m/s, 低于该风速时风力机不启动; 切出风速为 25 m/s, 大于该风速时风力机停机; 风速 4 m/s ≤ v_m < 12 m/s 时, β=0°, 按式(20)MPPT 控制, 使风力机输出功率最大; 风速 12 m/s ≤ v_m ≤ 25 m/s 时, 风力机输出功率为额定功率, 进行变桨距角恒功率控制, 此时桨距角控制结构^[4]如图 6 所示。

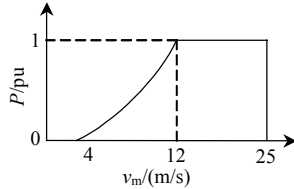


图 5 风力机输出的功率

Fig. 5 Wind turbine output power

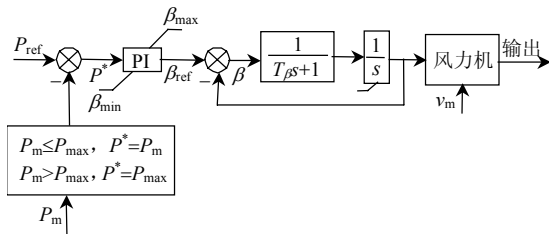


图 6 桨距角控制

Fig. 6 Pitch angle control

由图 6 得如下桨距角控制方程:

$$T_\beta \ddot{\beta} + \dot{\beta} = \beta_{ref} - \beta \quad (21)$$

令 $\dot{\beta} = \alpha$, 有

$$\dot{\alpha} = (-\alpha - \beta + \beta_{ref}) / T_\beta \quad (22)$$

其中

$$\beta_{ref} = K_\omega (P_{ref} - P_m) + K_\omega \int (P_{ref} - P_m) dt / T_\omega \quad (23)$$

积分环节稍作处理, 将其看作一状态变量, 令 $\Phi = \int (P_{ref} - P_m) dt$, 因此有

$$\dot{\beta}_{ref} = K_\omega \dot{\Phi} + K_\omega \Phi / T_\omega \quad (24)$$

式中: T_β 为桨距角机构时间常数; K_ω 、 T_ω 为 PI 控制器参数。

2.6 负荷动态模型

感应电动机在电力负荷(尤其是工业负荷)中占有较大比重, 对电力系统的运行分析与控制具有相当大的影响, 在电力系统分析模型中十分重要。通常感应电动机定子绕组的电磁暂态过程比转子绕组的电磁暂态过程要快得多, 更比电力系统暂态过程快得多, 因此定子的暂态过程可忽略。采用 3 阶模型就能很好地反映感应电动机的性能, 将负荷等值作为一个感应电动机和静态负荷的并联, 如图 7 所示。

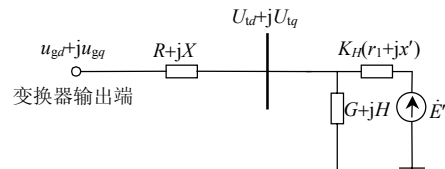


图 7 负荷动态模型

Fig. 7 Load dynamic model

其中: $U_{td} + jU_{tq}$ 为负荷母线电压; E' 为电机暂态电势; r_1 、 x_1 、 r_2 、 x_2 和 x_m 分别为电机定子电阻、电抗以及转子电阻、电抗和激磁电抗; R 、 X 为线路的电阻、电抗; G 和 H 为负荷中静态部分的电导和电纳; K_H 为容量折算比。方程为

$$\begin{cases} \dot{E}'_d = s_0 \omega_0 \dot{E}'_q - \frac{1}{T'_{d0}} E'_d - \frac{x - x'}{T'_{d0}(r_1^2 + x'^2)} [r_1(U_{tq} - E'_q) - x'(U_{td} - E'_d)] \\ \dot{E}'_q = -s_0 \omega_0 E'_d - \frac{1}{T'_{d0}} E'_q + \frac{x - x'}{T'_{d0}(r_1^2 + x'^2)} [r_1(U_{td} - E'_d) + x'(U_{tq} - E'_q)] \\ \dot{s}_0 = \frac{P'_m}{T_j} - \frac{(r_1 E'_q + x' E'_d)(U_{tq} - E'_q) + (r_1 E'_d - x' E'_q)(U_{td} - E'_d)}{T_j(r_1^2 + x'^2)} \end{cases} \quad (25)$$

其中: $x = x_1 + x_m$, 为电机同步电抗; $x' = x_1 + x_m / x_2$, 为电机暂态电抗; $T'_{d0} = (x_m + x_2) / (\omega_0 r_2)$, 为电机暂态电势衰减时间常数; $\omega_0 = 314 \text{ rad/s}$, 为同步角频率; s_0 为电机转差率; T_j 为电机转子惯性时间常数; P'_m 为电动机的机械负载功率, 表达式为

$$P'_m = K_L [a + (1 - a)(1 - s_0)^n] \quad (26)$$

式中: K_L 为负载率; a 为机械负载中与转速无关部分所占的百分率; n 为负载指数。

2.7 频率控制环节

图 8 为增加风电调频环节的电力系统调频模型。 P_p 为常规发电机组调频调节的有功功率； P_g 为负荷及馈入电网的有功功率； P_G 为常规发电机组输出有功功率； P_{fw} 为风电机组调频调节的有功功率； P_o 为风力发电输出有功功率； P_{cf} 为常规机组和风电机组调频功率协调信号； P_T 为互联电力系统传输功率。系统稳态状态下，有功功率平衡方程为

$$-P_g + P_G + P_T + P_o = P_A = 0 \quad (27)$$

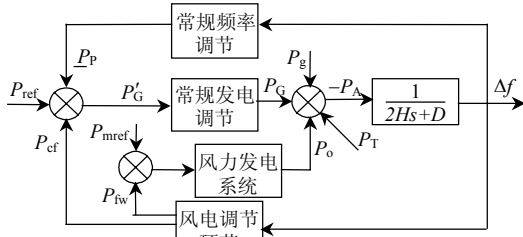


图 8 电力系统频率调节模型

Fig. 8 Power system regulation frequency model

当 $P_A \neq 0$ 时，产生频率差 Δf ，引起各发电机组通过调速系统使原动机输入功率增加或减少，使机组转速得到恢复，让系统频率稳定在允许范围之内，即为电力系统的一次调频，本文不考虑常规发电系统及常规调频环节，图中的 P_G 、 P_T 均不考虑。

从图 8 得出 P_A 和 Δf 的关系式：

$$2H \frac{d\Delta f}{dt} = P_A - D\Delta f = P_o - P_g - D\Delta f \quad (28)$$

式中 D 为系统阻尼。从图 2 可得出经风力发电频率调节得到的功率：

$$\Delta P = P_f^* - P_o^* \quad (29)$$

ΔP 和风力发电注入功率 P_o 间关系如下：

$$P_o = \Delta P + P_o^0 \quad (30)$$

式中 P_o^0 为频率变化前的风电注入功率，代入式(28)得

$$(2H + K_{df}) \frac{d\Delta f}{dt} = P_o^0 - P_o^* - P_g - (K_{pf} + D)\Delta f \quad (31)$$

P_g 包括两部分，即负荷消耗的功率 P_L 和馈入电网的功率 P 。由式(31)可知， K_{df} 取正值，系统等效惯性增加，系统能承受更大的负荷波动。若系统功率平衡， Δf 为 0，若突增负荷(视为系统的扰动)，系统的功率平衡被打破， Δf 不为 0，使风电参与电网一次调频。

3 系统的小信号线性化模型

根据第 2 节的分析，方程式(9)、(10)、(12)、(19)、

(22)、(25)、(31)构成了风力机组参与电网一次调频时的模型。将上述方程取增量形式，整理后得

$$\begin{cases} \Delta \dot{i}_{sd} = a_1 \Delta i_{sd} + a_2 \Delta i_{sq} + a_3 \Delta U_{dc} + a_4 \Delta f + a_5 \Delta U_{td} \\ \Delta \dot{i}_{sq} = a_6 \Delta i_{sd} + a_7 \Delta i_{sq} + a_8 \Delta U_{dc} + a_9 \Delta f + a_{10} \Delta U_{tq} \\ \Delta \dot{U}_{dc} = a_{11} \Delta i_{sd} + a_{12} \Delta i_q \\ \Delta \dot{i}_d = a_{13} \Delta U_{dc} + a_{14} \Delta i_d + a_{15} \Delta i_q + a_{16} \Delta \omega_m \\ \Delta \dot{i}_q = a_{17} \Delta U_{dc} + a_{18} \Delta i_d + a_{19} \Delta i_q + a_{20} \Delta \omega_m \\ \Delta \dot{\omega}_m = a_{21} \Delta i_q + a_{22} \Delta \omega_m + a_{23} \Delta \beta \\ \Delta \dot{\alpha} = a_{24} \Delta \omega_m + a_{25} \Delta \alpha + a_{26} \Delta \Phi + a_{27} \Delta \beta \\ \Delta \dot{\Phi} = a_{28} \Delta \omega_m + a_{29} \Delta \beta \\ \Delta \dot{\beta} = \Delta \alpha \\ \Delta \dot{f} = a_{30} \Delta i_{sd} + a_{31} \Delta i_q + a_{32} \Delta \omega_m + a_{33} \Delta f + a_{34} \Delta \beta \\ \Delta \dot{E}'_d = a_{35} \Delta E'_d + a_{36} \Delta E'_q + a_{37} \Delta s_0 + a_{38} \Delta f + \\ a_{39} \Delta U_{td} + a_{40} \Delta U_{tq} \\ \Delta \dot{E}'_q = a_{41} \Delta E'_d + a_{42} \Delta E'_q + a_{43} \Delta s_0 + a_{44} \Delta f + \\ a_{45} \Delta U_{td} + a_{46} \Delta U_{tq} \\ \Delta \dot{s}_0 = a_{47} \Delta E'_d + a_{48} \Delta E'_q + a_{49} \Delta s_0 + a_{50} \Delta U_{td} + a_{51} \Delta U_{tq} \end{cases} \quad (32)$$

在额定风速以下，要求系统运行于最佳功率曲线上，输出的功率在某一风速下最大，此时桨距角设为 $\beta=0^\circ$ ， λ 保持在最佳叶尖速比 λ_{opt} ，式(32)稍作改变后得

$$\begin{cases} \Delta \dot{i}_{sd} = a_1 \Delta i_{sd} + a_2 \Delta i_{sq} + a_3 \Delta U_{dc} + a_4 \Delta f + a_5 \Delta U_{td} \\ \Delta \dot{i}_{sq} = a_6 \Delta i_{sd} + a_7 \Delta i_{sq} + a_8 \Delta U_{dc} + a_9 \Delta f + a_{10} \Delta U_{tq} \\ \Delta \dot{U}_{dc} = a_{11} \Delta i_{sd} + a_{12} \Delta i_q \\ \Delta \dot{i}_d = a_{13} \Delta U_{dc} + a_{14} \Delta i_d + a_{15} \Delta i_q + a_{16} \Delta \omega_m \\ \Delta \dot{i}_q = a_{17} \Delta U_{dc} + a_{18} \Delta i_d + a_{19} \Delta i_q + a_{20} \Delta \omega_m \\ \Delta \dot{\omega}_m = a_{21} \Delta i_q + a_{22} \Delta \omega_m \\ \Delta \dot{f} = a_{23} \Delta i_{sd} + a_{24} \Delta i_q + a_{25} \Delta \omega_m + a_{26} \Delta f \\ \Delta \dot{E}'_d = a_{27} \Delta E'_d + a_{28} \Delta E'_q + a_{29} \Delta s_0 + a_{30} \Delta f + \\ a_{31} \Delta U_{td} + a_{32} \Delta U_{tq} \\ \Delta \dot{E}'_q = a_{33} \Delta E'_d + a_{34} \Delta E'_q + a_{35} \Delta s_0 + a_{36} \Delta f + \\ a_{37} \Delta U_{td} + a_{38} \Delta U_{tq} \\ \Delta \dot{s}_0 = a_{39} \Delta E'_d + a_{40} \Delta E'_q + a_{41} \Delta s_0 + a_{42} \Delta U_{td} + a_{43} \Delta U_{tq} \end{cases} \quad (33)$$

式(32)、(33)为风电参与一次调频时运行于不同风速下的小扰动线性化模型。

4 风速变化时的小扰动分析

额定风速以下，采用 MPPT 控制，分析风速在 $4 \text{ m/s} \leq v_m < 12 \text{ m/s}$ 变化时系统的小扰动稳定性。当忽略变换器自身的损耗，机侧和网侧满足

$$P_o = P_g \quad (34)$$

可认为系统处于稳态，经计算在风速为 4 m/s 时，

稳态值如下(参数见第5节,下标“0”表示稳态值):
 $\omega_{m0}=0.9 \text{ rad/s}$, $i_{d0}=0$, $i_{q0}=146.8 \text{ A}$, $U_{d0}=9.5 \text{ V}$,
 $U_{q0}=219.6 \text{ V}$, $M_1=0.366$, $\sigma_1=87.53^\circ$, $i_{sd0}=103.5 \text{ A}$,
 $i_{sq0}=0$, $u_{gd0}=311.5 \text{ V}$, $u_{gq0}=9.8 \text{ V}$, $M_2=0.519$, $\sigma_2=1.80^\circ$,
 $U_{td0}=1.23 \text{ V}$, $U_{tq0}=-14.6 \text{ V}$, $E_{d0}=-1.77 \text{ V}$, $E_{q0}=-12.6 \text{ V}$,
PMSG 电磁功率 $P_e=48.6 \text{ kW}$, $P_o=P_g=48.4 \text{ kW}$, $Q_g=1.5 \text{ kvar}$,
将上述稳态值代入式(33),可求系统的特征值。表1给出了特征值随风速变化的情况。

表1数据显示,风速改变时,第5个特征值逐渐右移,系统的稳定性有所降低,但在额定风速以下,系统均能保持小扰动稳定。

额定风速以上($12 \text{ m/s} \leq v_m \leq 25 \text{ m/s}$),随风速的增

大,风力机输出的机械功率将达到其极限值,为了保证风力发电机组的运行安全,采用恒功率控制,通过增加桨距角控制,将多余的风能除去,使其输出等于额定功率,保证风电系统安全运行;若风速进一步增加达到切除风速,风力机应停止工作。经计算在风速为 12 m/s 时,稳态值如下:
 $\omega_{m0}=2.704 \text{ rad/s}$, $\beta=6.2^\circ$, $i_{d0}=0$, $i_{q0}=1007 \text{ A}$, $U_{d0}=195.1 \text{ V}$,
 $U_{q0}=658.7 \text{ V}$, $M_1=1.145$, $\sigma_1=73.50^\circ$, $i_{sd0}=2083 \text{ A}$,
 $i_{sq0}=0$, $u_{gd0}=318.4 \text{ V}$, $u_{gq0}=196.3 \text{ V}$, $M_2=0.623$,
 $\sigma_2=31.65^\circ$, $U_{td0}=152.3 \text{ V}$, $U_{tq0}=-200.7 \text{ V}$, $E_{d0}=90.5 \text{ V}$,
 $E_{q0}=-199.6 \text{ V}$, $P_e=994.7 \text{ kW}$, $P_o=P_g=971.9 \text{ kW}$,
 $Q_g=613.2 \text{ kvar}$ 。将上述稳态值代入式(32)。表2给出了特征值随风速变化的情况,数据显示在额定风速

表1 额定风速以下风速变化时特征值的变化

Tab. 1 Eigenvalues variation when change wind speed under rated wind speed

风速 4 m/s	风速 6 m/s	风速 8 m/s	风速 9 m/s	风速 10 m/s	风速 11 m/s
-6.109+j9 420.806	-6.742+j9 446.658	-7.964+j9 496.452	-8.849+j9 532.556	-9.944+j9 577.205	-11.214+j9 629.033
-6.109-j9 420.806	-6.742-j9 446.658	-7.964-j9 496.452	-8.849-j9 532.556	-9.944-j9 577.205	-11.214-j9 629.033
-12.761+j86.843	-17.823+j90.233	-22.214+j94.644	-24.163+j97.243	-25.964+j100.062	-27.563+j103.110
-12.761-j86.843	-17.823-j90.233	-22.214-j94.644	-24.163-j97.243	-25.964-j100.062	-27.563-j103.110
-23.457	-20.088	-18.640	-16.763	-14.356	-14.225
-12.157	-13.324	-14.625	-15.698	-16.590	-17.435
-3.147	-5.156	-7.411	-9.842	-11.939	-13.839
-17.384	-18.061	-18.751	-19.453	-20.168	-20.897
-10.592	-10.592	-10.592	-10.592	-10.592	-10.592
-13.236	-13.231	-13.227	-13.218	-13.206	-13.195

表2 额定风速以上风速变化时特征值的变化

Tab. 2 Eigenvalues variation when change wind speed above rated wind speed

风速 12 m/s	风速 14 m/s	风速 15 m/s	风速 16 m/s	风速 17 m/s	风速 18 m/s
-11.244+j9 630.279	-11.245+j9 630.307	-11.245+j9 630.308	-11.245+j9 630.327	-11.245+j9 630.326	-11.245+j9 630.303
-11.244-j9 630.279	-11.245-j9 630.307	-11.245-j9 630.308	-11.245-j9 630.327	-11.245-j9 630.326	-11.245-j9 630.303
-4.465+j698.379	-15.148+j912.656	-20.677+j1 016.430	-26.428+j1 124.500	-32.459+j1 229.301	-38.939+j1 331.226
-4.465-j698.379	-15.148-j912.656	-20.677-j1 016.430	-26.428-j1 124.500	-32.459-j1 229.301	-38.939-j1 331.226
-15.465+j112.697	-15.131+j113.269	-15.099+j113.313	-14.912+j113.689	-14.922+j113.659	-15.127+j113.225
-15.465-j112.697	-15.131-j113.269	-15.099-j113.313	-14.912-j113.689	-14.922-j113.659	-15.127-j113.225
-18.701	-18.560	-18.593	-18.522	-18.528	-18.613
-3.854+j9.131	-3.898+j9.094	-3.900+j9.091	-3.932+j9.065	-3.929+j9.067	-3.893+j9.098
-3.854-j9.131	-3.898-j9.094	-3.900-j9.091	-3.932-j9.065	-3.929-j9.067	-3.893-j9.098
-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
-18.972	-19.206	-19.442	-19.679	-19.917	-20.157
-10.592	-10.592	-10.592	-10.592	-10.592	-10.592
-132.361	-132.360	-132.359	-132.358	-132.357	-132.356
风速 19 m/s	风速 20 m/s	风速 22 m/s	风速 23 m/s	风速 24 m/s	风速 25 m/s
-11.244+j9 630.322	-11.244+j9 630.274	-11.242+j9 630.210	-11.241+j9 630.132	-11.242+j9 630.223	-11.237+j9 629.985
-11.244-j9 630.322	-11.244-j9 630.274	-11.242-j9 630.210	-11.241-j9 630.132	-11.242-j9 630.223	-11.237-j9 629.985
-45.415+j1 443.014	-52.938+j1 542.544	-69.035+j1 753.240	-78.684+j1 852.542	-85.230+j1 985.250	-99.910+j2 058.668
-45.415-j1 443.014	-52.938-j1 542.544	-69.035-j1 753.240	-78.684-j1 852.542	-85.230-j1 985.250	-99.910-j2 058.668
-14.946+j113.601	-15.405+j112.659	-16.021+j111.477	-16.778+j110.135	-15.900+j111.714	-18.254+j107.801
-14.946-j113.601	-15.405-j112.659	-16.021-j111.477	-16.778-j110.135	-15.900-j111.714	-18.254-j107.801
-18.540	-18.723	-18.953	-19.215	-18.906	-19.675
-3.924+j9.072	-3.845+j9.137	-3.747+j9.219	-3.637+j9.310	-3.567+j9.202	-3.446+j9.465
-3.924-j9.072	-3.845-j9.137	-3.747-j9.219	-3.637-j9.310	-3.567-j9.202	-3.446-j9.465
-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
-20.040	-20.641	-20.885	-21.130	-21.377	-21.626
-10.592	-10.592	-10.592	-10.592	-10.592	-10.592
-132.355	-132.354	-132.353	-132.352	-132.352	-132.351

以上，系统也具有良好的稳定性。

5 仿真

通过建模仿真风速从 0 变化到 26 m/s 时的系统运行情况(仿真时间设置为 5.5 s。参数设置为：PMSG 额定容量 1 MW，定子额定电压 690 V，定子额定电流 850 A， $p=28$ ， $R_s=0.006 \Omega$ ，额定转速 2.3 rad/s， $L_d=L_q=2.56 \text{ mH}$ ， $\gamma=8.748$ ， $F=0$ ， $J=5000 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ； $U_{dc}=1200 \text{ V}$ ， $C=38 \text{ mF}$ 。线路： $L=150 \mu\text{H}$ ， $R=3.5 \text{ m}\Omega$ ，电网频率 50 Hz，电网电压 380 V。风轮机： $\rho=1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$ ， $r=30 \text{ m}$ ， $\lambda_{opt}=6.235$ ， $C_{pmax}=0.4382$ ， $T_{\beta}=0.2 \text{ s}$ ， $K_{\omega}=2$ ， $T_{\omega}=0.5 \text{ s}$ ， $H=10 \text{ s}$ ， $D=1$ 。频率环节 PI 调节器： $K_{df}=12$ ， $K_{pf}=50$ ， $K_{fp}=2$ ， $K_{gf}=5$ 。开关频率 6 kHz。 $r_1=0$ ， $x_m=0.295 \Omega$ ， $r_2=0.02 \Omega$ ， $x_2=0.12 \Omega$ ， $x_m=3.5 \Omega$ ， $T_j=2 \text{ s}$ ， $a=0.15$ ， $n=2$ ， $s_0=0.0116$ ， $K_d=0.65$)。初始风速 3.5 m/s，在 3.5 s 突增一个 300 kW 的有功负荷。控制要求：机侧电流 $i_d=0$ ，PMSG 输出有功取决于 i_q ；网侧电流 $i_{sq}=0$ ，网侧变换器工作于单位功率因数状态；直流电压调制到 1200 V，基本保持稳定不变；在额定风速以下和以上，分别能实现 MPPT 控制和恒功率控制，风速改变时系统能保持稳定；当负荷改变时风力发电能参与一次调频，改善系统的频率特性，仿真结果如图 9—21 所示。

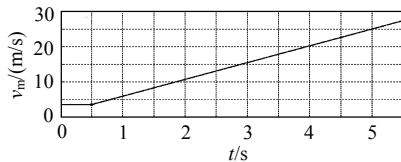


图 9 风速的变化
Fig. 9 Wind speed variation

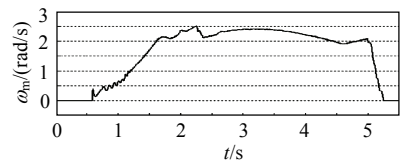


图 10 风轮机转速
Fig. 10 Wind turbine speed

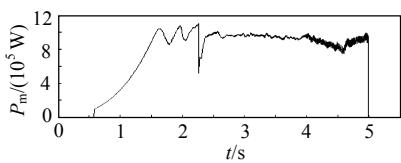


图 11 风力机输出机械功率
Fig. 11 Wind turbine output mechanical power

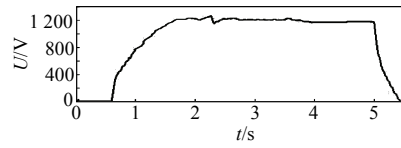


图 12 直流电压
Fig. 12 Direct voltage

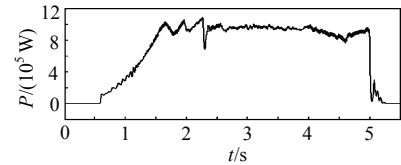


图 13 PMSG 电磁功率
Fig. 13 PMSG electromagnetic power

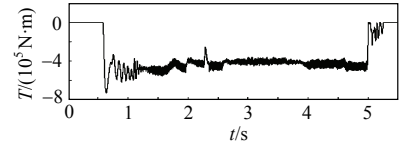


图 14 PMSG 电磁转矩
Fig. 14 PMSG electromagnetic torque

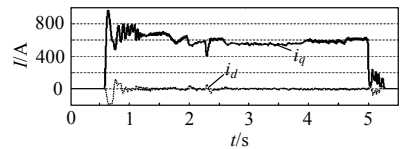


图 15 PMSG 侧 dq 轴电流
Fig. 15 PMSG side dq axis currents

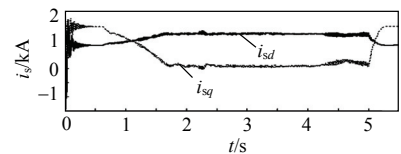


图 16 网侧 dq 轴电流
Fig. 16 Grid side dq axis currents

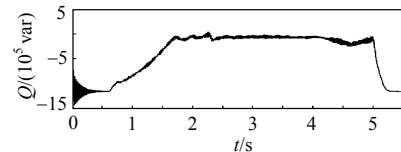


图 17 网侧无功功率
Fig. 17 Grid side reactive power

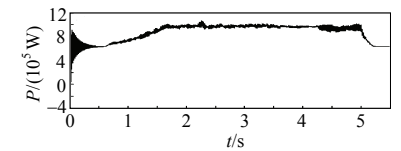


图 18 网侧有功功率
Fig. 18 Grid side active power

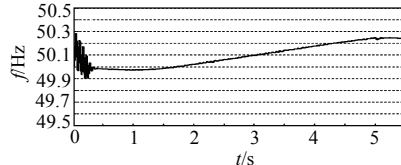


图 19 未加频率控制环节负荷不变系统的频率变化
Fig. 19 System frequency variation with no frequency control model when load keep constant

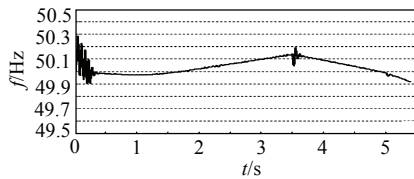


图20 未加频率控制环节突增负荷系统的频率变化
Fig. 20 System frequency variation with no frequency control model when increase load

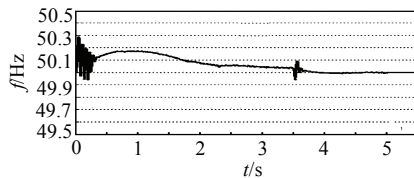


图21 加频率控制环节突增负荷系统的频率变化
Fig. 21 System frequency variation with frequency control model when increase load

$t=0.584\text{ s}$ 时, 达到切入风速 4 m/s , 风力机开始工作, 采用 MPPT 控制策略, 风力机转速、风力机和 PMSG 输出功率、直流电压随风速增大而增大, 如图 10—13 所示; $t=2.265\text{ s}$ 时达到额定风速 12 m/s , 风力机转速为 2.5 rad/s , 此时采用恒功率控制。在 2 种控制策略切换过程中, 对系统有一定的冲击, 如风力机输出机械功率、PMSG 电磁功率、电磁转矩及电流会出现短时突变, 如图 11、13—15 所示, 但系统仍能保持稳定; $t=5\text{ s}$ 达到切除风速 25 m/s , 风力机停止工作, 风力机转速、输出功率、PMSG 输出功率和 dq 轴电流、直流电压为 0。在 $12\text{ m/s} \leq v_m \leq 25\text{ m/s}$, 机侧、网侧输出功率达 1 MW ; 机侧 d 轴电流 $i_d=0$, 网侧 q 轴电流 $i_{sq}=0$, 网侧变换器工作于单位功率因数状态, 如图 15—18 所示; 网侧电流总谐波畸变率为 3.87% , 小于 5% ; 直流电压达 1200 V , 基本保持不变; 在 $t=3.5\text{ s}$ 时, 突增负荷, 系统保持稳定, 所引入的频率控制环节能有效地改善系统的频率特性, 相比未引入频率控制环节, 系统的频率变化更小, 如图 19—21 所示, 综上所述可见所设计的控制方案满足要求。

6 结论

通过理论分析和时域仿真研究发现, 所采用的 MPPT 和恒功率控制相结合的策略能保证系统在较大的风速变化范围内实现功率有效地调节控制, 并保持系统的小扰动稳定; 所引入的频率控制环节能够使风电有效地参与电网的一次调频控制, 较好地改善系统的频率特性, 为直驱永磁型风电系统安全、有效地并网运行提供了一些可借鉴的理论方法。

参考文献

- [1] Juan M M, Alejandro M, Antonio G. Frequency regulation contribution through variable speed wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 24(1): 173-181.
- [2] 冯学敏, 林礼清, 温步瀛. 双馈风电机组参与系统辅助频率控制的仿真[J]. 电力与电工, 2009, 29(3): 9-15.
Feng Xuemin, Lin Liqing, Wen Buying. Simulation of double-fed wind generation participating in auxiliary frequency control [J]. Electric Power and Electrical Engineering, 2009, 29(3): 9-15(in Chinese).
- [3] Rogerio G, Pecas J A. Primary frequency control participation provided by doubly fed induction wind generators[C]//Proceedings of IEEE the 15th Power Systems Computation Conference. Liege: IEEE, 2005: 22-26.
- [4] Rogerio G, Pecas J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 944-951.
- [5] Khaki B, Asgari M H, Sirjan R. Contribution of DFIG wind turbines to system frequency control[C]//Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing, China: Hohai University, 2009: 1-8.
- [6] Ramtharan G, Ekanayake J B, Jenkins N. Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1): 3-9.
- [7] 尹明, 李庚银, 张建成. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-66.
Yin Ming, Li Gengyin, Zhang Jiancheng. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 61-66(in Chinese).
- [8] 赵仁德, 王永军, 张加胜. 永磁式直驱同步风力发电系统最大功率跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 106-112.
Zhao Rende, Wang Yongjun, Zhang Jiasheng. Maximum power point tracking control of the wind energy generation system with direct-driven permanent magnet synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 106-112(in Chinese).
- [9] James F C, Rick W. Frequency response capability of full converter wind turbine generators in comparison to conventional generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 649-657.
- [10] Janaka E, Nick J. Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 800-803.
- [11] Johan M, Sjoerd W H, Wil L K. Wind turbines emulating inertia and support primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 433-434.
- [12] Alan M, Mark O M. The inertia response of induction machine based wind turbine[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1496-1504.
- [13] Ia M, Janaka E. Frequency response from wind turbines[C]//44th International Universities Power Engineering Conference. Glasgow, Scotland: IEEE, 2009: 1-5.
- [14] Johan M, Jan P, Sjoerd W H. Inertia response of variable speed wind turbine[J]. Electric Power System Research, 2006(76): 980-987.

- [15] Gillian L, Alan M, Mark O M. Frequency control and wind turbine technologies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1905-1914.
- [16] Nayeem R U, Torbjorn T, Daniel K. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines potential and application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 601-613.
- [17] Rogerio A, Edgardo D C, Pecas J A. Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 718-726.
- [18] 郭金东, 赵栋利, 林资旭. 兆瓦级变速恒频风力发电机组控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 1-6.
Guo Jindong, Zhao Dongli, Lin Zixu. Research of the megawatt level variable speed constant frequency wind power unit control system[J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27(6): 1-6(in Chinese).
- [19] 张强, 张崇巍, 张兴. 风力发电用大功率双向逆变器研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 55-60.
Zhang Qiang, Zhang Chongwei, Zhang Xing. Study on gird-connected inverter used in high-power wind generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 55-60(in Chinese).
- [20] 贺广零. 风力发电机组风场模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(29): 108-112.
He Guangling. Wind field simulation of the wind turbine system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(20): 108-112(in Chinese).



李军军

收稿日期: 2010-11-16。

作者简介:

李军军(1976), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为分布式发电, lijunjun8181972@sina.com;

吴政球(1963), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、新能源并网及电力市场。

(责任编辑 谷子)