

大型双馈异步风力发电机组变桨控制算法研究

丁艳军

(许昌许继新能源控制系统公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 变桨控制系统^[1]是变速恒频风力发电机组的重要组成部分,它不仅关系到大型 MW 级风机的安全运行,而且对风能的吸收具有较好的控制作用。其中变桨控制算法是其控制系统的核心部分,为减小整机机械载荷、风机功率的稳定输出做出重要贡献。基于 2.0 MW 双馈风力发电系统的基础上,提出了具有转差二阶陷波滤波器的增益调度-双 PI(notch filter gain-schedule double PI)控制算法,对风机运行于额定风速以上的变桨控制策略^[2],使风机能够以最佳的速率变桨到最佳桨距角位置,从而输出稳定的功率,减小整机的振动,减小风机在 3P、6P 处产生过大的振动。最后对 2.0 MW 双馈异步风机变桨控制进行仿真和实际监控图分析,结果表明,其控制算法具有良好控制效果。

关键词: 变桨控制; 增益调度; PI 控制; 双馈异步; 陷波滤波器

Abstract: Pitch control system is an important part of the variable speed constant frequency (VSCF) wind power generators. It is not only related to the safe operation of large MW grade wind generators, and also to the better control effect on the absorption of wind power. The pitch control algorithm is the core part of the control system, which makes an important contribution to the reduction of the mechanical load and the stability of the power output. Based on 2.0 MW double-fed wind power systems, gain scheduling-double PI(notch filter gain-schedule double PI) control algorithm with second-order notch filter is proposed, which makes wind generators in the best rate to reach the best position for the pitch control strategy in which the wind generator is operating above the rated wind velocity. This algorithm is able to output the stable power and reduce the vibration of the whole machine. Finally, the simulation and practical monitoring diagram analyses for the pitch control of 2.0 MW double-fed induction generators are carried out. The results show that the proposed control algorithm has good control effect.

Key words: pitch control; gain scheduling; PI control; double-fed induction generator; notch filter

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)06-0080-06

0 引言

在大型双馈异步风力发电机组中,由于变桨距风力发电机组与定桨距风力发电机组相比,具有在额定功率点以上输出功率平稳的优点,因此当前世界上主流机型为变桨距控制的大型并网式风力发电机,中国风电机组正由定桨距型向变桨距型过渡。因此对风力发电机的变桨距控制及变桨距原理的研究是必要的也是紧迫的。

当风速达到或超过额定风速后,风力发电机组进入额定功率状态,在传统的变桨距控制方式中,这时将转速控制切换至功率控制,变桨距系统开始根据发电机的功率信号进行控制。控制信号的给定值是恒定的,即额定功率。功率反馈信号与给定值进行比较,当功率超过额定功率时,桨叶桨距就向迎风

面积减小的方向转动一个角度,反之则向迎风面积增大的方向转动一个角度。然而这种方法不能快速反映发电机转速变化情况,容易导致发电机转速上升,对风机安全造成影响。因此提出了基于发电机转速的具有二阶陷波滤波器的增益调度-双 PI(notch filter gain-schedule double PI)控制算法,此算法对发电机转速的干扰起到较好的滤波作用,并且对于转速的波动具有快速平稳调节作用,保障风机安全运行。

1 变桨距角的调节原理^[3]

风力机吸收风能产生的输出功率为

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi C_p R^2 V^3 \quad (1)$$

式中, P 为输出功率; C_p 为风能利用系数; ρ 为空气

密度; R 为风轮半径; V 为风轮正面风速。

风力机将风能转化^[4]为机械能传递给负载,机械能表达式为

$$P_m = T\omega = P \quad (2)$$

式中, P_m 为机械能; T 为风力机扭矩, ω 为风力机角速度。这里的风力机扭矩 T 是由负载决定的, 这样由式(1), 式(2)得出

$$\omega = \frac{1}{2} \rho \pi C_p R^2 V^3 / T$$

当风力机处于一定的风速 V 下, 对于一定的负载, ρ 、 π 、 R 是常数。那么转速就取决于风能利用系数 C_p 的大小, 即 $\omega \propto C_p$ 。

根据叶素特性理论, 分析风轮起动后以某种速度稳定旋转时叶片的受力情况, 从而得出理想情况下气流与叶片角的关系为

$$I = i + \beta, \tan I = \frac{V}{\omega r} = \frac{1}{\lambda}$$

其中, i 为攻角; β 为桨距角; I 为倾角; λ 为叶尖速比。

根据力的平衡关系, 叶片的扭矩为

$$T = \frac{1}{2} \rho C_m R V^3 A \quad (3)$$

$$C_m = \frac{C_L \left(\sin I - \frac{1}{C_L/C_D} \cos I \right)}{\sin^2 I}$$

式中, C_m 为扭矩系数; A 为风轮的扫掠面积; R 为风轮半径; V 为叶片的相对风速。由式(3)可得

$$\frac{1}{2} \rho C_p R^2 V^3 = \frac{1}{2} \rho C_m R V^2 A \omega \quad (4)$$

所以有

$$C_p = C_m \frac{R\omega}{V} = C_m \lambda_0, \lambda_0 \text{ 为叶尖速比。}$$

可见 C_p 正比于 C_m , 所以当攻角 i 增大时风能利用系数 C_p 增大; 反之, 当攻角 i 减小时风能利用系数就减小。当风速与风力机负载一定时, 当攻角 i 增大, C_p 增大, 风力机转速增大; 反之, 当攻角 i 减小, C_p 减小, 风力机转速减小。再由式 $I = i + \beta$ 知, i 增大, β 将减小, i 减小, β 将增大。为了直观起见, 通常用桨距角 β 来表示上述关系, 当桨距角 β 增大时, 风力机转速下降, 当桨距角 β 减小时, 风力机转速增加。

又定义桨距为 $H = 2\pi r \tan \beta$

所以通过改变桨距角 β 就改变了桨距 H , 也可

以改变风力机的转速 ω , 这就是风力机变桨距的调节原理。

图1是变速风力发电机控制运行原理^[5]。

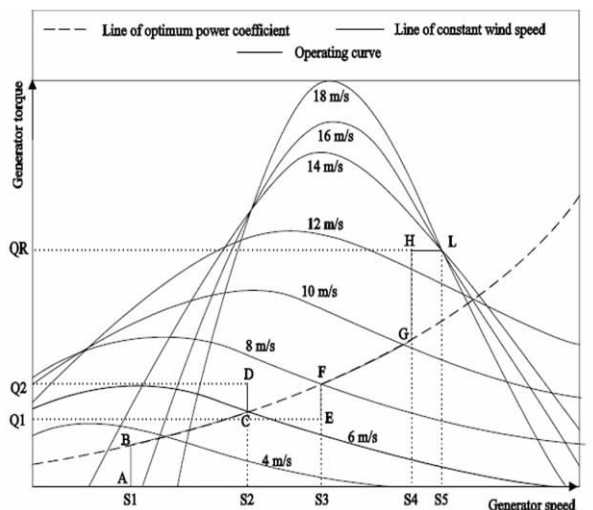


图1 变速变桨距调节运行曲线

图1是变桨距调节运行曲线, 横坐标为发电机转速(generator speed), 纵轴是加入的发电机转矩(generator torque)。反映风机在运行时发电机根据转速、转矩的风机分别在各个阶段的运行曲线^[5]。

稳态运行参数如下。

(1) 低于额定转速时, 也即从点A到H。

(2) 在额定转速以上, 叶片桨距被调节到并保持在所选定的由L标明的运行点。一旦在H点达到额定扭矩, 在所有更高的风速中, 扭矩需求量保持常数, 并由桨距控制来调节叶轮的转速。在点H(此处扭矩达到最大值)与(此处开始桨距控制)L之间允许有一小段余量, 以防在低于和高于额定扭矩的控制模式之间作过度频繁的模式切换。

2 基于2.0 MW双馈风机变桨控制的算法

基于双馈风力发电系统的基础上, 使用具有转速二阶陷波滤波器的增益调度-双PI控制算法。二阶陷波滤波器可以抑制塔筒的3p、6p振动频率, 防止引起共振。带增益调度-双PI控制器对于不同的风速引起不同的变桨角度, 使叶片在不同桨距角使用不同的变桨速率, 使发电机转速平稳运行。

2.1 变桨控制结构图

图2为所提出的双馈异步风力发电机组的变桨

控制结构图,采用具有转速二阶陷波滤波器的增益调度-双PI控制算法。发电机实时测量转速经过二阶陷波滤波器后通过变桨调度表(pitch-schedule)非线性处理,输入给双PI控制器。PI控制器给定输入为发电机转速实际值与给定转速的差值。将桨距角通过增益调度技术(gain-schedule)后加入PI控制器的参数 k_p 中,得到需求的变桨角度。

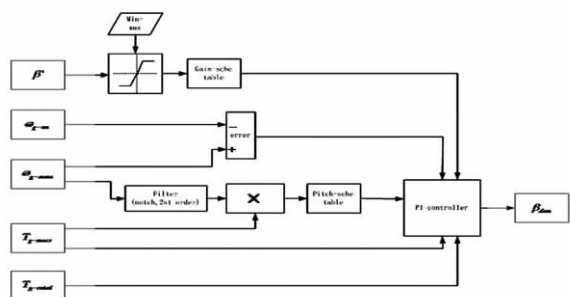


图2 变桨控制结构图

2.2 二阶陷波滤波器

二阶滤波器对发电机转速滤波,增加了系统的衰减,避免塔筒的振动和转速的快速变化。

二阶滤波器的传递函数如下。

$$G(s) = \frac{s^2 + \omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2}$$

其中, ω 为滤波器的固有频率; ξ 为衰减系数。

固有频率 ω 的取值应当与驱动器频率接近;衰减系数 ξ 反应滤波器的宽度和强度, ξ 应增大直到对目标频率产生明显的滤波效果。

2.3 二阶驱动滤波器的仿真效果

其传递函数如下。

$$G(s) = \frac{s^2 + \omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (5)$$

利用 Matlab 求出式(5)的幅频特性曲线如图3。

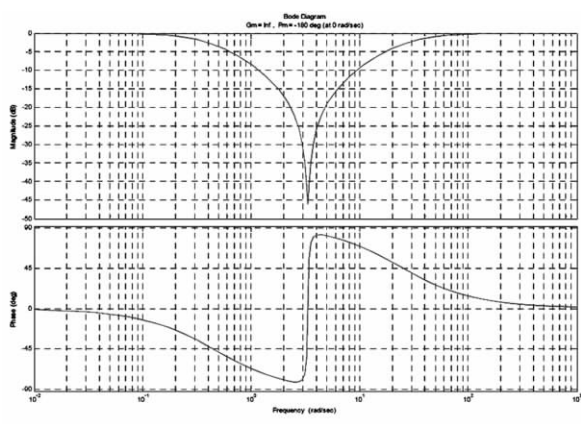


图3 二阶陷波滤波器的幅频特性曲线

$$G(s) = (s^2 + \omega^2) / (s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)$$

3 变桨的双PI控制算法^[7]

目前,变桨距风机的桨距角多以PID控制方法,PID具有控制技术成熟、结构简单、易于工程实现等特点。模糊控制、神经网络控制等先进的智能控制技术可以解决系统非线性、多干扰、切换鲁棒性等问题,但实用性上还有待实际验证,目前处于研究阶段。把微分项确定为零,采用PI结合增益调度技术控制是基于桨距角控制的基本思路。

3.1 PI控制算法

大型风力发电机组的桨距角不仅需要满足限制范围的要求,还应满足变桨距速率的要求。在满足控制性能指标的基础上,适当放宽变桨距速率可以节省变桨距驱动设备的投资。图4描述了PI变桨距控制技术。

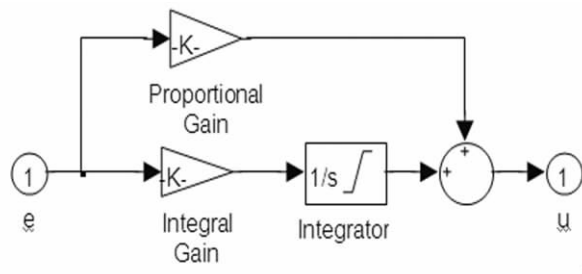


图4 PI变桨距控制技术

在控制系统中,调节器最常用的控制规律是PID控制。所谓PID控制,就是指根据系统偏差 $e(t) = r(t) - c(t)$ 的比例P、积分I、微分D环节,通过线性组合构成控制量对控制对象进行的控制。实际的运行经验和理论分析都表明,PID控制器具有结构简单、稳定性好、可靠性高等优点,因此在变桨距控制系统中使用的比较广泛。常规PID控制系统原理框图如图5所示。

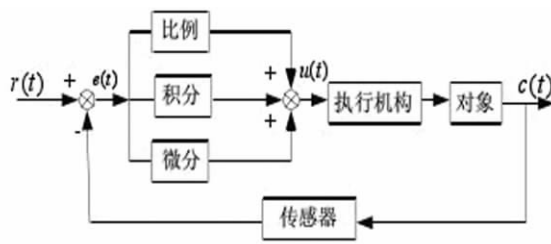


图5 PID控制系统原理框图

PID调节器的控制规律为

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (6)$$

式中, K_p 为比例系数; T_I 为积分时间常数; T_D 为微分时间常数。简单来说, PID 调节器各校正环节的作用如下。

(1) 比例环节即时成比例地反应控制系统的偏差信号 $e(t)$, 偏差一旦产生, 调节器立即产生控制作用以减小偏差。

(2) 积分环节主要用于消除静差, 提高系统的无偏差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_I , T_I 越大, 积分作用越弱, 反之越强。

(3) 微分环节能反应偏差信号的变化趋势(变化速率), 并能在偏差信号的值变得太大之前在系统中引入一个有效的早期修正信号, 从而加快系统的动作速度, 减少调节时间。

PID 控制器的传递函数为

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (7)$$

3.2 变桨双 PI 控制算法

双馈异步发电机组变桨的双 PI 控制如图 6。

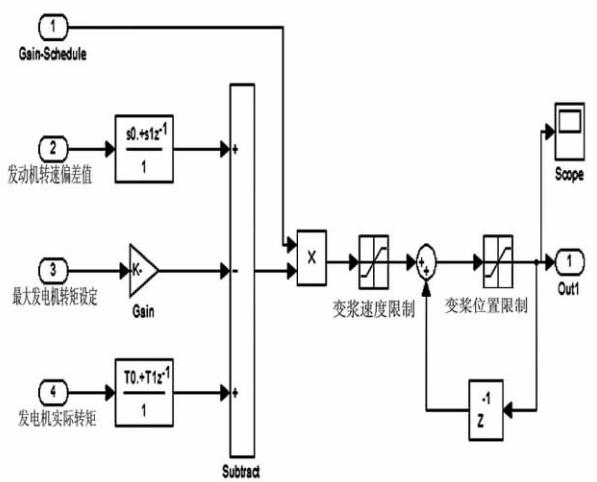


图 6 变桨的双 PI 控制图

取 $K_p = 0.037$, $K_i = 0.18$, 如图 7 为输入为 PI 输入曲线, 通过 PI 控制后得到图 8 的曲线。

4 Gain - schedule 控制思想

增益调度技术广泛地应用于实际的工程项目中, 这种技术与一族线性时变控制器及一种算法相联系, 当工作点进行计算时, 将会改变控制器使之应用到模型中去。线性变参数增益调度模型可以用如下方程组进行描述。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\theta(t))x(t) + B(\theta(t))\omega(t) \\ \dot{z}(t) = C(\theta(t))x(t) + D(\theta(t))\omega(t) \end{cases} \quad (8)$$

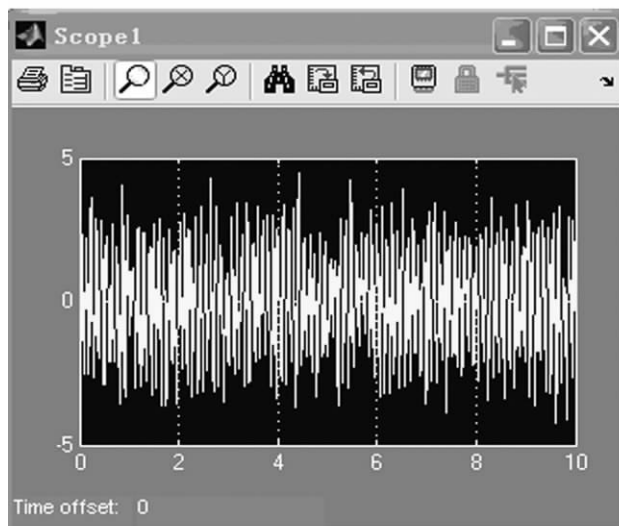


图 7 输入为 PI 输入曲线图

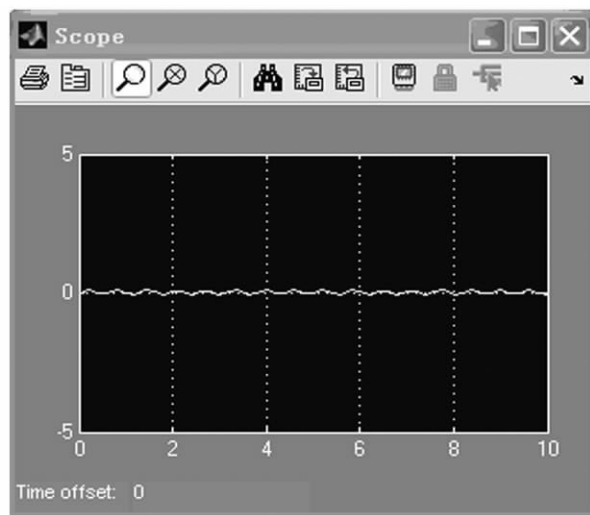


图 8 PI 控制效果图

式中, $A(\cdot)$ 、 $B(\cdot)$ 、 $C(\cdot)$ 、 $D(\cdot)$ 为时变参数在有界集 Θ 中取值时向量 $\theta(t)$ 的连续函数。对于任意给定的角度 $\theta(t)$, 线性变参数增益调度模型都将衰变为一个 LTV 模型, 当 $\theta(t)$ 取常数时, LPV 模型实际为 LTI 模型。对一组平衡点附近的工作点进行线性化是从一个非线性系统中获取 LPV 模型最常用的方法, 这种方法通常应用于 LPV 模型控制策略, 同时也应用于经典增益调度技术中。

对桨距角测量作为 $\theta(t)$ 向量, 对变桨角度的变化为参变量, 增益值从起始角度为 5° , 终止角度为 25° 的桨距角做增益线性化改变。使变桨控制器的 PI 参数具有可变性, 对风机处于不同的桨距角位置, 控制参数线性的改变, 具有较好的变桨控制效果。

5 Matlab 总体实现框图及实际截图的分析

取发电机转速的给定值为 1 800 r/min, 实际转速函数为 $1\,800 + 10 \sin(\omega t)$ 加入 Simulink 中自带的高斯噪声函数为输入的发电机转速。如图 9 Scope1 所示。

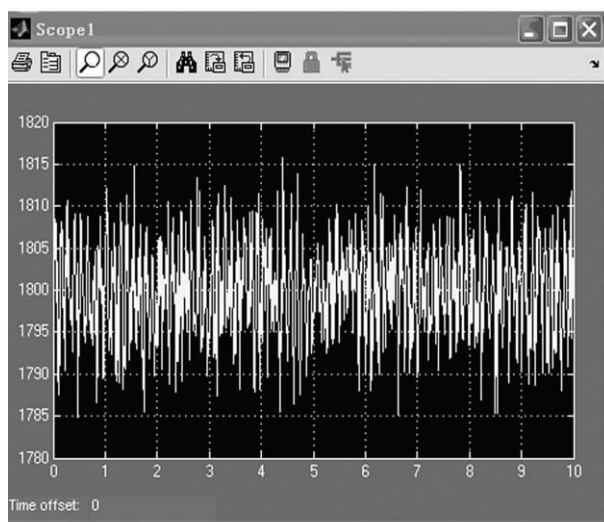


图 9 输入发电机转速

利用所提的控制算法得到图 10 Scope 变桨角度, 可以看出变桨角度控制较为平缓稳定。

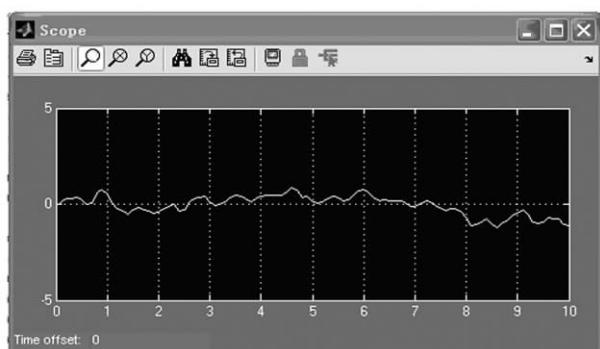


图 10 风机变桨角度

下面是在 2.0 MW 双馈异步风机运行中采用所提控制算法得到的实际截图。图 11 为实际风速 - 发电机转速 - 功率运行曲线, 绿色曲线为风速变化曲线且平均风速在 11 m/s 以上, 蓝色曲线为发电机转速变化曲线并且维持在额定转速附近工作, 红色曲线为功率输出曲线且维持恒定功率处运行。图 12 为桨叶角运行曲线, 红色曲线为采用变桨控制算法得到的变桨运行曲线。图 13 为风机振动曲线, 振动值小于 0.2。

从实际运行图可以看出: 使用具有转速二阶陷

波滤波器的增益调度 - 双 PI 控制算法, 对风机运行于额定风速以上的变桨控制策略, 风机能够以最佳的速率变桨到最佳桨距角位置, 从而输出稳定的功率, 减小整机的振动, 减小风机在 3P、6P 处产生过大的振动。所以, 所提的变桨控制算法具有较优越的控制效果。

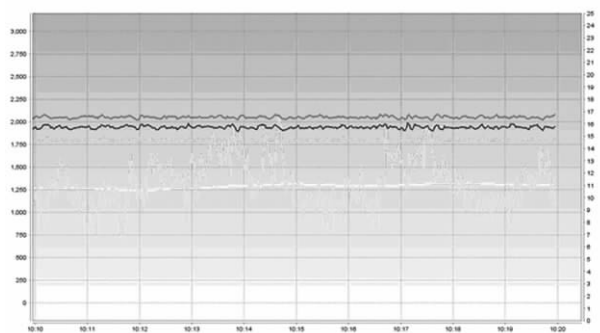


图 11 实际风速 - 发电机转速 - 功率运行曲线

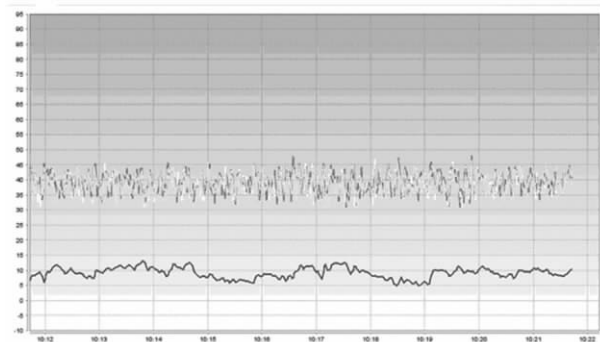


图 12 桨叶角运行曲线

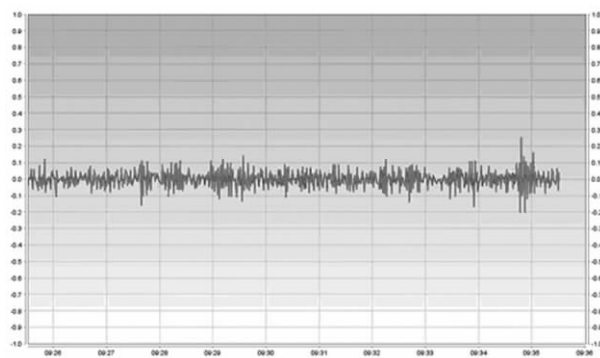


图 13 风机振动曲线

6 结 语

采用所提的控制算法, 能够使风机变桨控制比较平稳, 并以最佳的速率变桨到最佳桨距角位置, 从而使输出稳定的功率, 减小整机的振动, 减小风机在 3P、6P 处产生过大的振动。所采用的变桨控制算法具有很好的实际应用效果。

参考文献

- [1] N. Horiuchi, T. Kawahito. Torque and Power Limitations of Variable Speed Wind Turbines Using Pitch Control and Generator Power Control. IEEE, 2001.
- [2] Yousif EI - Tous. . Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine. American J. of Engineering and Applied Sciences, 2008.
- [3] Olimpo Anaya - lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Wind Energy Generation Modelling and Control [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] 叶杭冶. 风力发电机组控制技术 [M]. 北京: 机械工业

出版社, 2006.

- [5] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究 [J]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [6] Lulian Munteanu, Luliana Bratcu, Nicolaos - Antonio Cutululis, et al. Optimal Control of Wind Energy Systems [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [7] 樊国平. 智能 PID 控制系统的设计与研究 [J]. 杭州: 浙江工业大学, 2005.

作者简介:

丁艳军, 男, 工程师, 研究方向为风力发电机组控制系统。

(收稿日期: 2012 - 04 - 13)

(上接第 67 页)

同温度、不同电场强度下环氧材料中的空间电荷分布; 分析了温度、电场强度、加压时间等因素对环氧材料中空间电荷特性的影响; 并进一步研究了环氧材料玻璃化转变前后的空间电荷特性。主要得到以下结论。

(1) 环氧材料中的空间电荷分布受到温度及外施电场的影响。温度对环氧中空间电荷的影响较大。当温度与环氧的玻璃化转变温度(T_g) 相比, 处于不同状态(低于 T_g 、接近于 T_g 、高于 T_g) 时, 环氧材料中的空间电荷分布呈现出较大区别。环氧材料中的空间电荷量随温度升高而增大; 特别是当温度为 80 °C 时, 空间电荷量明显增大。

2) 环氧材料中异极性电荷的出现主要是由于材料中的水分等挥发性杂质, 以及固化过程中形成的其他杂质电离在玻璃化转变温度附近迁移而造成的。当温度高于环氧树脂的玻璃化转变温度时, 材料中出现大量的空间电荷, 说明环氧树脂由玻璃态向高弹态的转变更有利于空间电荷的形成。

参考文献

- [1] 王德中. 环氧树脂生产与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] T. Iizuka and H. Takai. Effect of Temperature and Water Salinity on Hydrophobicity of Epoxy Resin [C]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1997, 1: 41 - 44.
- [3] D. Fabiani, G. C. Montanari, A. Dardano, G. Guastavino, L. Testa and M. Sangermano. Space Charge Dynam-

ics in Nanostructured Epoxy Resin [C]. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP) , 2008: 710 - 713.

- [4] J. C. Fothergill. Space Charge in Dielectrics: Old Theories and New Measurements [C]. Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, 2000: 1 - 8.
- [5] Hole, S. Sylvestre, A. Guillermin, C. Rain and P. Rowe, S. Space Charge Measurements on Filled Epoxy [J].
- [6] 王霞, 吴超一, 何华琴, 等. 茂金属聚乙烯改性低密度聚乙烯中空间电荷机理的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7) : 158 - 162.
- [7] 王霞, 成霞, 陈少卿, 等. 纳米 ZnO/ 聚乙烯复合材料的介电特性 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19) : 13 - 19.
- [8] Montanari GC, Ghinello I. Space Charge and Electrical Conduction - current Measurements for the Inference of Electrical Degradation Threshold [J]. Vide Science, Technique et Applications, 1998, (287, suppl. issue) : 302 - 311.
- [9] Mazzanti G, Montanari GC, Alison JM. A Space - charge Based Method for the Estimation of Apparent Mobility and Trap Depth as Markers for Insulation Degradation - theoretical Basis and Experimental Validation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10 (2) : 187 - 197.

作者简介:

王青山(1975) , 男, 工程师, 现任四川省电力公司内江电业局东兴供电局副局长。

(收稿日期: 2012 - 07 - 12)