

文章编号: 1000-8152(2004)06-0864-06

## 绿色能源与生态环境控制

吴捷<sup>1</sup>, 杨俊华<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090)

**摘要:** 控制技术的发展和运用紧密联系着社会的进步和需求, 不可再生的化石能源的日益短缺和环境污染, 使人们越来越重视开发利用各类可再生的绿色能源和生态环境保护建设. 文章研究分析了能源状况与可持续发展问题, 通过研究风力发电、太阳能光伏发电系统, 提出若干关键控制问题与对策. 作为应用实例, 文中给出一个利用 CAN 总线对风力-太阳能混合电站、温室进行监控与能量管理, 从而构成一个环保、节能、和谐生态环境的混合电站.

**关键词:** 绿色能源; 生态环境; 混合电站

**中图分类号:** TK614, TK615 **文献标识码:** A

## Control on green energy source and ecologic environment

WU Jie<sup>1</sup>, YANG Jun-hua<sup>1,2</sup>

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangdong Guangzhou, 510641, China;

2. Automation College, Guangdong University of Technology, Guangdong Guangzhou, 510090, China)

**Abstract:** The development and utilization of control strategies are closely linked with progress and requirement of society. All sorts of renewable green energy sources and ecologic environment construction become more and more be paid attention to, as for fossil energy resources become shortage day by day as well as environmental pollution. This paper researches and analyzes energy sources status and sustainable development problem. Some key control projects and strategies were raised through studying wind energy conversion system and solar PV system. As an example, a hybrid generation station was constructed for environmental protection, energy conservation and harmonious ecologic environment. CAN bus technology was applied to monitor and control the wind-solar PV hybrid electric station and greenhouse as well as energy management.

**Key words:** green energy source; ecologic environment; hybrid electric station

### 1 能源形势与可持续发展 (Energy sources status and sustainable development)

能源, 是人类生存的基本要素, 也是国民经济发展的主要物质基础, 能源安全则是国家经济安全的基本支撑\*.

随着国际工业化的进程, 全球未来能源消耗预计仍将以 3% 的速度增长, 常规能源资源面临日益枯竭的窘境. 上世纪 70 年代中期, 世界能源发生危机, 石油价格剧烈上涨, 极大的刺激了那些能源消耗大国, 使他们把研究开发其他能源放到了重要位置. 而自去年以美军进攻中东产油大国伊拉克为标志, 新一轮波及全球的能源危机也正深刻影响着各国间的经济、政治、军事关系.

高速发展的经济、能源使用的低效率, 使我国的能源形势更趋严峻, 尽管 2003 年创造了 9.1% 的 GDP 增长率, 但却消耗了全球 30% 的能源和原材

料, 创造的 GDP 也仅占世界的 4%, 一味追求经济增长速度使生态环境更加不堪重负.

从能源发展战略来看, 人类必须寻求一条可持续发展的能源道路. 而且随着经济的发展, 生活水平的提高, 人们越来越重视所生存、居住环境的改善, 环境保护意识不断增强, 迫切需要一些清洁、无污染、可再生的新能源. 开发和利用可再生能源已成为人类解决生存问题的战略选择. 实际上, 相比较煤炭、石油等化石燃料能源, 更多其他能源形式如水能、太阳能、风能等, 蕴藏着比它们大得多的能量储备. 理论上讲, 整个地球在十天内所吸收到的太阳能刚好等于世界上全部化石燃料的能量储备总和<sup>[1]</sup>. 地球的风能利用率的上限估计为  $1.3 \times 10^{11}$  kW, 作为一个潜在的能源, 显然又要比  $2.9 \times 10^9$  kW 的水力大得多. 资料表明, 1998 年就全球而论, 可利用风能比总消耗的电能大 4 倍<sup>[2]</sup>. 气象学家估计: 地球所

接收的太阳能中大概有 1% 转换成了风能. 据 80 年代末有关资料统计, 只需地面风能的 1% (也即太阳能的 0.01%), 就能满足全球当时的能源需要<sup>[1,3]</sup>. 可以预见, 21 世纪的能源结构将发生根本变化, 以化石燃料为主体的传统能源将逐步被太阳能、风能、生物质能、核聚变等其它新能源所替代. 目前, 全球消耗的 12 万亿瓦能源约 85% 来自于矿物燃料, 为延缓全球气候变暖, 到本世纪中叶实现全球初级能源无二氧化碳排放, 届时替代能源的产量是现有全球能源消耗的 3 倍. 世界各国为此都在制订能源发展战略, 欧盟提出 2050 年可再生能源将占发电总量的 50%.

1992 年后, 我国政府提出环境与发展措施, 明确要“因地制宜开发和推广太阳能、风能、地热能、潮汐能、生物质能等清洁能源”, 并为此制订了“乘风计划”、“光明工程”等风能、太阳能开发应用项目与计划<sup>[4]</sup>. 但由于资金投入不足, 我国可再生能源的发展速度十分缓慢, 截止到 2003 年底, 风电装机容量仅为 567 MW<sup>[5,6]</sup>, 而太阳能光伏技术生产能力约为 4.5 MW, 远远落后于发达国家<sup>[7]</sup>, 如风电累计装机容量世界第一的德国达到了 14609 MW. 为此, 国家发改委提出到 2020 年, 我国风电装机容量为 30000 MW, 约占未来国内发电总装机容量的 2%.

本世纪将是可再生能源和新能源逐渐替代常规能源唱主角的时代. 国际能源机构预测, 到 2060 年全球新能源和可再生能源的比例, 将发展到世界能源构成的 50% 以上. 近 4 年来, 全球风力发电年均增长率高达 65%, 太阳能超过 30%, 甚至超过了信息技术产业的发展速度.

## 2 风力发电及其控制技术 (Wind energy conversion system and control method)

在目前众多可再生能源与新能源技术开发中, 发展最成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景、最具竞争力、潜力最大的就是风力发电. 但由于风能存在间歇性、随机性, 发电质量受风速、风向变化的影响很大. 风能利用上的困难, 使得风力发电系统在技术和管理上都出现了一些特殊问题, 风力发电成为一个不可控能源. 实际上, 风能转换系统所发出的电能, 若不加以控制, 并不具备太大的商业使用价值, 若直接并入电网, 则是对电网的一种污染——绝大多数情况下, 只对电网的谐波有贡献, 而且会影响局部电网运行的稳定性. 近年来由于控制技术、电力电子技术及新材料技术的飞速发展和广泛应用, 为风能的利用创造了有利条件, 风力发电技术也得

到了长足的发展. 为使风电成为一种优质、高效、可控的能源, 风力发电的控制项目和目标通常有很多: 变桨距控制 (风能最大捕获)、变速恒频控制、偏航控制、刹车控制等, 但目前亟待解决的两个核心问题是: 风能的捕获以提高风能转换效率、以及改善电能质量问题. 控制方法从最简单的 PID 到更为复杂的现代控制方法: 智能控制、最优控制、自适应控制、变结构控制、H<sub>∞</sub> 鲁棒控制、微分几何等等<sup>[2,8]</sup>. 图 1 是一个基于 CAN 总线的风电场监控系统框图.

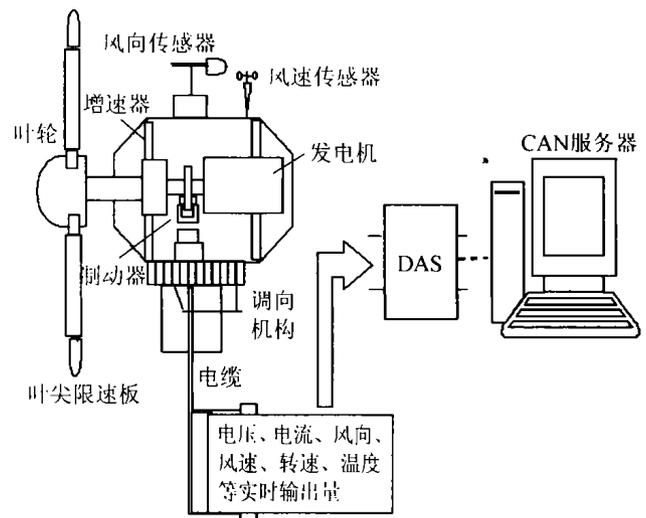


图 1 风力发电机组监控系统

Fig. 1 Monitoring and control of wind turbine

基于通常的无穷大电网的假定, 为避开储能问题并考虑到运行的稳定性、可靠性、发电成本等因素, 目前普遍采用鼠笼型三相异步发电机构成风力发电机组, 也即只要让异步电机的转子转速超过同步转速, 异步电机即进入异步发电状态, 简单、实用, 稳定可靠, 基本是一类恒速机组. 机组通常配备有三相电流、电压、风速、风向、转速、振动、温度等十多种传感器. 近年来由于海上风电场的兴起, 逐步采用较为先进的交流励磁变速恒频双馈异步发电机组, 所配备的传感器多达 60 多种, 如美国的 GE 公司生产的 1.5 MW 双馈发电机.

### 2.1 风能最大捕获控制 (Control of maximum power point tracking)

根据空气动力学中的贝兹 (Betz) 理论, 一台实际风力机所捕获的风能可转变为机械输出功率  $P_m$  的表达式为

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

这里,  $\rho$  为空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $R$  为风轮的半径 (m),  $V$  为风速 (m/s),  $C_p$  为风能利用系数.

由上式可知: ①若风速  $V = \text{常数}$ , 则  $P_m$  与风轮

半径  $R^2$  成正比,即为获得较大的输出功率,风轮机要有尽可能大的半径,也即尽可能大的风轮叶片扫掠面积.但大尺寸的风轮势必导致叶轮成本增加,而且安装难度加刁.②若风轮半径  $R = \text{常数}$ ,  $P \propto V^3$ ,于是要求风力发电机组要尽可能安装在高风速的地域,这则与自然条件有关.同一位置,高度越高,风速越大,要求塔架应有一定的高度.③风轮功率与风轮叶片数无关,但与空气密度成正比.④较大的风能利用系数  $C_p$ ,可提高风轮功率.

风能利用系数  $C_p$  不是一个常数,理论上其最大值为 0.593,也称为 Betz 极限,它随风速、风力机转速以及风力机叶片参数(如桨距角  $\beta$  等)而变化,通常,  $C_p = C_p(\beta, \lambda)$ ,这里,  $\lambda$  定义为叶尖速比:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2)$$

式中,  $\omega$  为风轮旋转角速度.

图 2 绘出了风能利用系数与叶尖速比之间的关系曲线,通常水平轴风轮机的风能利用系数  $C_p = 0.2 \sim 0.5$ ,垂直轴  $C_p = 0.3 \sim 0.4$ .

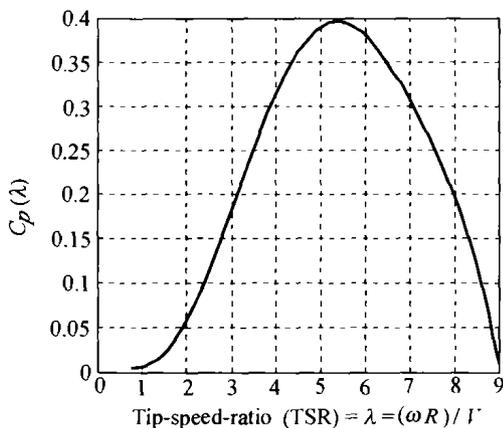


图 2  $C_p$  与  $\lambda$  的关系

Fig. 2 Power coefficient

风力机的整体设计与运行控制策略在保证安全运行的同时应尽可能追求  $C_p$  在整个运行范围内始终保持最大,以产生尽可能大的输出功率.由公式(1)可知风电机组的输出功率是风速的立方函数,即风速越大,机组输出电功率越大,然而,实际系统中存在两个限制:一是电气回路中各电气装置及元件的最大功率限制,二是风力机组的各转动部件尤其是风轮,存在一个转速上限.于是风力机有三种典型的运行状态:①低风速段实行变速运行,可保持一个恒定的  $C_p$  值(尽可能大,最好达到 Betz 极限值),根据风速变化控制风力机转速,使叶尖速比  $\lambda$  不变,直到转速达到极限;②转速达到极限后,风速进一步加大时,按恒定转速控制风力机运行,直到输

出最大功率,此时的风能利用系数  $C_p$  不一定是最大值;③超过额定风速时,输出功率达到极限,按恒功率输出调节风力机.图 3 绘出了这三种典型的运行状态.图 4 则给出了某台风力发电机阻最大风能捕获控制曲线.

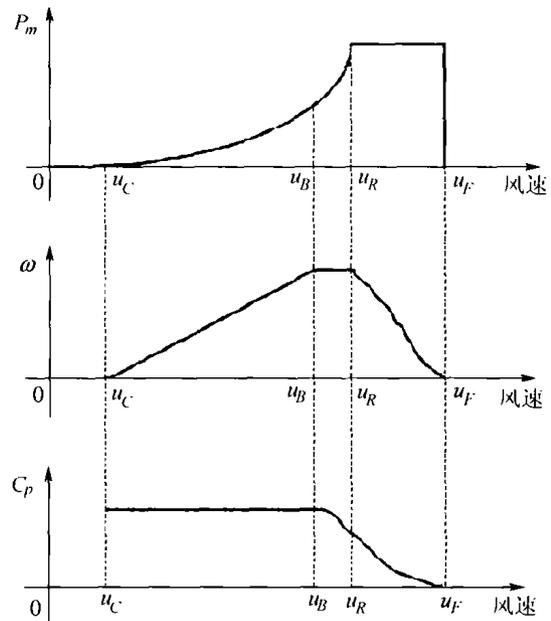


图 3 风力机三种典型运行状态

Fig. 3 The three operation modes of wind turbine

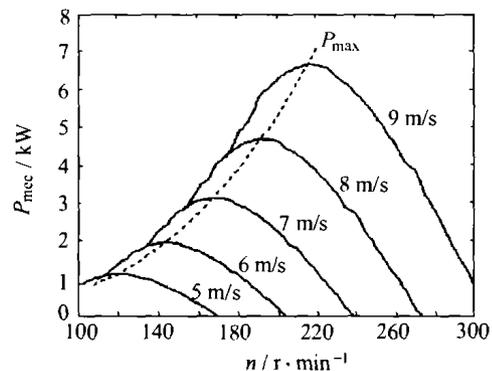


图 4 风力发电机组最大风能捕获控制曲线

Fig. 4 Power versus speed characteristics

## 2.2 变速恒频发电控制 (Control of variable speed constant frequency generation)

众所周知,由于风能的随机性、阵风性、不确定性,导致风电机组所输出电功率的频率、电压均随风速而变,这种电能除了可用来供给电热器具等对电能要求不高的电气装置外,没有太大的使用价值,必须对这种电能品质进行控制和整定,常用方法有:恒速恒频、变速恒频、变速变频控制.变速恒频方法不但可以控制电能品质,而且可以最大限度地捕获风能,通过解耦控制,可实现有功、无功功率的独立调节,抑制谐波,减小损耗.常用的变速恒频风力发电

控制方案有:鼠笼式异步发电机系统,交流励磁双馈发电机系统,无刷双馈发电机系统,永磁发电机系统.双馈电机因其配套电力电子设备仅在控制回路中起作用,设备容量一般不超过风能转换系统输出功率的30%,大大降低了设备造价,是一类具有良好发展前景的风能转换方式.无刷双馈电机,又进一步去掉了易磨损的滑环、电刷,提高了风能转换系统的可靠性.

通过变速恒频发电控制,可高质量地将风能转化为频率恒定、电压恒定的交流电能,使风力发电机组不受限制地并网发电.

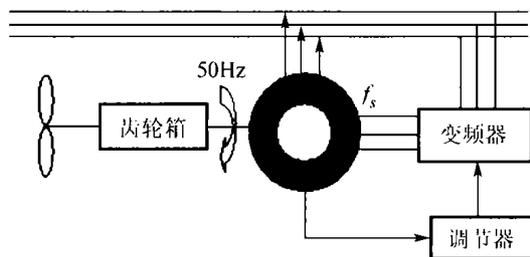


图5 交流励磁双馈发电机示意图  
Fig. 5 Doubly-fed generator

化石能源的日益枯竭,使世界各国日益重视可再生能源的开发和利用,各类风力发电机组层出不穷,风力发电系统的发展呈现两大趋势:一方面开发单机容量越来越大的大型风电机组,另一方面开发分散式小型、微型风力发电系统.大型化的风电设备可降低风力发电的成本,分散式风力发电系统则可解决边远分散地区就地供电问题,省去投资庞大且很难有经济效益的供电网络的规划与建设.

### 3 太阳能发电控制技术(Control of solar PV station)

#### 3.1 太阳能发电形式(solar PV generation)

太阳能光伏发电是太阳能利用的重要方式,也是我国重点提倡开发利用的绿色能源.特别是我国西部地区、人口分散、经济落后,无电户很多,而太阳能利用条件却得天独厚,随着国家西部开发政策的推行及“光明工程”的实施,太阳能光伏发电技术取得了较快发展.目前我国光伏发电市场需求旺盛,光伏电池销售量平均增长率在30%以上,2000年光伏产品保有量已达到15MW,主要应用于通信、铁路、电视、气象、航运、阴极保护等方面;户用光伏系统及独立光伏电站也取得了很大发展.根据发展改革委、科技部制定的太阳能资源开发计划,“光明工程”计划到2005年全国光伏发电系统总装机容量达到300MW.世界银行于2001年启动全球环境基金项目,

计划5年内为我国农村安装10MW的光伏用电系统<sup>[4,7]</sup>.

太阳能发电包括光伏发电和太阳能大型热电厂.太阳能光伏发电:转换效率约为10%~20%;分结晶系膜式与非结晶系膜式.结晶系膜式又分为单结晶型与多结晶型.太阳能热电厂:槽式太阳能发电,转换效率已可达15%,西班牙2004年将建造一座欧洲最大的槽式热电站.

除此之外,还有其他形式如塔式发电等.

#### 3.2 太阳能光伏发电控制技术(Control of solar PV station)

1) 太阳轨迹跟踪控制,实现太阳能最大输入功率捕获.

2) 太阳能电池阵列最大输出功率控制(MPPT),通常采用优化搜索算法.

3) 太阳能逆变器并联与并联控制.

4) 风-光互补系统.

上述风力、太阳能基本控制均属底层单元控制,要构成一个优化运行的风力-太阳能混合发电系统,上层需有能量管理系统,并配有蓄电池组.图6是一个较为典型的混合发电系统示意图.

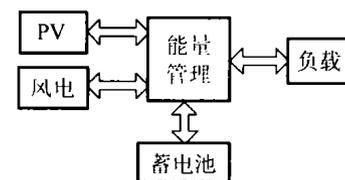


图6 混合发电系统示意图  
Fig. 6 Hybrid electric station

### 4 生态环境控制(Control on ecologic environment)

研究表明:环境污染中与建筑业有关的污染占34%,且50%的耗能用于建筑的构造与使用.研究可持续发展的生态工业,包括生态住宅和温室,成为人类追求的生活目标之一.

#### 4.1 生态环境控制(Control on ecologic environment)

运用生态学原理,遵循生态平衡及可持续发展原则,控制物质能源在建筑系统内有秩序地循环转换,将住宅建造成一个小的生态系统,获得一种高效、低耗、低废料、低污染的智能化生态住宅环境,如图7.

具体措施:

1) 水的循环利用控制,雨水搜集系统.

2) 开发可再生能源:太阳能与建筑物的统一集成(建筑一体化:BIPV),风能,自然温差.

- 3) 使用新型节能,环保材料,室内空气质量监测.
- 4) 充分利用气候环境特点,最大限度利用自然采光和通风,减少能耗.
- 5) 环境绿化,垃圾处理.



图7 一个典型的生态住宅照片  
Fig. 7 A typical ecologic residence

#### 4.2 温室的计算机控制系统(Computer control system of greenhouse)

完整的温室环境控制系统包括传感器,控制器及执行机构,一般采用分布式计算机控制.控制系统的主要功能(图8)为:

- 1) 记录作物生长全过程中,室内生态环境状况和控制状态,为生态环境优化模型提供依据.
- 2) 依照生长优化模型,制定最优控制策略.
- 3) 根据控制策略调节加热,灌溉或通风.

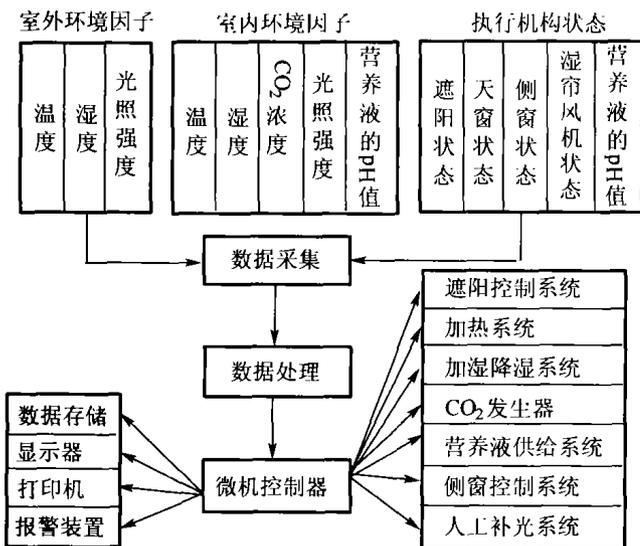


图8 温室控制系统框图  
Fig. 8 Control system of greenhouse

#### 4.3 温室的建模与控制 (Modelling and control of greenhouse)

温室是现代化农业的重要标志之一,对温室环境的建模与控制始于20世纪60年代.

温室模型的表达式:

$$\dot{T}_g = f(T_a, T_p, q_s, T_g) + g(T_a, u, Q, e_g, T_g).$$

式中:  $f$  为参数确定的部分;  $g$  为参数时变的非线性部分;  $T_g$  为温室空气温度;  $T_p$  为加热器温度;  $q_s$  为太阳光热辐射能量;  $T_a$  为室外温度;  $Q$  为太阳光照射角;  $u$  为外界风速.

##### 4.3.1 温室的建模方法 (Modelling methods of greenhouse)

- 1) 基于热能量平衡的建模,将机理分析与系统辨识结合起来加以建模.
- 2) 基于专家系统的建模,吸取农业专家的经验.
- 3) 基于模糊神经网络的建模,采用遗传算法对网络参数进行训练.

##### 4.3.2 温室自适应控制系统 (Adaptive control system of greenhouse)

由于外界环境因素如辐射、或室外温度、湿度、风速等,使温室的环境模型参数发生变化,因而常规的计算机控制往往不能保证控制质量,需要采用更高级的控制策略,如自适应控制,图9是一个典型的温室自适应控制供热系统.

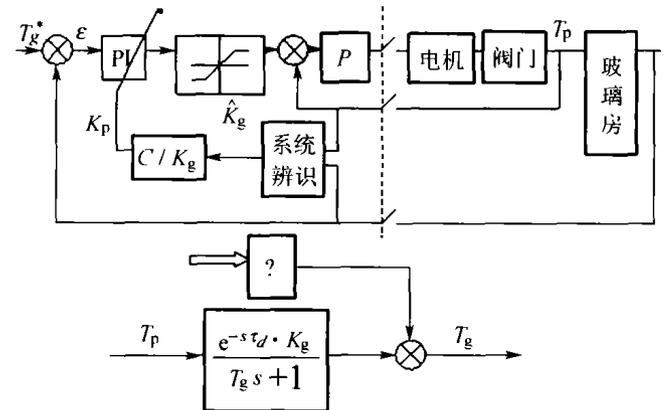


图9 温室自适应控制供热系统  
Fig. 9 Adaptive control system of greenhouse heating

#### 4.4 基于现场总线的混合发电与生态环境控制系统 (Control system of hybrid electric station and ecologic environment based on CAN bus)

现场总线技术是计算机技术、网络通信技术与控制技术的融合和集成,利用CAN总线对风力-太阳能混合电站、温室进行监控与能量管理,可构成一个环保、节能、和谐的生态环境.作为一个应用实例,华南理工大学新能源研究中心在楼顶铺设了10kW的太阳能电池阵列,与3台风力发电机组(一台1kW水平轴,一台2kW垂直轴,一台2kW水平轴)及蓄电池阵列,共同构成一个15kW的混合发电系统,建造了60m<sup>2</sup>的温室,整个系统采用现场总线技术,见图10.



图 10 华南理工大学新能源研究中心图片

Fig. 10 Research center of renewable energy source of SCUT

## 5 结束语(Conclusion)

常规能源资源的日益枯竭,使风能、太阳能为代表的绿色可再生能源的研究、开发和利用提上日程,如欧盟 15 个成员国 2010 年的总目标是再生能源在电力中的比例达到 22%。

运用生态学原理,遵循生态平衡及可持续发展和系统综合效率最优原则,控制物质能源在建筑系统内有秩序地循环转换,将住宅建造成一个小的生态系统,获得一种高效、低耗、低废料、低污染的智能生态住宅环境,这也是时代的要求。

绿色能源和生态环境控制问题正在不断为我们提出新的研究课题。

欣逢《控制理论与应用》创刊 20 周年,谨以此文表示纪念与祝贺。

## 参考文献(References):

- [1] FRERIS L L. *Wind Energy Conversion System* [M]. London: Prentice Hall, 1994.
- [2] 崔金泰,杜波.新世纪能源展望[J].国外科技动态,2000,(368):19-21.  
(CUI Jintai, DU Bo. Energy source prospects for the new century[J]. *Trends of Overseas Technology*, 2000, (368):19-21.)
- [3] 杨俊华,吴捷,杨金明,等.现代控制技术在风能转换系统中的应用[J].太阳能学报,2004,25(4):530-541.  
(YANG Junhua, WU Jie, YANG Jinming, et al. Applications of modern control techniques in wind energy conversion system [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2004, 25(4):530-541.)
- [4] 范维唐.能源现状与发展趋势[J].山西能源与节能,2004,(34):1-3.  
(FAN Weitang. Present status and development trend of energy source [J]. *Shanxi Energy Source and Energy Conservation*, 2004, (34):1-3.)
- [5] 王晓蓉,王伟胜,戴慧珠.我国风力发电现状和展望[J].中国电力,2004,37(1):81-84.  
(WANG Xiaorong, WANG Weisheng, DAI Huizhu. Present status and prospect of wind power in China [J]. *Electric Power*, 2004, 37(1):81-84.)
- [6] 包耳.风力发电技术的发展现状[J].可再生能源,2004,(114):53-55.  
(BAO Er. Current situation of development of wind power generation technology [J]. *Renewable Energy*, 2004, (114):53-55.)
- [7] 杨维菊,沙晓冬.国外太阳能光电技术应用[J].华中建筑,2004,3,22(3):77-79.  
(YANG Weiju, SHA Xiaodong. Application of Technology of BIPV overseas [J]. *Central China Architectural*, 2004, (3):77-79.)
- [8] 叶杭冶.风力发电机组的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2002.  
(YE Hangye. *Control Techniques in Wind Energy Conversion System* [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.)