

可再生能源中的控制与电力电子技术

吴捷¹ 杨金明¹ 杨俊华^{1,2}

(1. 华南理工大学, 广州, 510641; 2. 广东工业大学, 广州, 510095)

摘要: 控制与电力电子技术的发展和应用紧密联系着社会的进步与需求, 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各类可再生的绿色能源和生态环境工程。文章叙述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、风光互补发电、电力电子装置建模与控制, 提出若干关键控制问题与对策, 以期引起能源与控制工作者的关注, 为后续现代控制与电力电子技术在新能源领域的系统化研究开辟崭新的途径。

关键词: 可再生能源 风力发电 太阳能光伏电站 风光互补发电 矩阵变换器

Control of Renewable Energy Source and Power Electronics

WU Jie¹ YANG Jinming¹ YANG Junhua^{1,2}

(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 and power electronics are closely linked with progress and requirement. All sorts of renewable green energy sources and ecologic environment engineering 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 recounts energy sources status and sustainable development problem. Through studying wind energy conversion system, solar PV system, wind-PV hybrid generation station, power electronics device and control, some key control projects and strategies were raised. We hope energy and control researchers to followed with interest these problems. A new way will be started for system research in new energy area with modern control technique and power electronics technique.

Key Words: green energy source; wind turbine; PV station; wind-PV hybrid generation; matrix converter

1 能源形势与可持续发展

能源,是人类生存的基本要素,也是国民经济和社会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。能源短缺,尤其优质能源短缺,始终困扰着经济高速发展的中国,越来越成为制约我国经济发展的瓶颈。目前我国能源生产总量居世界第三,能源消费总量及温室气体排放仅次于美国位居世界第二。

2005年2月28日,第十届全国人大常委会第十四次会议正式通过了《中华人民共和国可再生能源法》,将可再生能源的开发利用列为能源发展的优先领域,从而奠定了我国可再生能源事业规划与发展的法律基础^{*}。通常,石油、天然气、煤炭等化石类能源称为一次性能源,不可再生,其开采、

运输、储存、使用过程中存在不同程度的大气、环境污染及生态破坏,已严重危害人类的生存环境。而太阳能、风能、水能、海洋能、生物质能、地热能等非化石类能源均属于过程性能源,不仅可以再生,且清洁无污染或低污染,蕴藏量巨大。

相对其它能源形式,石油属一类不可再生的优质能源。2004年我国石油总需求约2.8亿吨,其中进口约1.2亿吨,相当于两个半大庆油田的年产量,仅价格上涨因素就多支付近90亿元。实际上,随着经济的快速发展,我国已成为世界第二大能源消费国,能源消费量约占世界的11%,石油对外依存度超过40%。近年来国际油价的不断上涨,石油领域的竞争远远超出纯商业的范围,成为世界大国经济、军事、政治斗争的武器。世界排名前20位的西方大型国际石油跨国公司占有了全球已探明优质石油储量的81%,直接导致国际石油市场垄断的加剧,而且他们仍在继续凭借经济实力加紧

^{*} 粤港关键领域重点突破项目(2004A10506003)
广东省自然科学基金资助项目(020906)

抢占更多最重要的石油产地,中国的石油安全有受制于人的潜在威胁。实际上,为解决日益增长的能源需求,1993年,中国就开始了海外寻找石油的漫长征程,足迹遍及非洲、拉美、中东,截至2004年11月份,中国已与27个国家开展了石油开发的合作。

2004年,我国的能源总产量相当于17亿吨标准煤,其中煤炭占67%,石油22.7%,其余来自水电等,而美国能源消费中煤炭仅占12%,欧洲发达国家更少至5%。长期以煤炭为主的能源结构,使我国SO₂、CO₂、烟尘、固体废物的排放始终位于世界前列,其直接后果就是大气、水污染,造成地区甚至区域性的生态环境破坏。预计到2020年,我国能源消费将会达到30亿吨标准煤,如果维持年产40亿吨的开采量,目前已探明的煤炭储量仅能开采30年;当2050年我国达到中等发达国家水平时,能源消费需45~52亿吨标准煤,相当于目前世界能源消费总量的60%,世界上没有任何一种能源能够满足这种规模的能源需求。何况我国油气资源不足、天然铀资源短缺、水电资源分布不均衡。2004年我国的GDP达到13.65万亿元,但同时超过20多个省市自治区出现了不同程度的电力短缺,万元GDP能耗为世界平均水平的2.3倍。大力开发利用可再生能源,实现能源的可持续发展,功在当代、利在千秋,是改变我国当前极不合理的能源消费结构的必由之路。不少专家指出,解决我国能源短缺的根本出路在于发展可再生能源。

实际上,我国的可再生能源储量十分可观,技术可开发的水电资源达3.78亿千瓦时;大部分地区的年日照时间在2000小时以上;我国海岸线漫长,潮汐能资源达2亿千瓦时;每年可作为能源使用的秸秆达3亿吨以上。风能陆地理论可开发总量(10m高度)为32亿kW,实际可开发装机容量约2.53亿kW,仅次于美国和俄罗斯,居世界第3位,是我国目前发电总量的1.3倍,海上可开发的风能资源达7.5亿kW,具商业化、规模化发展的潜力。截止到2004年底,我国累计风电装机容量达到764MW,位居第十,太阳能电池累计安装0.065GWp。我国计划2020年风电装机容量突破2000万kW,太阳能电池累计安装达到10GWp,保守估计每年的风电建设市场容量至少保持在70亿元以上。

可持续发展发展的目的是发展,关键是可持续性。开发和利用以太阳能、风能为代表的各类可再

生能源已成为人类解决生存问题的战略选择,也成为欧美发达国家最具创新能力和技术诀窍的经济领域之一。安装一台容量为1MW的风力发电机,每年可少排2000吨CO₂、10吨SO₂、6吨NO₂。

全球可实际利用风能十分可观,比地球上可开发利用的水能总量还要大10倍。截止到2004年底,全球累计风电装机容量已达47616MW,德国、西班牙、美国各以16628.8MW、8263MW、6740MW的装机容量位居世界前三名。另据统计,风电规模每增加一倍其电价就下降30%。预计15年之后欧洲人口的一半将会使用风电,可望在2020年风能发电能够满足欧洲居民的全部用电需求。德国的风电设备制造业已经取代汽车制造业和造船业。

全球的太阳能潜在资源120000TW,实际可开采600TW,这是唯一能够保证人类未来能源需求的能量来源。太阳能利用包括光伏发电、太阳能热发电、太阳能热水器、太阳房等利用方式,其中太阳能热水器已经实现大规模商业化生产和利用。截止到2003年底,全球太阳能热水器保有量约为1.2亿m²,其中中国约占40%;光伏发电累计装机3.15GWp;太阳能热发电累计装机50万kWp。截止到2004年底时,全球太阳能电池的累计安装量已达3.99GWp,日本以1.2GWp安装量位居世界第一。预计2030年全球太阳能电池的累计安装量将会达到920GWp,日本将达205GWp。太阳能电池转换效率也会由目前的6~38.9%上升到18~50%。

2 风力发电中的若干关键技术

2.1 风力发电机组的建模

风力发电机组是一个复杂的非线性对象,既要考虑空气动力学的问题,也要考虑机电能量转换过程。风速、转速、转矩、电压、电流、功率传递,各个物理量相互耦合、相互影响,建立精确的动态数学模型并非易事。考虑因素越多,系统阶次越高,而且由于各种被考虑因素的动态响应相差很大,最后可能得到的是一个发散的病态模型。如何得到一个合理、适用、易于设计控制器的风电机组简化模型,是目前风力发电中仍未得到妥善解决的研究课题。

从能量转换的过程来看,可将风电机组分为三部分:风力机:将风能转化为机械能,理论最大转换效率59.3%;发电机:将机械能转换为电能;并网装置:将发电机产生的电能馈送到电网。

对风力机进行机械特性建模时,主要是考虑力的平衡关系,任意复杂的风力机系统都可以采用以

下的运动方程式来表示：

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F(t, \dot{x}, \ddot{x}, \dots) \quad (1)$$

式中，[M]—系统的转动惯量矩阵，[C]—系统的阻尼系数矩阵，[K]—传动系统的刚度矩阵，F—合力(驱动力)向量矩阵，这些矩阵都是时变的。建立以上系统运动方程所采用的方法主要有模态分析法和有限叶素理论法：模态分析法能够减少风力发电机组建模后的自由度，因此得到广泛应用；随着计算机的发展，数字处理的能力大大加强，有限叶素理论也受到了人们广泛的重视。

风力发电机组分为自治系统与并网运行两大类，自治系统又分为独立运行系统与互补运行系统，并网运行也分为单机并网与多机并网。

为研究独立运行风力发电系统的特性，最早采用的建模方法是机理分析法，主要原理是从风力机系统内部的结构入手，对各环节的机理模型进行单独分析，选择适当的模型结构来模拟系统的特性，然后综合起来，得到风力机整机的机理模型。图1是为建立独立运行的风力机的模型所采用的结构框图，主要考虑的是机电平衡关系，可化为以下的矢量表达式：

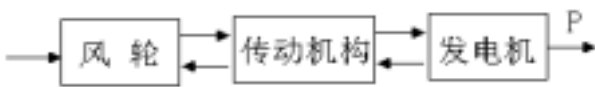


图1 风力发电机组的结构框图

$$\begin{cases} \dot{x} = [A]x + f(x, u) + [B]u \\ y = g(x, u) \end{cases} \quad (2)$$

式中，[A]、[B]—系统线性项的时变矩阵，f(x,u)—包含系统非线性的矢量，y—系统输出。

采用机理分析法建立的模型虽能反映系统动态过程的物理本质，但由于风力机系统的复杂性，在建立风力机的确定性部分的模型时，往往会忽略某些相对次要的因素，这种忽略有时是为了使建立的模型易于控制，有时则是因为对系统某方面的动态行为不够了解，被忽略的因素以不确定的形式来描述，因此机理模型往往与实际有一定偏差。风力机的不确定性因素主要来自以下几个方面：传感器和执行机构中的测量噪声、调节机构的动态特性、非线性元件以及系统未知的起始条件等。于是出现了试验测试法模型，即利用实验数据，通过系统辨识的方法来得到风力机的模型。实验测试法建模分为两类：一是被建模系统的某些特征可用系统的可

测输出与输入间的关系来描述，即系统辨识方法，另一是被建模系统的输出可观测，但其输入却难以定义或难以测量，即为随机建模或者时间序列建模方法。基于时间序列法建立的模型主要有：自回归(AR)模型、滑动平均(MA)模型、自回归滑动平均(ARMA)模型以及 Box-Jen-kins。由于风力机系统的复杂性，针对不同的输入可以对系统采用不同的建模方法。

由试验测试法得到的功能模型比机理模型更能精确地描述系统的动态特性，建模过程简单，更容易应用于自适应控制系统以及其他的随机控制系统。但建立后的模型用数学公式掩盖了物理本质，模型的参数没有明确的物理意义。随着现代系统辨识理论的发展，出现了“灰箱”建模方法(即将机理式建模方法与测试法建模的方法结合起来)，此方法被证明是一种很好的建模方法。

风光、风柴、风水等各类互补发电系统的建模同样可采用上述方法。

并网型风力发电机组的建模，主要基于能量平衡关系，并考虑并网条件，通常可以化为以下的矢量表达式：

$$\begin{cases} p\Delta x = A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y = C\Delta x \end{cases} \quad (3)$$

式中，p—微分算子，A、B、C—系统物理参数构成的矩阵，x，u—系统电压电流等物理量增量构成的向量，u—系统输入，y—系统输出。

风力发电机组中的发电机模型和通常的电机建模方法并无不同，一般分为相坐标模型、转子坐标模型、同步坐标模型和混合坐标模型。

2.2 电能质量监测与评估

风速、风向的随机性、不确定性，导致风电机组所输出电功率的频率、电压均随风况而变。目前广泛采用的异步发电机并网发电方式，几乎没有如何控制手段以保证电能质量。为向电网提供恒定频率的电能，不可避免的引入电力电子变换装置，大功率开关器件的普遍采用使得电能含有大量的谐波，加上不均匀负载带来的三相不平衡、功率因数下降和电压失稳等问题，上述种种情况，严重恶化了电能质量。目前国内风电场还没有一套完善的电能质量检测系统及评估方法，例如谐波、闪变、电压稳定性等，更没有形成对整个风电场电能指标进行监测的集中监

测网。

为使电能质量各项计算指标能够正确反映风力发电的质量,应将随机干扰等非周期性波形和不需要分析的高次谐波过滤掉。在信号经过 A/D 变换之前加一个低通滤波器,过滤掉高于 1/2 倍采样频率的高频谐波分量,可避免谐波分析中出现混迭现象。

2.3 变速恒频控制

目前我国风电场基本都是采用并网型异步风力发电机组,运行方式是不加控制的直接并网运行,风速风向变化时很容易对电网形成冲击、注入谐波、造成污染,甚至影响局部电网运行的稳定性。解决这一问题的最终方案是采用变速恒频控制,即当风速改变引起风轮转速变化时,仍能保证输出电能频率恒定。技术上有两类实现方法:一是将发电机输出电能通过整流、逆变变换成要求频率的电能(交-直-交方式),然而由于电力变流装置处于主功率通道,其容量一般为发电机容量的 1.1~1.3 倍,功率大、成本高,尤其对于大型风力发电机组实现起来并不实际。另一类方法是由风力发电机本体入手,改变电机结构形式,结合发电机和电力变流装置,利用控制方法来实现(交-交方式),此时电力变流装置处于控制通道,其容量可大大减少,实现的可能性大大提高。目前的变速恒频控制研究多集中在绕线式交流励磁双馈风力发电机(有刷双馈发电机),已有较成熟的工程应用。而采用更为先进的无刷双馈发电机作为风力发电主流机型,则是未来风电产业追求的目标(图 2)。

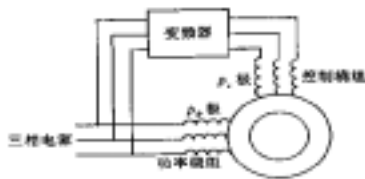


图 2 无刷双馈发电机原理图

对无刷双馈电机,功率绕组输出频率为:

$$f_p = \frac{(p_p + p_c)n}{60} \mp f_c \quad (4)$$

式中 f_p , p_p , f_c , p_c 分别为发电机功率绕组及控制绕组频率、极对数,因此当转速 n 改变时,只要相应改变控制绕组频率 f_c ,就可保证 f_p 为常数。

交流励磁变速恒频发电技术涉及到功率变换器的控制,要求功率变换器能够四象限运行,实现

的关键在于寻求一种输入/输出特性好、无电力谐波、功率可双向流动的“绿色”变频器。

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。

2.4 风力机模拟系统

风力机系统的控制非常复杂,要提高其控制性能,进行风力发电技术的研究,最理想的实验方法是将发电机与风机直接相连,在现场做实验。但是这样的实验既耗时间又昂贵。例如做不同的风力机实验就必须找来相应的风力机。于是人们提出了风力机风轮模拟装置,以便大部分的实验可以在实验室里完成。

风力机模拟就是模拟风力机的机械特性,模拟器按照给定风轮的转矩、转速以及风速的关系输出机械功率。某一风速下,转矩能随风速的突变而突变,而转速则根据其动态特性变化,因此涉及转矩和转速的关系及其动态响应两方面的问题:一方面要快速产生与瞬间风况相应的转矩,另一方面转速变化要与实际风轮一致。目前提出的大部分模拟方法均基于直流电机的电流控制方法,该方法根据风力机风轮的转矩特性控制直流电机的转矩,只可模拟静态的一种风轮转矩特性。另一种模拟系统比前一种方法增加了一套齿轮箱,但模拟不同风轮时变更齿轮箱的变速比。

更为先进的方法,不是直接模拟风轮的输出气动转矩,而是模拟其加速度。在模拟装置中用一台直接转矩控制的异步电动机作原动机,如果负载和风速不变,在实际风力机系统和模拟系统中,他们在相同的转速下具有相同的加速度,那么模拟系统就可以达到模拟了风力机特性的目的。

此外,也可以采用模型参考控制的方式,即将风力机的动态特性表征为一个参考模型,利用模型跟随控制方式加以实现。

2.5 最大风能捕获控制

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:

$$P_m = \frac{1}{2} \pi \rho C_p R^2 V^3 \quad (5)$$

这里: ρ ——空气密度 kg/m^3 , R ——风轮的半径

m , V ——风速 m/s , C_p ——风能利用系数。

由上式可知：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，而且安装难度加大。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，要求塔架应用一定的高度。风轮功率与风轮叶片数无关，但与空气密度成正比，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（如桨距角等）而变化，通常， $C_p = C_p(\lambda, \beta)$ ，这里， λ 定义为：叶尖速比：

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (6)$$

式中： ω ——风轮旋转角速度。

根据风力发电机的工作特性，其风能利用系数是叶尖速比的非线性函数，对应于不同的风速，均存在某一相应的风轮转速下的极大值，为实现最大风能捕获，风力机需根据风速实时调节转速，以跟踪功率曲线最大值。

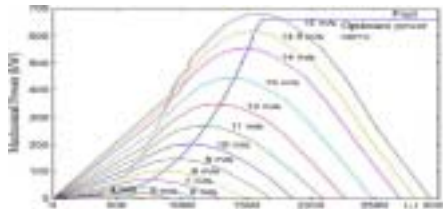


图 3 风力发电机组最大风能捕获控制曲线

目前的风力发电机组实现变速控制的手段有变桨矩式和变速运行式，变桨矩风力机通过在叶片上设置可由液压或电动系统驱动的一小部分活动叶片来实现变气动力矩的控制，变速控制通过电力变流技术实现电机电磁转矩的调节来达到控制转速的目的。鉴于变桨矩方式在叶片造价及液压或电力传动系统方面的复杂性，采用上世纪末国内外竞相研制的无刷双馈发电机组，结合控制技术和电力电子技术的变速方式成为实现风能最大捕获控制的一个发展趋势。

风能最大捕获控制除涉及到空气动力学外，还与发电机组、电力变流装置及其控制密切相关。

无刷双馈电机具有可靠的无刷结构、多种运行

模式及良好的运行性能，近些年来，对无刷双馈电机的研究主要集中在美国、英国、澳大利亚等国，有两种结构形式：笼型和磁阻型转子结构，并由此形成两套不同的研究分析体系，内容涉及电机的结构分析、数学模型的建立、控制策略的研究等。在分析与控制中，一般采用 $d-q$ 数学模型。无刷双馈发电机有两套绕组：功率绕组和控制绕组，两套绕组通过转子产生电磁耦合，形成复杂的空间矢量关系。通过调节控制绕组的电压、电流的频率、幅值、相位和相序，来实现发电机组的输出频率以及有功功率和无功功率的解耦控制。目前已经应用的控制策略有标量控制、自适应控制、直接转矩控制、转子磁场定向控制、智能控制等。对无刷双馈电机的控制偏重于电动机运行模式，尚处于较为初期的研究阶段，仅由 Oregon 州立大学研制的迄今功率最大达 45kW 的实验样机应用于某废水处理厂，作为发电机运行模式，华南理工大学研制了一台 12kW 的无刷双馈风力发电机，已有一些基础研究成果。将无刷双馈发电机应用于风力发电中仍存在需进一步解决的问题，主要有：
数学模型：目前的模型都是按照电动机运行状态建模，此类模型并不完全适用于发电机状态；
解耦控制策略及其实现：如何将多变量解耦鲁棒控制和电力变流器控制相结合，以实现有功功率与无功功率的独立调节，仍是急待解决的理论与应用研究课题。

3 太阳能光伏发电控制技术

太阳能光伏发电系统由太阳能电池阵列、电力变换装置组成，独立运行时需配备储能装置（通常为蓄电池），并网运行时，还要配备逆变控制器。

地表上太阳能辐射功率密度低，现有太阳能电池的转换效率也较低，约为 10% ~ 20%。由于太阳能电池的成本较高，为缩短投资成本的回收周期，提高转换效率和研制高性能控制器应是两个最有效的途径。

充分发挥太阳能电池的工作效率，实现太阳能电池输出功率最大的控制方法一直是此领域的研究热点^[1]。提高光伏发电效率的措施有两种方法：一是实行太阳能轨迹跟踪控制，即实现光伏阵列最大输入功率跟踪，以捕获最大的太阳能辐射量，但这种方法所附加的机电装置增加了成本和复杂性，且跟踪装置连续运行所消耗的能量使其优点并不明显；另一种是实行太阳能电池阵列最大输出功率

跟踪控制(MPPT),这是应用前景看好且目前研究较多的一个课题。

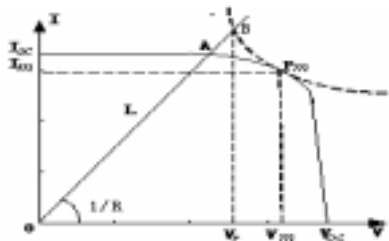


图4 调节负载电压实现太阳能电池的最大功率跟踪

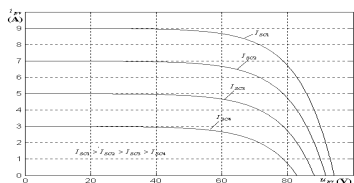


图5 太阳能电池 V-I 特性曲线

在一定光强和温度下,存在一个最大功率点,一定光强下电池 V - I 特性随输出电流变化特性如图 5 所示。最大输出功率跟踪控制采取调节电压使输出功率最大的原理(图 4),已发展了多种控制算法。早期的微扰观察法、增量电导法都是根据功率点的变化调节电压的增量式调节方法,在跟踪速度和精度方面都有缺陷。微分法虽可加快输出功率的搜索速度,但易引起输出功率点的波动,精度受到影响。利用神经网络的自组织和自学习的特点来预测太阳能电池输出最大功率的状态,也可实现最大功率输出,但因影响太阳能电池输出功率的因素较多,用于训练神经网络的数据有一定的局限性。选择太阳能电池输出功率对电压的梯度作为开关函数,可用滑动模变结构控制实现输出功率最大跟踪控制,这种方法在对环境变化的控制鲁棒性、搜索速度和可实现性方面具有一定优势。滑动模控制的缺陷是在最大功率点附近存在颤震现象,采用基于 Boltzmann 函数的非线性控制可有效解决这个问题。

目前的搜索控制算法还不成熟,新算法还没有在实际系统中应用,寻求更为有效的具有适应能力和利用非线性控制的方法仍将是今后研究的重点。

此外,当日照强度、太阳能电磁表面附着物、空气湿度等外界条件发生变化时,太阳能电池输出最大功率点的端电压变化较大,将直接影响发电电压、功率输出等电能指标和太阳能发电控制装置的转换效率。因此固定的接线方式必须代之以在上述随机因素下的最优接线方式(组态),即开展太阳

能电池阵列的组态动态优化的研究。而目前,无论是国内还是国外还处于空白。

太阳能发电系统一般都要实现并网运行,以发挥其使用效率,因而必须对太阳能逆变器进行控制,使其电压、频率及相位与电网保持一致,对并网控制器提出了新的要求。

当光伏发电系统并网时,电网因故障事故或停电维修而断电时,太阳能并网发电系统若未能及时检测出停电状态而与市电分离,就会由太阳能并网发电系统和周围的负载形成一个自给式供电孤岛。随着光伏并网发电系统及其它分散式并网电源的增多,发生孤岛效应的概率也会越来越高,近年来在可再生能源发展较快的国家和地区引起了人们的广泛重视[1]。孤岛效应对配电系统设备及终端用户设备都将造成影响。我国在电力系统中,“孤岛效应”是通过通讯方式,由电力系统的电力调度来解决这一问题,随着分散式可再生能源的大量使用,采用电力系统传统的通讯加电力调度显然不能完全解决这一问题,而我国目前在可再生能源并网发电系统的“孤岛效应”领域的研究几乎是空白。

4 风力-太阳能混合发电系统控制问题

利用风能资源和太阳能资源天然的互补性而构成的风力 - 太阳能混和发电系统,可以弥补因风能、太阳能资源间歇性不稳定所带来的可靠性低的缺陷,在一定程度上提供稳定可靠电能。各发电装置的合理协调运行,还可有效减少配置的蓄电池容量(图 6)。

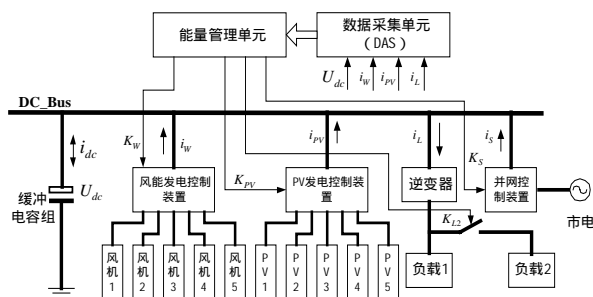


图6 风力-太阳能混合发电系统结构原理图

前面所列举的基本控制问题均属底层单元控制范畴,而要构成一个优化运行的风光互补发电系统,还需有上层的能量管理,以实现风力 - 太阳能发电的协调控制。互补发电系统各部分需按负荷要求、能源资源、气象条件等情况进行协调控制,目前的风光互补发电系统大多为两种发电装置及其

储能设备的简单组合,尚缺乏进行蓄电池容量的优化匹配、蓄电池智能充放电控制、及互补发电系统混合协调控制的能量管理系统的研究和控制器实现,对于这样一个复杂的非线性系统采用模糊控制是一个有效的解决方案,但因影响因素较多,一般的模糊控制策略会面临模糊组合规则爆炸的问题。基于各输出主要程度有区别,一些变量的耦合度不高的事实,采取分级模糊控制策略,将原来与输入变量个数成指数关系的控制规则数量降为成线性关系,较好的解决了组合规则的爆炸问题。模糊控制另一个难点是规则的制定和隶属函数的选择,一般依赖于专家的经验 and 知识,对于复杂系统,人为的选择往往缺乏准确性和系统性,基于遗传算法进行分模糊控制优化,能有效解决这些问题。

从结构上来看,风力-太阳能混合发电系统是一个分布式的能量系统,其各组成部分都具备了单元控制的功能。因而将它们做为主体 (Agent),再加入若干管理 Agent,从而构成一个分散式的智能化能量管理系统,使之在负荷、风力、光照等外界条件发生变化时,进行协调控制实现最优调度策略,成为未来研究的一个热点。将风力与太阳能技术加以综合利用,从而构成一种互补、可控、优质、可分散布点的新型能源,将是本世纪能源结构中一个新的增长点。

5 可再生能源发电中的电力电子技术

可再生能源发电技术的发展和规模的扩大,使其逐步从补充型能源向替代能源过渡。与前述控制技术同样重要的作为可再生能源应用的重要组成部分的电力变换装置的研究与开发也成为一个重要的研究课题。可再生能源发电中应用到的电力电子技术主要包括逆变器、太阳能充电器、矩阵式频率变换器、有源滤波器等。

5.1 逆变器并网控制装置

可再生能源发电输出功率的并网主要采用针对双馈风力发电机组的矩阵式变换器联网和采用 DC-AC 变换单元的联网方式。矩阵式变换器不需电容且有高的可靠性,但控制复杂。目前,可再生能源发电的并网多采用 DC-AC 变换单元与电网连接,DC-AC 变换单元除了要保证并网所要求的电能品质和条件外,还要实现可再生能源发电技术的一些功能,如风能最大捕获控制和太阳能最大功率输出跟踪控制等,要求其主电路拓扑结构具有

有功、无功功率解耦可调,且有高的变换效率。

目前这方面的研究多集中在电路拓扑方面,所采用的控制策略多为小偏差线性化下的 PI 控制,对外界环境不具备鲁棒性。利用现代控制理论提高并网控制器性能已有一些成果,如采用非线性状态反馈线性化方法实现了线电流中的有功和无功分量的解耦控制,达到了提高动态性能的目的;在 PI 控制基础上,引入预测控制,也能改善控制器的动态性能,并可减小直流侧缓冲电容的容量;将滑动模控制应用于风电机组的并网控制器中,可实现低速下的可靠发电控制;基于自抗扰控制器原理的并网控制器,在动态性能和鲁棒性方面具有明显提高,且容易实现。

以上研究虽然得出了一些研究成果,但都是针对各个问题分别解决,要得出实用性的技术成果,应将功率跟踪控制、功率因数控制和输出电流波形控制等问题综合考虑,研究出统一控制算法。

5.2 太阳能充电控制器

为提高太阳能发电的稳定可靠性,需配备一定容量的蓄电池组。铅酸蓄电池组成本较高,且使用寿命有限,若使用不当,会严重影响寿命。蓄电池组的成本已成为影响太阳能光伏发电技术推广应用的一个主要障碍。

常规的充电方法,如恒流充电法、阶段充电法、恒压充电法、脉冲充电法等,都是基于蓄电池的充电特性曲线进行的,但充电控制精度易受外界环境影响,采用自适应搜索算法则能很好地兼顾蓄电池充电控制和太阳能电池最大功率跟踪控制。

5.3 矩阵变换器及控制

矩阵式变换器是实现变速恒频控制的一个重要实现电力电子变流装置,具备同步速上、下运行时控制绕组所需的功率双向流动功能,其拓扑结构如图 7:

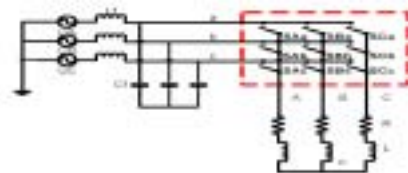


图 7 矩阵式变换器的拓扑结构

9 个双向开关排成 3 行 3 列矩阵,利用 9 个双向开关周期内的占空比来组成 3 行 3 列的开关调制矩阵,以决定矩阵变换器的变换关系。应用于风力发电中的矩阵式变换器,通过调节其输出频率、电压、电流和相位,以实现变速恒频控制、最大风能

捕获控制、以及有功功率和无功功率的解耦控制等,目前矩阵式变换器的控制多采用空间矢量变换控制方法,借用传统交-直-交控制策略,将矩阵式变换器传递函数等效为“虚拟整流”和“虚拟逆变”两部分,由一个虚拟的直流环节将两部分联结,用空间矢量调制技术进行控制,在鲁棒性和实现性方面还优待提高。

目前国内外矩阵式变换器的研究工作尚未成熟,离实用化还有相当距离,关键原因是适用的双向开关尚未成熟和商品化,控制技术也有待发展。

5.4 可再生能源中的谐波抑制

可再生能源发电中多采用电力电子装置来控制转速,会给电网带来电力谐波,使功率因数恶化、电压波形畸变、增加线损合电磁干扰,随着可再生能源发电规模的增大,其给电网带来的电能质量问题越来越受到关注。

抑制谐波主要有两种方法:无源滤波和有源滤波。无源滤波利用电容和电感谐振的特点来抑制特定频率的高次谐波分量和提高功率因数,但存在体积大、滤波频率固定和会出现串/并谐振等缺陷,限制了其应用场合。近年来,有源滤波以其可补偿各次谐波,还可抑制电压闪变、补偿无功等一机多能的特点,成为一个研究热点,且在一些工业先进国家得到了大量应用。但在补偿性能、可靠性以及降低成本和损耗方面还有待进一步完善。

针对有源滤波器的强非线性和高实时性要求,许多学者应用先进控制技术,如自适应辨识技术,以减少电流跟踪误差;基于有源滤波器中电力电子开关器件与滑动模切换变结构的本质互通性,将滑动模技术应用用于有源滤波器控制,可使总谐波畸变率减少,且对参数摄动和外界干扰具有强鲁棒性;有源滤波器的非线性特性,尤其是开关器件的存在,使其精确建模十分困难,人工智能方法可有效解决复杂性与精确控制间的矛盾,如将模糊控制应用于开关器件占空比的优化和控制,能从开关本身特性出发,提高电流跟踪控制的动态品质;将人工神经网络技术应用用于谐波电流和无功成分检测及开关控制,提高了控制精度和可实现性;另外,将自抗扰控制、遗传算法以及灰色预测理论等方法应用于有源滤波器的控制,也取得了有意义的结果。

以上研究成果虽然可实现对有源滤波器品质的改善,但远未成熟。另外,电源品质的改善应是综合性的多目标优化问题,应加强对统一电源品质

调节器的研究。

最后,应当指出,作为应用于电力系统包括可再生能源发电系统中的电力电子装置,通常在整个系统中作为功率放大器或执行机构,当对发电系统进行建模与控制时,惯用的方法是将它们的动态略去,而用一个等价增益来表示。但为了提高电力电子装置本身的稳定性、抗干扰性和参数摄动及响应品质,需对其进行建模与控制,通常在 $d-q$ 轴上完成,于是现代控制技术中的各种控制算法都可以根据各种功率变换器建模特性和性能指标的要求而找到相应的应用场地。

6 结束语

我国严峻的能源形势与蕴藏大量的可再生能源形成了巨大反差。进入二十一世纪以来,我国政策和产业部门对开发利用新能源予以极大的关注,可以预计,发展风电、光伏发电,中、小型风力-太阳能混合电站,各种大型风电场建设等,将很快形成国民经济的一个新的增长点。而伴随新能源产业化进程,以提高其运行品质和效率的控制与电力电子技术将会得到广泛的应用。最后,在我国可再生能源法颁布之际,谨撰写此文,以表拥护和响应。

参考文献

- [1]吴捷,杨俊华.绿色能源与生态环境控制[J].控制理论与应用,2004,21(6):864-869
- [2]杨俊华,吴捷,杨金明,杨苹.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
- [3]张森.风力-太阳能混合发电控制系统的研究.华南理工大学博士学位论文,2004.10
- [4]侯聪玲.采用自适应搜索算法的太阳能充电控制器的设计.华南理工大学硕士学位论文,2004.5
- [5]王波.智能化风力-太阳能混合电站能量管理系统.华南理工大学硕士学位论文,2004.5
- [6]钟小芬.三电平变换器的统一建模及其滑模控制研究.华南理工大学硕士学位论文,2004.5
- [7]董萍.风力发电系统的建模、控制及其仿真研究.华南理工大学硕士学位论文,2004.5
- [8]叶杭治.风力发电机组的控制技术[M].北京:机械工业出版社,2002
- [9]Tony Buryon. Wind Energy Handbook[M]. England: John Willey & Sons,2001

