

风能是我国目前开发利用比较成熟的一种新能源，风电事业正在我国蓬勃发展。为了帮助读者了解风力发电知识，我们请长期从事风力发电研究工作的中国科学院电工研究所倪受元研究员撰写了《风力发电》讲座，以飨读者。

——编者

风力发电讲座

第三讲 风力发电用的发电机及风力发电系统

倪 受 元

1 对发电机及发电系统的一般要求

风力发电包含了由风能到机械能和由机械能到电能两个能量转换过程，发电机及其控制系统承担了后一种能量转换任务。它不仅直接影响这个转换过程的性能、效率和供电质量，而且也影响到前一个转换过程的运行方式、效率和装置结构。因此，研制和选用适合于风电转换用的运行可靠、效率高、控制及供电性能良好的发电系统，是风力发电工作的重要组成部分。在考虑发电系统的方案时，应结合它们的运行方式重点解决以下问题：

①高质量地将不断变化的风能转换为频率、电压恒定的交流电或电压恒定的直流电。

②高效率地实现上述两种能量转换，以降低每度电的成本。

③稳定可靠地同电网、柴油发电机及其他发电装置或储能系统联合运行，为用户提供稳定的电能。

2 恒速恒频发电机系统

恒速恒频发电机系统一般来说比较简单，所采用的发电机主要有两种，即同步发电机和鼠笼型感应发电机。前者运行于由电机极数和频率所决定的同步转速，后者则以稍高于同步速的转速运行。

2.1 同步发电机

风力发电中所用的同步发电机绝大部分是三相同步电机，其输出联接到邻近的三相电网或输配电线。因为三相电机比起相同额定功率的单相电机来，一般体积小、效率较高、而且便宜，所以只有在功率很小和仅有单相电网的少数情况下才考虑采用单相发电

机。

本文对其概要作一介绍。

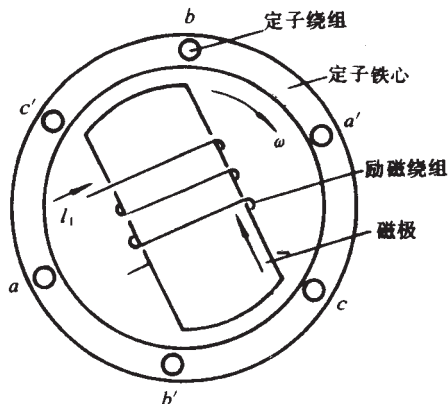


图1 三相同步发电机结构原理图

普通三相同步发电机的原理结构如图1所示。在定子铁心上有若干槽，槽内嵌有均匀分布的在空间彼此相隔 120° 电角的三相电枢绕组 aa' 、 bb' 和 cc' 。转子上装有磁极和励磁绕组，当励磁绕组通以直流电流 I_f 后，电机内产生磁场。转子被风力机带动旋转，则磁场与定子三相绕组之间有相对运动，从而在定子三相绕组中感应出三个幅值相同，彼此相隔 120° 电角的交流电势。这个交流电势的频率 f 决定于电机的极对数 p 和转子转速 n ，即

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1)$$

每相绕组的电势有效值为

$$E_0 = k_1 \omega \Phi \quad (2)$$

式中， $\omega = 2\pi f$ ； Φ 是励磁电流产生的每极磁通； k_1 是一个与电机极数和每相绕组匝数有关的常数。

同步发电机的主要优点是可以向电网或负载提供无功功率，一台额定容量 125kVA、功率因数为 0.8 的同步发电机可以在提供 100kW 额定有功功率的同时，向电网提供 +75kW 和 -75kW 之间的任何无功功率值。它不仅可以并网运行，也可以单独运行，满足各种不同负载的需要。

同步发电机的缺点是它的结构以及控制系统比较复杂，成本相对于感应发电机也比较高。

2.2 感应发电机

感应发电机也称为异步发电机，有鼠笼型和绕线型两种。在恒速恒频系统中，一般采用鼠笼型异步电机。它的定子铁心和定子绕组的结构与同步发电机相同。转子采用笼型结构，转子铁心由硅钢片叠成，呈圆筒形，槽中嵌入金属(铝或铜)导条，在铁心两端用铝或铜端环将导条短接。转子不需要外加励磁，没有滑环和电刷，因而其结构简单、坚固，基本上无需维护。

感应电机既可作为电动机运行，也可作为发电机运行。当作电动机运行时，其转速 n 总是低于同步速 n_s ($n < n_s$)，这时电机中产生的电磁转矩与转向相同。若感应电机由某原动机(如风力机)驱动至高于同步速的转速 ($n > n_s$) 时，则电磁转矩的方向与旋转方向相反，电机作为发电机运行，其作用是把机械功率转变为电功率。我们把 $S = (n_s - n) / n_s$ 称为转差率，则作电动机运行时 $S > 0$ ，而作发电机运行时 $S < 0$ 。

感应发电机的功率输出特性曲线如图 2 所示。可以看出，感应发电机的输出功率与转速有关，通常在高于同步转速 3% ~ 5% 的转速时达到最大值。超过这个转速，感应发电机将进入不稳定运行区。

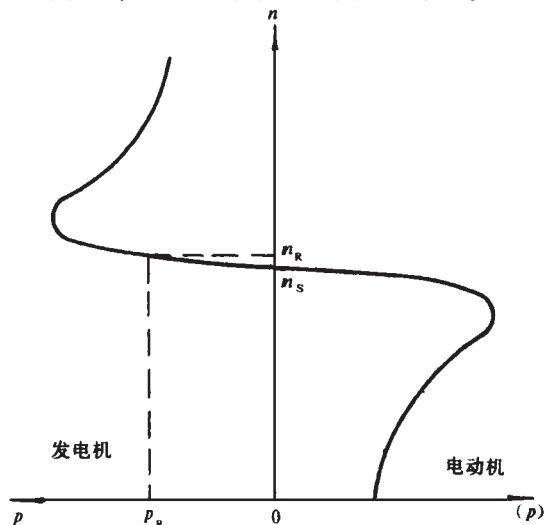


图 2 感应发电机的输出功率特性

感应发电机也可以有两种运行方式，即并网运行和单独运行。在并网运行时，感应发电机一方面向电网输出有功功率，另一方面又必须从电网吸收落后的无功功率。在单独运行时，感应发电机电压的建立需要有一个自励过程。自励的条件，一个是电机本身存在一定的剩磁；另一个是在发电机的定子输出端与负载并联一组适当容量的电容器，使发电机的磁化曲线与电容特性曲线交于正常的运行点，产生所需的额定电压，如图 3 所示。

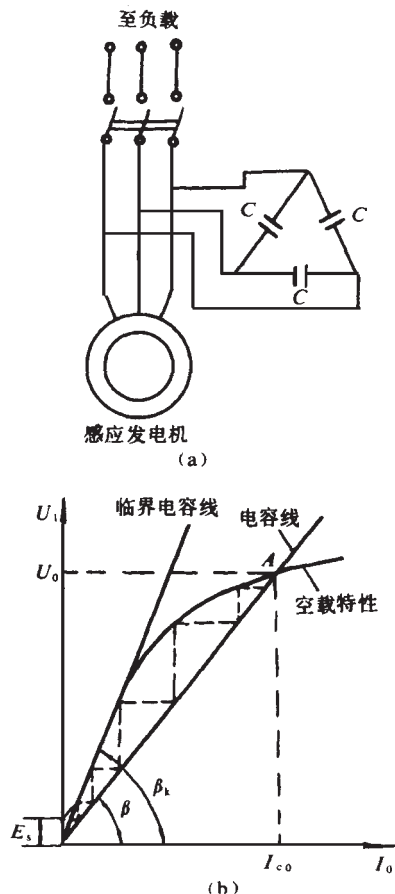


图 3 感应发电机单独运行时的自励电路及电压建立过程

a) 自励电路 b) 电压建立过程

图中与磁化曲线不饱和段相切的直线就是临界电容线，它与横坐标轴的夹角 β_k 为

$$\tan \beta_k = \frac{U_1}{I_0} = \frac{1}{\omega C_k} \quad (3)$$

式中 C_k 为空载时的临界电容。在空载时，要建立正常电压，必使 $\beta < \beta_k$ ，或使 $C > C_k$ 。也即外接电容必须大于某一临界值。增加电容量，可使 β 角减小，使建立的端电压增高。

在负载运行时，一方面由于转差值 $|S|$ 增大，要

维持频率 f 不变, 必须相应提高转子的速度。另一方面还需要补偿负载所需的感性电流(一般的负载, 大多是电感性的)以及补偿定子和转子产生漏磁通所需的感性电流。因此由外接电容器所产生的电容性电流必须比空载时大大增加, 也即需要相应地增加其电容值。上述两个要求如果不能满足, 则电压、频率将难以稳定, 严重时会导致电压的消失, 所以必须有自动调节装置, 否则负载变化时, 很难避免端电压及频率的变化。

感应发电机与同步发电机的比较如表 1 所示。

表 1 感应发电机与同步发电机的比较

a) 感应发电机的优点		
项 目	感应发电机	同步发电机
结构	定子与同步发电机相同, 转子为鼠笼型, 结构简单, 牢固。	转子上有励磁绕组和阻尼绕组, 结构较复杂
励磁	由电网取得励磁电流, 不需要励磁装置及励磁调节装置。	需要励磁装置及励磁调节装置。
尺寸及重量	无励磁装置, 尺寸较小, 重量较轻。	有励磁装置, 尺寸较大, 重量较重。
并网	强制并网, 不需要同步装置。	需要同步合闸装置。
稳定性	无失步现象, 运行时只需适当限制负荷。	负载急剧变化时有可能失步。
维护检修	定子的维护与同步机相同, 转子基本上不需要维护。	除定子外, 励磁绕组及励磁调节装置需要维护。
b) 感应发电机的缺点		
项 目	感应发电机	同步发电机
功率因数	功率因数由输出功率决定, 不能调节。由于需要电网供给励磁的无功电流, 导致功率因数下降。	功率因数可以很容易地通过励磁调节装置予以调整, 既可以在滞后的功率因数下运行, 也可以在超前的功率因数下运行。
冲击电流	强制并网, 冲击电流大, 有时需要采取限流措施。	由于有同步装置, 并网时冲击电流很小。
单独运行及电压调节	单独运行时, 电压、频率调节比较复杂。	单独运行时可以很方便地调节电压。

3 变速恒频发电机系统

这是 20 世纪 70 年代中期以后逐渐发展起来的一种新型风力发电系统, 其主要优点在于风轮以变速运行, 可以在很宽的风速范围内保持近乎恒定的最佳叶

尖速比, 从而提高了风力机的运行效率, 从风中获取的能量可以比恒速风力机高得多。此外, 这种风力机在结构上和实用中还有很多的优越性。利用电力电子学是实现变速运行最佳化的最好方法之一, 虽然与恒速恒频系统相比可能使风电转换装置的电气部分变得较为复杂和昂贵, 但电气部分的成本在中、大型风力发电机组中所占比例不大, 因而发展中、大型变速恒频风电机组受到很多国家的重视。

变速运行的风力发电机有不连续变速和连续变速两大类, 下面分别作一概要介绍。

3.1 不连续变速系统

一般说来, 利用不连续变速发电机可以获得连续变速运行的某些好处, 但不是全部好处。主要效果是比以单一转速运行的风电机组有较高的年发电量, 因为它能在一定的风速范围内运行于最佳叶尖速比附近。但它面对风速的快速变化(湍流)实际上只是一台单速风力机, 因此不能期望它像连续变速系统那样有效地获取变化的风能。更重要的是, 它不能利用转子的惯性来吸收峰值转矩, 所以这种方法不能改善风力机的疲劳寿命。下面介绍不连续变速运行方式常用的几种方法。

1. 采用多台不同转速的发电机 通常是采用两台转速、功率不同的感应发电机, 在某一时间内只有一台被联接到电网, 传动机构的设计使发电机在两种风轮转速下运行在稍高于各自的同步转速。

2. 双绕组双速感应发电机 这种电机有两个定子绕组, 嵌在相同的定子铁心槽内, 在某一时间内仅有一个绕组在工作, 转子仍是通常的鼠笼型。电机有两种转速, 分别决定于两个绕组的极数。比起单速机来, 这种发电机要重一些, 效率也稍低一些, 因为总有一个绕组未被利用, 导致损耗相对增大。它的价格当然也比通常的单速电机贵。

3. 双速极幅调制感应发电机 这种感应发电机只有一个定子绕组, 转子同前, 但可以有两种不同的运行速度, 只是绕组的设计不同于普通单速发电机。它的每相绕组由匝数相同的两部分组成, 对于一种转速是并联, 对于另一种转速是串联, 从而使磁场在两种情况下有不同的极数, 导致两种不同的运行速度。这种电机定子绕组有六个接线端子, 通过开关控制不同的接法, 即可得到不同的转速。

双速单绕组极幅调制感应发电机可以得到与双绕组双速发电机基本相同的性能, 但重量轻、体积小, 因而造价也较低, 它的效率与单速发电机大致相同。缺点是电机的旋转磁场不是理想的正弦形, 因此产生的电流中不需要的谐波分量。

3.2 连续变速系统

连续变速系统可以通过多种方法来得到,包括机械方法、电/机械方法、电气方法及电力电子学方法等。机械方法如采用变速比液压传动或可变传动比机械传动,电/机械方法如采用定子可旋转的感应发电机,电气式变速系统如采用高滑差感应发电机或双定子感应发电机等。这些方法虽然可以得到连续的变速运行,但都存在这样或那样的缺点和问题,在实际应用中难以推广。目前看来最有前景的当属电力电子学方法,这种变速发电系统主要由两部分组成,即发电机和电力电子变换装置。发电机可以是市场上已有的通常电机如同步发电机、鼠笼型感应发电机、绕线型感应发电机等,也有近来研制的新型发电机如磁场调制发电机、无刷双馈发电机等;电子电子变换装置有交流/直流/交流变换器和交流/交流变换器等。下面结合发电机和电力电子变换装置介绍三种连续变速的发电系统。

1. 同步发电机交流/直流/交流系统 其中同步发电机可随风轮变速旋转,产生频率变化的电功率,电压可通过调节电机的励磁电流来进行控制。发电机发出的频率变化的交流电首先通过三相桥式整流器整流成直流电再通过线路换向的逆变器变换为频率恒定的交流电输入电网。

2. 变换器中所用的电力电子器件可以是二极管、晶闸管(SCR)、可关断晶闸管(GTO)、功率晶体管(GTR)和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等。除二极管只能用于整流电路外,其他器件都能用于双向变换,即由交流变换成直流时,它们起整流器作用;而由直流变换成交流时,它们起逆变器作用。在设计变换器时,最重要的考虑是换向,换向是一组功率半导体器件从导通状态关断,而另一组器件从关断状态导通。在变速系统中,可以有两种换向,即自然换向(又称线路换向)和强迫换向。当变换器与交流电网相联,在换向时刻,利用电网电压反向加在导通的半导体器件两端使其关断,这种换向称为自然换向或线路换向。而强迫换向则需要附加换向器件(如电容器等),利用电容器上的充电电荷按极性反向加在半导体器件上强迫其关断。这种强迫换向逆变器常用于独立运行系统,而线路换向逆变器则用于与电网或其他发电设备并联运行的系统。一般说来,采用线路换向的逆变器比较简单、便宜。

开关这些变换器中的半导体器件,通常有两种方式:矩形波方式和脉宽调制(PWM)方式。在矩形波变换器中,开关器件的导通时间为所需频率的半个周期或不到半个周期,由此产生的交流电压波形呈阶梯形而不是正弦形,含有较大的谐波分量,必须滤掉。脉宽调制法是利用高频三角波和基准正弦波的交点来

控制半导体器件的开关时刻,如图4所示。这种开关方法的优点是得到的输出波形中谐波含量小且处于较高的频率,比较容易滤掉,因而能使谐波的影响降到很小。已成为越来越常见的半导体器件开关控制方法。

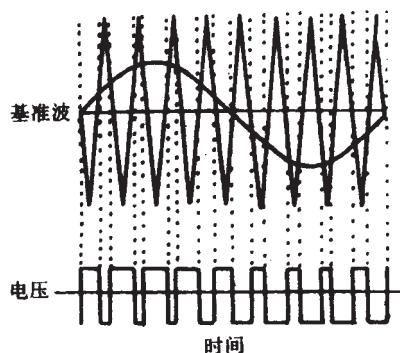


图4 脉宽调制原理

这种由同步发电机和交流/直流/交流变换器组成的变速恒频发电系统的缺点是电力电子变换器处于系统的主回路,因此容量较大,价格也较贵。

2. 磁场调制发电机系统 这种变速恒频发电系统由一台专门设计的高频交流发电机和一套电力电子变换电路组成,图5示出磁场调制发电机单相输出系统的原理方框图及各部分的输出电压波形。发电机本身具有较高的旋转频率 f_r ,与普通同步电机不同的是,它不用直流电励磁,而是用频率为 f_m 的低频交流电励磁(f_m 即为所要求的输出频率,一般为50赫兹),当频率 f_m 远低于频率 f_r 时,发电机三个相绕组的输出电压波形将是由频率为 $(f_r + f_m)$ 和 $(f_r - f_m)$ 的两个分量组成的调幅波(图中波形b),这个调幅波的包络线的频率是 f_m ,包络线所包含的高频波的频率是 f_r 。将三个相绕组接到一组并联桥式整流器,得到如图中波形c所示的基本频率为 f_m (带有频率为 $6f_r$ 的若干纹波)的全波整流正弦脉动波。再通过晶闸管开关电路使这个正弦脉动波的一半反向,得到图中的波形d。最后经滤波器滤去纹波,即可得到与发电机转速无关、频率为 f_m 的恒频正弦波输出(波形e)。

与前面的交流/直流/交流系统相比,磁场调制发电机系统的优点是:第一,由于经桥式整流器后得到的是正弦脉动波,输入晶闸管开关电路后基本上是在波形过零点时开关换向,因而换向简单容易,换向损耗小,系统效率较高。第二,晶闸管开关电路输出波形中谐波分量很小,且谐波频率很高,很易滤去,可以得到相当好的正弦输出波形。第三,磁场调制发电机系统的输出频率在原理上与励磁电流频率相同,因而这种变速恒频风力发电机组与电网或柴油发电机

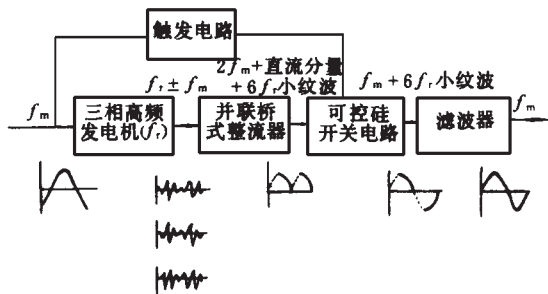


图5 磁场调制发电机单相输出系统方框图
及各部分输出电压波形

组并联运行十分简单可靠。这种发电机系统的主要缺点与交/直/交系统类似,即电力电子变换装置处在主电路中,因而容量较大。比较适合用于容量从数十千瓦到数百千瓦的中小型风电系统。

3. 双馈发电机系统 双馈发电机的结构类似绕线型感应电机,其定子绕组直接接入电网,转子绕组由一台频率、电压可调的低频电源(一般采用交/交循环变流器)供给三相低频励磁电流,图6给出这种系统的原理方框图。当转子绕组通过三相低频电流时,在转子中形成一个低速旋转磁场,这个磁场的旋转速度(n_2)与转子的机械转速(n_r)相叠加,使其等于定子的同步转速 n_1 ,即

$$n_r \pm n_2 = n_1 \quad (4)$$

从而在发电机定子绕组中感应出相应于同步转速的工频电压。当风速变化时,转速 n_r 随之而变化。在 n_r 变化的同时,相应改变转子电流的频率和旋转磁场的速度 n_2 ,以补偿电机转速的变化,保持输出频率恒定不变。

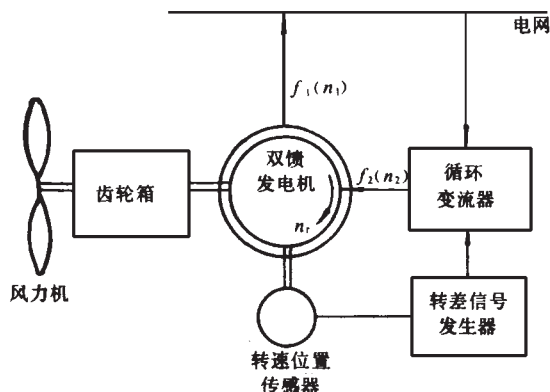


图6 双馈发电机系统

系统中所采用的循环变流器是将一种频率变换成另一种较低频率的电力变换装置,半导体开关器件采用线路换向,为了获得较好的输出电压和电流波形,输出频率一般不超过输入频率的三分之一。由于电力

变换装置处在发电机的转子回路(励磁回路),其容量一般不超过发电机额定功率的30%。这种系统中的发电机可以超同步运行(转子旋转磁场方向与机械旋转方向相反, n_2 为负),也可以次同步运行(转子旋转磁场方向与机械旋转方向相同, n_2 为正)。在前一种情况下,除定子向电网馈送电力外,转子也向电网馈送一部分电力;在后一种情况下,则在定子向电网馈送电力的同时,需要向转子馈入部分电力。

上述系统由于发电机与传统的绕线式感应电机类似,一般具有电刷和滑环,需要一定的维护和检修。目前正在研究一种新型的无刷双馈发电机,它采用双极定子和嵌套耦合的笼型转子。这种电机转子类似鼠笼型转子,定子类似单绕组双速感应电机的定子,有6个出线端,其中3个直接与三相电网相联,其余3个则通过电力变换装置与电网相联。前3个端子输出的电力,其频率与电网频率一样,后三个端子输入或输出的电力其频率相当于转差频率,必须通过电力变换装置(交/交循环变流器)变换成与电网相同的频率和电压后再联入电网。这种发电机系统除具有普通双馈发电机系统的优点外,还有一个很大的优点就是电机结构简单可靠,由于没有电刷和滑环,基本上不需要维护。

双馈发电机系统由于电力电子变换装置容量较小,很适合用于大型变速恒频风电系统。

4 小型直流发电系统

直流发电系统大都用于10千瓦以下的微、小型风力发电装置,与蓄电池储能配合使用。虽然直流发电机可直接产生直流电,但由于直流电机结构复杂,价格贵,而且由于带有整流子和电刷,需要的维护也多,不适于风力发电机的运行环境。所以,在这种系统中所用的电机主要是交流永磁发电机和无刷励磁发电机,经整流器整流后输出直流电。

4.1 交流永磁发电机

交流永磁电机的定子结构与一般同步电机相同,转子采用永磁结构。由于没有励磁绕组,不消耗励磁功率,因而有较高的效率。永磁电机转子结构的具体形式很多,按磁路结构的磁化方向,基本上可分为径向式、切向式和轴向式三种类型。

采用永磁发电机的微、小型风力发电机组常省去增速齿轮箱,发电机直接与风力机相连。在这种低速永磁电机中,定子铁耗和机械损耗相对较小,而定子绕组铜耗所占比例较大。为了提高电机效率,主要应降低定子铜耗,因此采用较大的定子槽面积和较大的绕组导体截面,额定电流密度取得较低。

以色列太阳热水器法规介绍

以色列的太阳热水器法规由热水器国家标准和太阳热水器应用中的一些法律规则所组成。其中设计与建筑法要求在新起建筑物上安装太阳热水器，这是一项以色列最重要的法规。土地法则涉及到现有建筑物上太阳热水器的安装。商品监督与服务法要求太阳热水器安装质量及保证。以色列是目前世界上唯一要求从事太阳能行业的能源经理们接受法律教育的国家。

太阳热水器标准：

以色列太阳能标准是太阳热水器的法规的基础。在以色列太阳集热器的尺寸不是以平方米来标定，而是以输出的千卡或千焦耳热量单位来表示。因此太阳集热器的尺寸被表示为：“太阳集热器日能量热输出 Q ” (Q 单位为 kJ/d)。

$Q = EA\eta$ 其中 E 为以色列 45° 倾斜面上太阳标准辐射量 ($18392\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)； A 为集热器净面积 (m^2)； η 为在标准点上的太阳集热器效率 (%)。

设计与建筑法：

规定自 1981 年起在新的建筑物包括居民楼、旅馆和院校用安装太阳热水器提供热水。(但对工业、车库、医院、27 米以上的高层建筑没有规定。)太阳热水器装置水箱的容积，对 2~3 居室不能小于 120

升，再大单元不小于 150 升，一居室不小于 60 升。装置安装位置不要太醒目，要与整个建筑物协调。

土地法：

该法律适用于现有多层公寓建筑，根据此法律可以在多层公寓的公用屋顶上安装太阳热水器，但太阳热水器及其管道的安装应当减少对建筑物的外观损坏。

商品监督和服务法：

根据该法律，自 1983 年起授权政府监督太阳能装置的质量。主要条款是：①依据现行的以色列标准，每台热水器均应标定。②太阳集热器，储水箱和安装应保修。③自收到消费者请求 7 天内提供维修服务，14 天内必须完成，不能改变。④太阳热水器保修最低期限是：

储水箱 (不包括电加热)	5 年
集热器	5 年
电加热器	1 年
管路 (含保温)	2 年
装置运行	2 年

(产委会)

起动阻力矩是用于微、小型风电装置的低速永磁发电机的重要指标之一，它直接影响风力机的起动性能和低速运行性能。为了降低切向式永磁发电机的起动阻力矩，必须选择合适的齿数、极数配合，采用每极分数槽设计，分数槽的分母值越大，气隙磁导随转子位置越趋均匀，起动阻力矩也就越小。

永磁发电机的运行性能是不能通过其本身来进行调节的，为了调节其输出功率，必须另加输出控制电路。但这往往与对微、小型风电装置的简单和经济性要求相矛盾，实际使用时应综合考虑。

4.2 无刷爪极自励发电机

无刷爪极自励发电机，与一般同步电机的区别仅在于它的励磁系统部分。其定子铁心及电枢绕组与一般同步电机基本相同。

由于爪极发电机的磁路系统是一种并联磁路结构，所有各对极的磁势均来自一套共同的励磁绕组，因此与一般同步发电机相比，励磁绕组所用的材料较省，所需的励磁功率也较小。对于一台 8 极电机，在每极磁通及磁路磁密相同的条件下，爪极电机励磁绕组所需的铜线及其所消耗的励磁功率将不到一般同步电机的一半，故具有较高的效率。另外无刷爪极电机与永磁电机一样均系无刷结构，基本上不需要维护。

与永磁发电机相比，无刷爪极发电机除了机械摩擦力矩外基本上没有什么起动阻力矩。另一个优点是具有很好的调节性能，通过调节励磁可以很方便地控制它的输出特性，并有可能使风力机实现最佳叶尖速比运行，得到最好的运行效率。这种发电机非常适合用于千瓦级的风力发电装置中。