

风力发电的技术发展历程与未来趋势

柴建云



柴建云

现任清华大学电力电子与电机系统研究所教授，博士生导师，清华大学电机系风力发电技术研究中心主任。1984年和1989年分别获得清华大学电机系工学学士和工学博士学位。

柴建云教授承担和完成了多项国家863和科技支撑计划重大项目以及数十项国际及国内校企合作研究项目。他的研究和教学领域包括新能源发电系统、特种电机和电力传动等专业方向。他带领的研究组已发表上百篇技术论文，与国内外工业界建立了紧密的合作关系。

风力资源是一种清洁的可再生能源。在我国广袤的陆地与海洋上，蕴藏着丰富的风力资源。风力发电即是将风能转化为电能，现已成为风力资源的主要利用形式。据国家气象局最近的调查统计，我国具有经济开发价值的风力发电资源不少于10亿千瓦，其中陆地上可开发的风资源约有7.5亿千瓦，近海沿岸可开发的海上风资源约有2.5亿千瓦。预计到2020年我国的风电装机容量将达到1亿千瓦，而到2030年将进一步增加到3亿千瓦，其年发电量相当于十多个三峡水电站。我国风资源富涵地区大多远离电力负荷中心，当地的电网结构相对薄弱。受制于电力系统接纳风电的能力不足，大量风资源被白白放弃。至2009年底，我国风电的累计装机容量仅为0.26亿千瓦，发电量不到电力系统的1%。因此，如何让电力系统接纳更多的风电已成为智能电网建设中迫切需要解决的重要课题。

风力发电系统有两种基本类型，即：离网型风电系统和并网型风电系统。离网型风电系统多为户用型小功率风力发电系统，用于解决电网未覆盖地区以及游牧民家庭的供电问题。为了维持供电的稳定，离网型风电系统除了一般的风力发电机组之外，还需配备一定容量的电力储能装置，例如蓄电池，用以平抑因风功率和负荷的随机变化造成的电压与功率波动。近年来，随着电化学技术的快速发展，出现了若干种基于锂离子电池、钠硫电池和钒流电池等新型蓄电池的大型

电力储能装置。这为发展大容量离网型风电系统提供了新的机会，例如由若干台风力发电机组和其他新能源发电单元共同构建一个可以独立运行的微型电力系统，即微电网。

并网型风电系统从20世纪90年代开始成为风力发电的主导形式。风电并网主要有两种形式：其一是分布式并网，即单台或若干台风电机组直接接入35千伏以下低压配电网；其二是风电场并网，通常以容量达到100兆瓦以上风电场的形式，通过专用升压变电站接入110千伏以上电压等级的电网干线。分布式并网风电在电网接入点馈入的功率较小，通常与配电网中的负荷混杂布置，大部分可在配电网中被消纳。因此，分布式并网风电一般对电力系统造成的压力较小。目前在欧洲，除了少数海上风电场之外，大部分风电为分布式并网。然而，我国的风力资源大多分布于北方内陆偏远地区，远离主要的用电负荷中心。特殊的国情决定了我国风电的主要形式是大规模集约化发电，通过高压大电网远距离输电。（图：风电场并网借用《欧美风电发展的经验与启示》p26图1-21）

在并网型风电机组的发展历程中，曾先后呈现出4个具有里程碑意义的技术特征：

（1）风力发电机组的单机容量大型化

最近20年，已实现商业化运行的并网型风电机组的单机容量由100千瓦迅速提高到6~7兆瓦。现在我国陆地风电场上安装的大部分风电机组的

2010年，清华大学提出用电磁耦合变频调速装置取代液力耦合调速装置，形成“基于电磁耦合调速的变速恒频风电机组”，其中所需变频器的伏安容量不及机组功率的1/6。

单机容量为1.5~2兆瓦，海上风电场中的风电机组最大容量已达3兆瓦。采用较大容量的风电机组不仅有利于提高风电场风力资源的利用率，减少运行维护工作量；而且使得风电机组的单位功率设备造价显著降低。目前，国产兆瓦级风电机组的设备成本已经降至4600元/千瓦左右。低廉的成本有力地推动了我国风电市场快速扩张。2009年，我国新增风电装机容量接近1400万千瓦，已发展成为世界上最大的风电市场。

（2）变桨距叶片取代失速型叶片

风力机是风电机组中的原动机，它通过其叶片吸收风能，并将之转换为旋转的机械能。风力机根据其旋转主轴的方向，可分为水平轴和垂直轴式两种形式。目前投入商业化运行的兆瓦级风电机组中的绝大部分均采用了水平轴风力机。风力机的叶片不仅能够吸收风能，而且还需要对吸收的功率进行调节，以避免风速过大时，风电机组承受的载荷过大。早期风力机的叶片，通过适当的表面形状设计，使流经其表面的气流在风速超过额定值时发生紊乱，即失速现象，从而自动地将风力机吸收的功率限制在一定的范围内。然而，随着风电机组单机容量的增加，叶片相应变长，其运行中的形变不可忽视。因此，大功率的失速型叶片的设计与制造难度显著增加。变桨距叶片通过改变叶片距角，可以方便地控制作用于叶片表面风的攻角，从而调节叶片吸收的功率。变桨距叶片通过轴承连接到轮毂上，利用电液伺服系统或电动伺服系统驱动并控制叶片距角的转动。采用变桨距叶片的风力机在超过额定风速的大风工况，可以将吸收的功率稳定地保持在额定功率上，改善了风电机组的发电量和运行可靠

性。

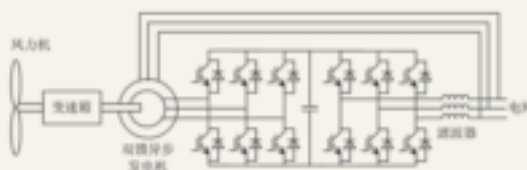
（3）变速发电机系统取代定速发电机系统

在额定风速以下的运行工况，为了充分发挥风力机吸收风功率的能力，需要使风轮转子的转速随风速按一定的规律变化。风轮转子一般直接或通过传动机构与发电机的转子连接。早期的并网型风电机组采用了直接并网的笼型转子异步发电机，其机械特性较硬，发电机转子的运行转速范围很窄，几乎为定值。受此制约，风力机在低风速段的风能转换率较低。采用双速变极异步发电机可以使风力机根据风速的大小在两个转速上来回切换，改善了风力机运行中的风能转换率。变速恒频风电机组的出现，彻底地解除了固定转速发电机对风力机转速的限制，实现了发电机的无级调速，使风力机最大功率点跟踪成为可能。

变速恒频风电机组中的变速发电机系统主要有以下三种主要形式：

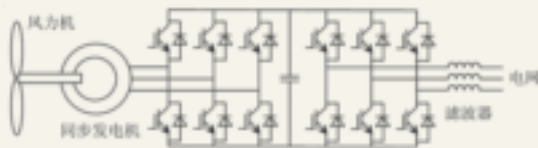
A. 双馈异步发电机系统

该系统采用双馈异步发电机，其定子绕组直接接入电网，转子绕组经一台四象限运行变频器和滤波器接入电网。双馈异步发电机的运行转速一般设定在其同步转速上下30%范围内，变频器的容量仅为发电机容量的30%。该系统的性价比较高，但对电网的扰动比较敏感，低电压穿越能力较弱。



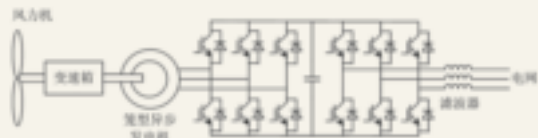
B. 直驱永磁或电励磁同步发电机全功率变换系统

该系统采用直驱永磁或电励磁同步发电机。由于省却了升速齿轮箱，节省了机械传动损耗，但发电机的运行转速低，工作转矩大，极对数多，其体积、重量和成本较大，发电机本体效率下降。发电机输出电压的幅值和频率随转速变化，需经一台全功率变频器变换为恒频恒压，以满足并网要求。该系统的结构相对简单，传动链的运行可靠性高，低电压穿越能力较强，但系统成本较高。



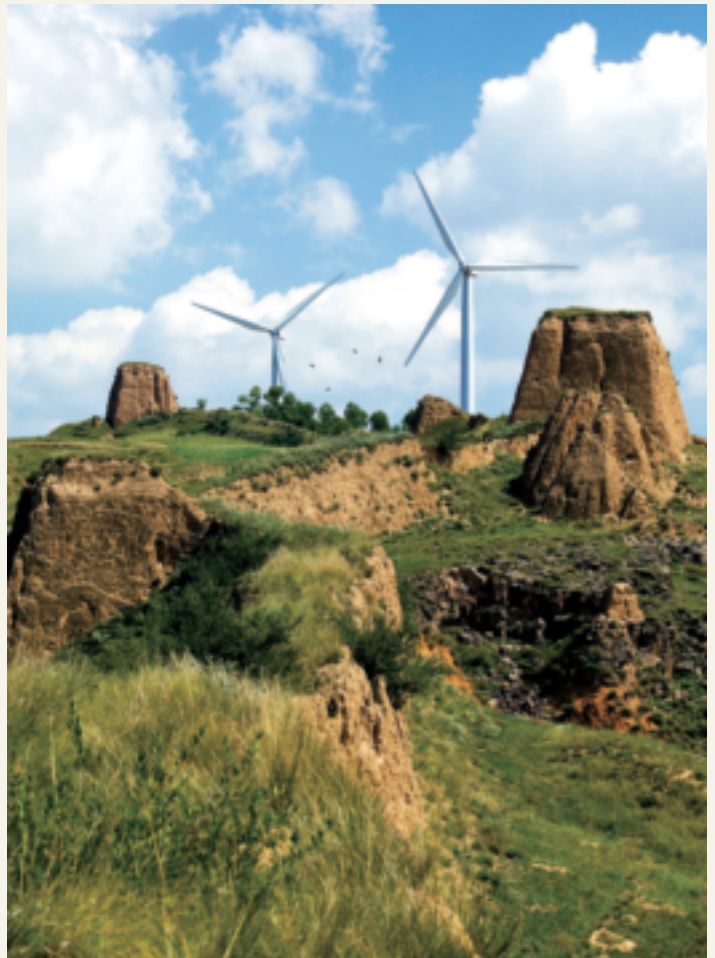
C. 笼型异步发电机全功率变换系统

该系统采用笼型异步发电机，其定子绕组经一台四象限运行变频器和滤波器接入电网。发电机侧的变频器一方面为笼型异步发电机提供励磁电流，另一方面从发电机汲取有功功率，通过PWM整流，形成直流功率。网侧变频器则将直流功率变换为恒频恒压交流电，以满足并网要求。与双馈异步发电机系统相比，该系统的发电机牢固耐用，成本低廉。而全功率变换则弥补了低电压穿越能力的不足，但变频器的成本较高。



(4) 电网友好型风力发电机组

随着风电装机规模的扩大，风电在电网中的穿透率迅速提高，在某些局部地区，甚至成为电网的主力机组。因此，电力系统已开始要求风电机组全面参与对电网电压和频率稳定的支撑以及电网故障保护过程中的机网协调控制。为此，需要发展新一代电网友好型风力发电机组。最近，以Dewind公司D8.2产品为代表的“调速型”变速



恒频风电机组受到人们的广泛关注。该型机组使用一种被称作Windrive的液力耦合调速装置，而发电机则被替换为直接并网的同步发电机，如下图所示。在风电机组中恢复使用常规同步发电机，可以充分借鉴电力系统运行中长期积累的知识与方法，增强风电机组对电网的支撑能力。2010年，清华大学提出用电磁耦合变频调速装置取代液力耦合调速装置，形成“基于电磁耦合调速的变速恒频风电机组”，其中所需变频器的伏安容量不及机组功率的1/6。^[24]

