

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

第四讲 风力发电机组的并网运行

倪 受 元

风能是一种不稳定的能源,如果没有储能装置或其他发电装置互补运行,风力发电装置本身难以提供稳定的电能输出。为了解决风力发电稳定供电的问题,目前国内外比较一致的看法是:大型风力发电机(1000千瓦以上)并网运行,中型风力发电机(从几十千瓦到几百千瓦)或者并网运行,或者与柴油发电机或其他发电装置并联互补运行,小型风力发电机(10千瓦以下)主要采用直流发电系统并配合蓄电池储能装置独立运行。

1 恒速恒频风力发电机的并网运行

中大型或大型风力发电机(几百千瓦到几兆瓦)主要是采用并网运行方式,在这种运行方式中主要解决的问题是并网控制和功率调节问题。下面根据风电系统所采用的发电机类型分别作一介绍。

1.1 同步发电机的并网运行

风力驱动的同步发电机与电网并联运行的电路如图1所示。除风力机、增速器外,电气系统包括同步发电机、励磁调节器、断路器等,发电机通过断路器与电网相联。其运行特点是:

1 同步并网 同步发电机与电网并联合闸前,为了避免电流冲击和转轴受到突然的扭矩,需要满足一定的并联条件,这些条件是:风力发电机的端电压大小等于电网的电压;风力发电机的频率等于电网的频率;并联合闸的瞬间,风力发电机与电网的回路电势为零;

风力发电机的相序与电网的相序相同。

由于风力发电机有固定的旋转方向,只要使发电机的输出端与电网各相互相对应,即可保证第4个条件得到满足。所以在并网过程中主要应检查和满足前三个条件。

风力发电机组的起动和并网过程如下:由风向传感器测出风向并使偏航控制器动作,使风力机对准风向。当风速超过切入风速时,桨距控制器调节叶片桨距角使风力机起动。当发电机被风力机带到接近同步速时,励磁调节器动作,向发电机供给励磁,并调节励磁电流使发电机的端电压接近于电网电压。在风力发电机被加速几乎达到同步速时,发电机的电势或端电压的幅值将大致与电网电压相同。它们的频率之间的很小差别将使发电机的端电压和电网电压之间的相位差在 0° 和 360° 的范围内缓慢地变化,检测出断路器两侧的电位差,当其为零或非常小时使断路器合闸并网。合闸后由于有自整步作用,只要转子转速接近同步转速就可以使发电机牵入同步,即使发电机与电网保持频率完全相同。以上过程可以通过微机自动检测和操作。

这种同步并网方式可使并网时的瞬态电流减至最小,因而风力发电机组和电网受到的冲击也最小。但是要求风力机调速器调节转速使发电机频率与电网频率的偏差达到容许值时方可并网,所以对调速器的要求较高,如果并网时刻控制不当,则有可能产生较大的冲击电流,甚至并网失败。另外,为了实现上述同步并网所需要的控制系统,一般不是很便宜的,对于小型风电机组将会占其整个成本的一个相当大的部分,由于这个原因,同步发电机一般用于较大型的风电机组。

2 有功功率调节 风力发电机并入电网后,从风力机传入发电机的机械功率 P_m 除一小部分补偿发电机的机械损耗 q_{mec} 、铁耗 q_{Fe} 和附加损耗 q_{ad} 外,大部分转化为电磁功率 P_{em} ,即:

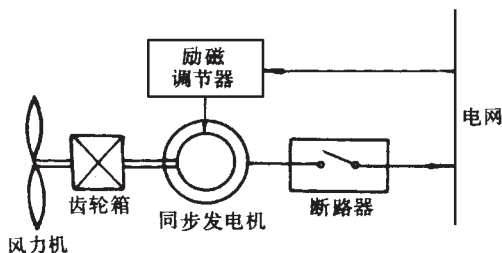


图1 同步发电机与电网并联电路

$$P_{em} = P_m - (q_{mec} + q_{Fe} + q_{ad}) \quad (1)$$

电磁功率减去定子绕组的铜损耗 q_{cu} 后就得到发电机输出的有功功率 P ,即 :

$$P = P_{em} - q_{cu} \quad (2)$$

对于一个并联在无穷大电网上的由风力驱动的同步发电机 ,要增加它的输出电功率 ,就必须增加来自风力机的输入机械功率。而随着输出功率的增大 ,当励磁不作调节时 ,电机的功率角 δ 就必然增大。图2示出同步发电机的功角特性 ,可以看出 ,当 $\delta = 90^\circ$ 时 ,输出功率达到最大值 ,这个发生在 $\sin \delta = 1$ 时的最大功率叫做失步功率。达到这个功率后 ,如果风力机输入的机械功率继续增加 ,则 δ 超过 90° ,电机输出功率下降 ,无法建立新的平衡 ,电机转速将连续上升而失去同步 ,同步发电机不再能稳定运行 ,所以这个最大功率又称为发电机的极限功率。如果一台风力发电机运行于额定功率状况 ,突然一阵剧烈的阵风 ,有可能导致输出功率超过发电机的极限功率而失步。避免出现这种情况的办法 ,一是很好地设计风轮转子及控制系统使其具有快速桨距调节功能 ,能对风速的急剧变化迅速作出反应 ;另一个办法是短时间增加励磁电流 ,这样功率极限也跟着增大了 ,静态稳定度有所提高 ,第三个办法是选择具有较大过载倍数的电机 ,即发电机的最大功率比起它的额定功率来有一个较大的裕度。

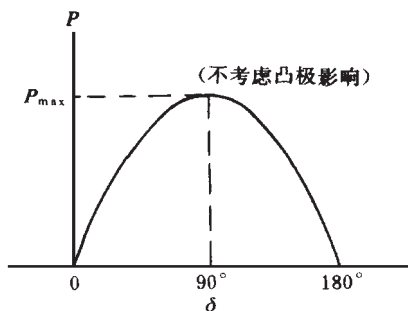


图2 同步发电机的功角特性

从功角特性曲线看到的另一个情况是当功率角 δ 变成负值时 ,发电机的输出功率也变成负值。这意味着发电机现在作为电动机运行 ,功率取自电网 ,风力机变成了一个巨大的风扇 ,这种运行情况当然是不希望的。所以当风速降到一个临界值以下时 ,应使发电机与电网脱开 ,防止电动运行。

3 无功功率调节 电网的总负载中 ,除了需要有功功率 ,有的负载还需要无功功率 ,如异步电动机和变压器等都需要电感性的无功功率。整个电网要是无功功率发得不够 ,就会导致电网的电压下降 ,这对用户是很不利的。因此同步发电机与电网并联后 ,不仅能向电网发出有功功率 ,而且能向电网发出无功功率 ,这是它的一个很大的优点。在风力机功率不变时 ,通过调节励

磁电流 ,可以改变发电机的无功功率。

1.2 感应发电机的并网运行

1 电机并网 感应发电机可以直接联入电网 ,也可以通过晶闸管调压装置与电网联接。感应发电机的并网条件是 :①转子转向应与定子旋转磁场转向一致 ,即感应发电机的相序应和电网相序相同 ;②发电机转速应尽可能接近同步速时并网。

并网的第一个条件必须满足 ,否则电机并网后将处于电磁制动状态 ,在接线时应调整好相序。第二个条件不是非常严格 ,但愈是接近同步速并网 ,冲击电流衰减的时间愈快。

当风速达到起动条件时风力机起动 ,感应发电机被带到同步速附近 (一般为 $98\% \sim 100\%$ 同步转速) 时合闸并网。由于发电机并网时本身无电压 ,故并网时必须伴随一个过渡过程 ,流过 $5 \sim 6$ 倍额定电流的冲击电流 ,一般零点几秒后即可转入稳态。感应发电机并网时的转速虽然对过渡过程的时间有一定影响 ,但一般来说问题不大 ,所以对风力发电机并网合闸时的转速要求不是非常严格 ,并网比较简单。风力发电机组与大电网并联时 ,合闸瞬间的冲击电流对发电机及大电网系统的安全运行不会有太大的影响。但对小容量的电网系统 ,并联瞬间会引起电网电压大幅度下跌 ,从而影响到小电网系统的稳定与安全。为了抑制并网时的冲击电流 ,可以在感应发电机与三相电网之间串接电抗器 ,使系统电压不致下跌过大 ,待并网过渡过程结束后 ,再将其短接。

对于较大型的风力发电机组 ,目前比较先进的并网方法是采用双向晶闸管控制的软投入法 ,如图3所示。当风力机将发电机带到同步速附近时 ,发电机输出端的断路器闭合 ,使发电机经一组双向晶闸管与电网联接 ,双向晶闸管触发角由 180° 至 0° 逐渐打开 ,双向晶闸管的导通角由 0° 至 180° 逐渐增大。通过电流反馈对双向晶闸管导通角的控制 ,将并网时的冲击电流限制在 $1.5 \sim 2$ 倍额定电流以内 ,从而得到一个比较平滑的并网过程。瞬态过程结束后 ,微处理机发出信号 ,利用一组开关将双向晶闸管短接 ,从而结束了风力发电机

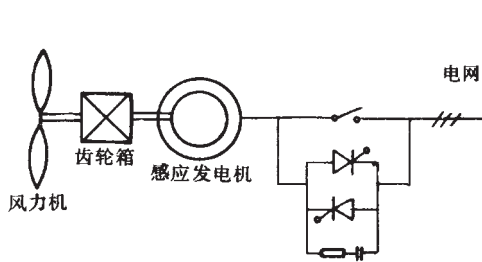


图3 感应发电机的软并网

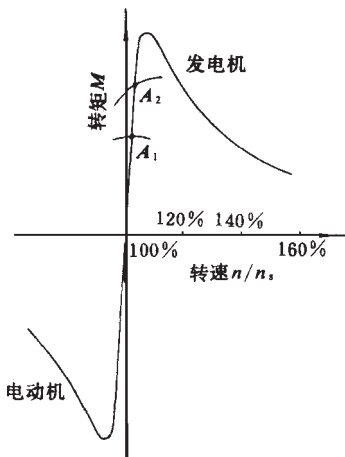


图4 感应发电机的转矩—转速特性曲线

并网后电机运行在其转矩—转速曲线的稳定区,见图4。当风力机传给发电机的机械功率及转矩随风速而增加时,发电机的输出功率及其反转矩也相应增大,原先的转矩平衡点 A_1 沿其运行特性曲线移至转速较前稍高的一个新的平衡点 A_2 ,继续稳定运行。但当发电机的输出功率超过其最大转矩所对应的功率时,其反转矩减小,从而导致转速迅速升高,在电网上引起飞车,这是十分危险的。为此必须具有合理可靠的失速桨叶或限速机构,保证风速超过额定风速或阵风时,从风力机输入的机械功率被限制在一个最大值范围内,保证发电机的输出电功率不超过其最大转矩所对应的功率值。

需要指出的是,感应发电机的最大转矩与电网电压的平方成正比,电网电压下降会导致发电机的最大转矩成平方关系下降,因此如电网电压严重下降也会引起转子飞车,相反如电网电压上升过高,会导致发电机励磁电流增加,功率因数下降,并有可能造成电机过载运行。所以对于小容量电网应该配备可靠的过压和欠压保护装置,另一方面要求选用过载能力强(最大转矩为额定转矩1.8倍以上)的发电机。

3 无功功率及其补偿 感应发电机需要落后的无功功率主要是为了励磁的需要,另外也为了供应定子和转子漏磁所消耗的无功功率。单就前一项来说,一

般的并网过程,进入正常的发电运行。

2 并网运行时的功率输出 感应发电机并网运行时,它向电网送出的电流的大小及功率因数,取决于转差率 s 及电机的参数,前者与感应发电机负载的大小有关,后者对设计好的电机是给定的数值,因此这些量都不能加以控制或调

节。一般中、大型感应电机励磁电流约为额定电流的20%~25%,因而励磁所需的无功功率就达到发电机容量的20%~25%,再加上第二项,这样感应发电机总共所需的无功功率约为发电机容量的25%~30%。

接在电网上的负载,一般来说,其功率因数都是落后的,亦即需要落后的无功功率,而接在电网上的感应发电机也需从电网吸取落后的无功功率,这无疑加重了电网上其他同步发电机提供无功功率的负担,造成不利的影响。所以对配置感应电机的风力发电机,通常要采用电容器进行适当的无功补偿。

2 变速恒频风力发电机的并网运行

变速恒频风电系统的一个重要优点是可以使风力机在很大风速范围内按最佳效率运行。从风力机的运行原理可知,这就要求风力机的转速正比于风速变化并保持一个恒定的最佳叶尖速比,从而使风力机的风能利用系数 C_p 保持最大值不变,风力发电机组输出最大的功率。因此,对变速恒频风力发电系统的要求,除了能够稳定可靠地并网运行之外,最重要的一点就是要实现最大功率输出控制。

2.1 同步发电机交/直/交系统的并网运行

这种系统与电网并联运行的特点是:

- 1) 由于采用频率变换装置进行输出控制,所以并网时没有电流冲击,对系统几乎没有影响。
- 2) 因为采用交/直/交转换方式,同步发电机的工作频率与电网频率是彼此独立的,风轮及发电机的转速可以变化,不必担心发生同步发电机直接并网运行时可能出现的失步问题。
- 3) 由于频率变换装置采用静态自励式逆变器,虽然可以调节无功功率,但有高频电流流向电网。
- 4) 在风电系统中采用阻抗匹配和功率跟踪反馈来调节输出负荷可使风电机组按最佳效率运行,向电网输送最多的电能。

图5示出具有最大功率跟踪的交/直/交电风转换系统联网运行方框图,采用系统输出功率作为控制信号,改变晶闸管的触发角,以调整逆变器的工作特性。

该系统的反馈控制电路包括如下环节:

- ① 功率检测器。在系统输出端连续地测出功率,并提供正比于实际功率的输出信号。

- ② 功率变化检测器。对功率检测器的输出进行采样和储存,以便和下一个采样相比较。在这个检测器中有一个比较器,它与

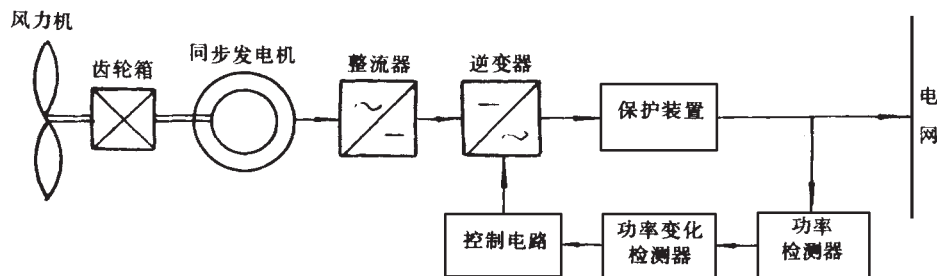


图5 具有最大功率跟踪的交/直/交电风系统方框图

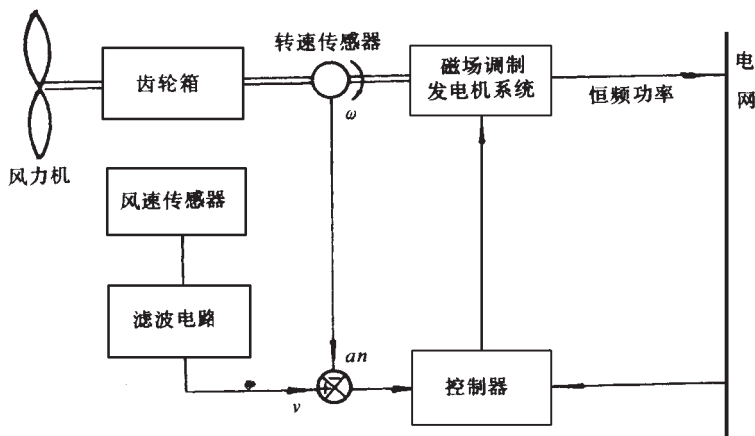


图6 以风速为控制信号的磁场调制发电机系统控制原理方框图

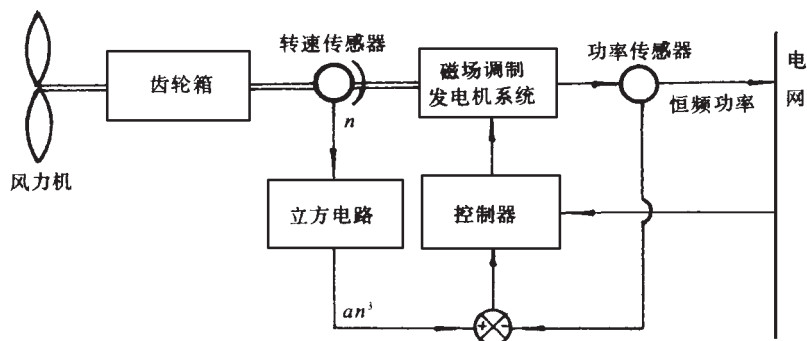


图7 以转速为控制信号的磁场调制发电机系统控制原理方框图

一个逻辑电路一起去测定后一个功率信号电平比前一个信号电平大还是小,当新的采样小于先前的数值时,逻辑电路就改变状态,如果新的采样大于先前的数值,逻辑电路就保持原来的状态。

③控制电路。接受来自逻辑电路的信号并提供一个经常变化的输出信号,当逻辑电路为某一状态时输出就增加,而为另一状态时就减少。这个控制信号被用来触发逆变器的晶闸管,从而控制输送到电网的功率。

上述控制方案的特点是:它不是仅要求风力机功率输出最大,而是要求整个串联系统(包括风力机、增速箱、发电机、整流器和逆变器)的总功率输出达到最大。

2.2 磁场调制发电机系统的并网运行

由第三讲可知,磁场调制发电机系统输出电压的频率和相位取决于励磁电流的频率和相位,而与发电机轴的转速及位置无关,这种特点非常适合用于与电网并联运行的风力发电系统。

图6示出采用磁场调制发电机的风力发电系统的一种控制方案。它的中心思想是测出风速并用它来控制电功率输出,从而使风力机叶尖速度相对于风速保持一个恒定的最佳速比。当风力机转子速度与风速的关系偏离了原先设定的最佳比值时则产生误差信号,

这个信号使磁场调制发电机励磁电压产生必要的变化,以调整功率输出,直至符合上述比值为止。图中风速传感器测得的风速信号通过一个滤波电路,目的是使控制系统仅对一段时间的平均风速变化作出响应而不反应短时阵风。

图7示出另一种控制方案,其设计思想是以发电机的转速信号代替风速信号(因为风力机在最佳运行状态时,其转速与风速成正比关系,故两种信号具有等价性),并以转速信号的三次方作为系统的控制信号,而以电功率信号作为反馈信号,构成闭环控制系统,实现功率的自动调节。

由于磁场调制发电机系统的输出功率随转速而变化,从简化控制系统和提高可靠性出发,也可以采用励磁电压固定不变的开环系统。如果对发电机进行针对性设计,也能得到接近最佳运行状态的结果。

2.3 双馈发电机系统的并网运行

双馈发电机定子三相绕组直接与电网相联,转子绕组经交/交循环变流器联入电网。这种系统并网运行的特点是:

1) 风力机启动后带动发电机至接近同步转速时,由循环变流器控制进行电压匹配、同步和相位控制,以便迅速地并入电网,并网时基本上无电流冲击。对于无初始启动转矩的风力机(如达里厄型风力机),风力发电机组在静止状态下的启动可由双馈电机运行于电动机工况来实现。

2) 风力发电机的转速可随风速及负荷的变化及时作出相应的调整,使风力机以最佳叶尖速比运行,产生最大的电能输出。

3) 双馈发电机励磁可调量有三个,即励磁电流的频率、幅值和相位。调节励磁电流的频率,保证风力发电机在变速运行的情况下发出恒定频率的电力,通过改变励磁电流的幅值和相位,可达到调节输出有功功率和无功率的目的。当转子电流相位改变时,由转子电流产生的转子磁场在电机气隙空间的位置有一个位移,从而改变了双馈电机定子电势与电网电压向量的相对位置,也即改变了电机的功率角,所以调节励磁不仅可以调节无功功率,也可以调节有功功率。