

ABB 变频器在风力发电行业的应用

目前流行的变速变桨风力发电机组的动力驱动系统主要有两种方案：一种是升速齿轮箱、绕线式异步电动机和双馈电力电子变换器的组合；另一种是无齿轮箱的直接驱动低速永磁发电机和全功率变频器的组合。

能源和环境是人类所要解决的两大问题，以清洁、可再生能源为主的能源结构将成为未来发展的必然，目前已经受到了各国政府的极大重视，一些相应的技术也在蓬勃发展之中。风力发电技术是目前可再生能源利用中技术最成熟的且最具商业化发展前景的利用方式，风力发电将成为 21 世纪最具规模开发前景的新能源之一。

目前流行的变速变桨风力发电机组的动力驱动系统主要有两种方案：一种是升速齿轮箱、绕线式异步电动机和双馈电力电子变换器的组合；另一种是无齿轮箱的直接驱动低速永磁发电机和全功率变频器的组合。

除了上述两个方案外，还引入了两种折中方案，一个是低速集成齿轮箱的永磁同步电机加全功率变频器；一个是带高速齿轮箱的永磁同步电机加全功率变频器。根据美国国家可再生能源实验室报告的量化比较数据分析，这两种折中方案也具有很大的发展潜力。

变速恒频双馈风力发电系统的工作原理

根据感应电机定转子绕组电流产生的旋转磁场相对静止的原理，可以得出变速恒频风力发电机转速与定转子绕组电流频率关系的数学表达式

$$f_1 = \frac{P}{60} \times n \pm f_2$$

式中， f_1 为定子电流频率，由于定子与电网相连，所以 f_1 与电网频率相同； p 为电机的极对数； n 为风力发电机的转子转速； f_2 为转子电流频率。

当风力发电机的转速发生变化时，通过转子侧变频调速装置调节转子电流频率 f_2 ，保证 f_1 恒定不变，实现风力发电机的变速恒频控制。

当风力发电机处于亚同步速运行时，即 $n < n_1$ (同步转速)， f_2 取正号，转子侧变频器从电网吸取功率 P_r （转子功率），为发电机转子提供频率为 f_2 的正向励磁电流，保证定子绕组产生与电网同频同幅的电压矢量，从而将风力机捕获的机械能 P_{mec} 转化为电能，此时定子输出的功率为 $P_s = P_{mec} - P_r$ 。

当风力发电机处于超同步速运行时，即 $n > n_1$ (同步转速)， f_2 取负号，转子侧变频器将吸收的机械能反馈回电网 P_r ，为发电机转子提供频率为 f_2 的负向励磁电流，保证定子绕组产生与电网同频同幅的电压矢量，同时将风力机捕获的机械能 P_{mec} 转化为电能，此时定子输出的电能为 $P_s = P_{mec} + P_r$ 。

ABB 风力发电变频器

ABB 传动公司目前主要有两类产品应用于风力发电系统，一类是应用于双馈发电机系统的变频产品 ACS800-67，一类是应用于永磁同步电机且无齿轮箱（直驱系统）的变频产品 ACS800-77，这里主要介绍变频产品 ACS800-67。

1. 控制原理

ACS800-67 风力发电变频器主要和带有转子绕组和滑环的感应式发电机一起使用，连接于双馈发电机转子和电网之间。

变频器工作原理与上节所述一致，当风速变化时，ACS800-67 通过内部控制快速增加或降低转子磁场的旋转速度，保证发电机获得最优滑差，达到获得最大发电量的目的。该传动单元也可以完成在将定子输出接入电网之前使定子输出电压和电网电压同步的目的。在脱离电网时，传动单元通过将转矩给定调整为零，使定子电流减少至零，以便将发电机从电网脱离。

网侧变流器是一个基于 IGBT 模块的变流器，将输入的三相交流电整流为所需的直流电，为转子侧逆变器供电。网侧变流器控制对象为直流母线电压和网侧无功功率，通过检测网侧两相电流和直流母线电压，采用直接转矩的控制方法，实现直流母线电压泵升且恒定以及网侧功率因数可控的目的。同时也可以实现功率的双向流动以及降低网侧电流谐波含量的目的。

转子侧变流器包含一个或两个基于 IGBT 的逆变器模块，将直流电逆变为产生转子磁场所需频率和幅值的三相交流电，向转子绕组供电。转子侧变流器控制对象为转矩和无功功率，通过对转矩的控制实现对发电机发电有功功率的控制，通过对无功功率的控制完成对发电机转子磁场的建立，实现对发电机无功功率的控制。

2. 技术特点

ACS800-67 还具有以下技术特点。

(1) 长寿命设计。变频器内部器件选型和系统配置均按照 20 年使用年限设计，特别是直流母线电容采用胶片电容替代原有的电解电容，寿命更长、耐低温特性良好。冷却风扇具有调速功能，可延长其使用寿命。

(2) 适用于恶劣的使用环境。变频柜内和模块内部均内置加热器，且配置有温度和湿度传感器，对抗低温和高湿环境。所有线路板均带有防腐涂层，柜体防护等级为 IP54，保证了变频器恶劣环境下的可靠工作。

(3) 高端配置、紧凑型设计。变频器将输入 LCL 滤波器、输出滤波器 DU/DT 以及进线接触器和直流熔断器作为标准配置，通讯适配器和以太网适配器作为选装配置。紧凑型的设计理念使得其在同等功率的变频器中体积最小，适用于放在发电机舱内。

(4) 低电压穿越能力。在电网发生严重故障期间，比如短路或瞬间掉电，可通过使用有源或无源 Crowbar 硬件，提供对电网的支持，保证电机依然在网。

(5) 优良的可控性。由于整流单元采用 IGBT 可控整流，直流母线电压得到泵升，因此电机转子的电压可控制高达 750V，风机的速度范围更宽，转子的电流更低。发电机的功率因数可达到±0.9，甚至更高，这完全取决于电机设计，变频器对此不成为瓶颈。在转子电压接近于 0V 时，变频器也完全可控，且可以在速度范围内的任何一点切入切出。即使在风机静止时，也可以通过整流单元发出无功功率对电网提供支持。

(6) 完善的保护功能。具有多重保护功能，例如过流、接地、风机超速和失速等保护功能，提供对电机转子和变频器的完整保护。

应用案例

上海南洋电机厂采用 ACS800-67 变频器构建双馈风力发电机的实验平台，风力机采用直流电动机模拟，即双馈发电机转子靠直流电动机拖动。系统各部分的技术数据如下所示：

发电机：定子额定电压 690V；定子额定电流 1500A；额定频率 50HZ；额定功率 1345KW；额定转速 1513rpm；同步转速 1500rpm；功率因数 0.9；转子开路电压 1990V；转子电流 550A；

变频器：ACS800-67-0480 / 0770-7；调速范围±30%。

1.同步运行

双馈风力发电系统投入电网前首先要进行同步运行，即使发电机的定子电压在幅值、频率和相位上与电网电压达到一致。典型的同步运行步骤如下：

(1) 将发电机转子拖动到设定的正常工作范围内，即同步转速的 70%-130%，启动变频器；

- (2) 开关 S1 闭合，网侧变流器启动为转子侧变流器建立直流电压。开关 S2 仍然断开；
- (3) 转子侧变流器测量电网电压 U_{grid} 和定子电压 U_s ；
- (4) 转子侧此时工作于同步模式，转子侧变流器通过磁化转子绕组，感应出与电网电压同步的定子电压；
- (5) 当定子电压与电网电压同步后，开关 S2 闭合，同步运行过程完成。此后变频器切换到转矩控制模式，接受给定的转矩和无功功率指令，准备开始发电。

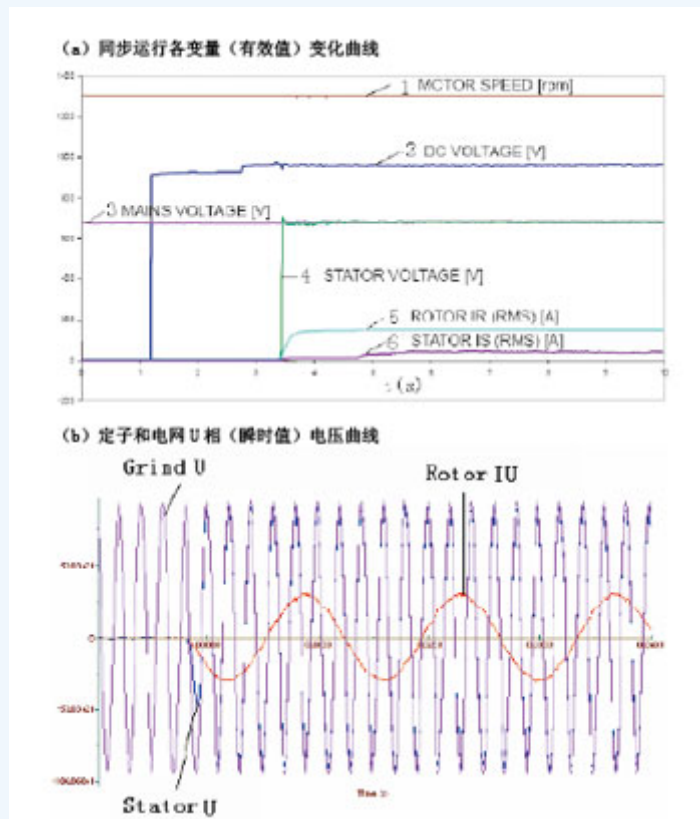


图 1 定子电压和电网电压同步运行曲线图

图 1 为采用 ABB 专用软件 DriveWindow 记录的同步运行曲线图。图 1(a)为发电机转子转速被直流电动机拖动到 1300rpm（如曲线 1 所示）后，变频器投入运行。开关 S1 闭合后，网侧变流器启动建立直流母线电压（如曲线 2 所示），当直流母线电压建立完成并稳定后，转子侧逆变器投入运行，为转子绕组提供三相励磁电流，产生旋转的磁场，并在定子绕组上感应电压（如曲线 4 所示），当定子绕组上的感应电压与电网电压（如曲线 3 所示）在幅值、

频率和相位完全一致后，同步过程完成，可以随时闭合开关 S2，将发电机并入电网。曲线 5 和 6 分别为同步过程中的定转子电流。

图 1(b)所示为电网 U 相电压与定子 U 相电压在同步过程中的变化曲线。由图可知，当变频器投入运行后，定子 U 相电压迅速建立，并与电网 U 相电压在相位、幅值上完全一致，达到同步的要求。

2.发电运行

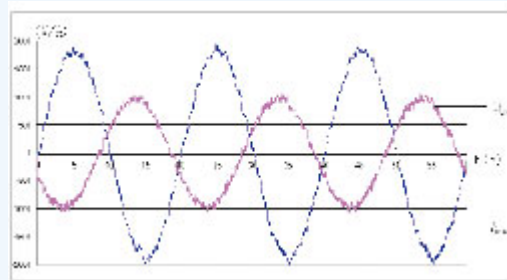


图 2 网侧线电压与电流波形图

图 2 为发电机处于超同步运行（转子转速为 1513rpm），给定转矩为额定转的 85%，无功功率给定为零时，电网线电压、相电流的波形图。理论分析可知，当发电机处于超同步运行状态，发电机的定子侧和转子侧应同时向电网输出电能，网侧相电流为定子与转子的电流之和。通常网侧变流器的无功功率给定设置为零，所以定子与转子电流的相位相同，都与电网电压反相。实际上，由图可知，电网相电压与定子电流相位相差 180 度，完全反相，发电机处于发电状态，向电网输出电能，功率因数为-1。

综上所述，风力发电作为 21 世纪全球最有发展潜力的新能源之一，必将受到越来越多的重视。由 ABB 研制和生产的风力发电变频产品 ACS800-67/77 代表了当今风电的两大主流方向，已经成功应用于世界各地，对于推对该项技术的全球发展起到了积极的推动作用。