

# ABB 变频器在风力发电行业的应用

能源和环境是人类所面临的两大问题，以清洁、可再生能源为主的能源结构将成为未来发展的方向，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。风力发电是目前可再生能源利用中技术最成熟的、最具商业化发展前景的能源利用方式，风力发电将成为 21 世纪最具开发前景的新能源之一。

现在，世界上大中型风力发电机组主要有两种型式。一类是定桨距失速调节型，属于恒速机型，一般使用同步电机或者鼠笼式异步电机作为发电机，通过定桨距失速控制的风轮机使发电机的转速保持在恒定的数值，继而使风电机组并网后定子磁场旋转频率等于电网频率，转子、叶轮的变化范围小，捕获风能的效率低。另一类是变速变距型，一般采用双馈电机或者永磁同步电机，通过调速器和变桨距控制相结合的方法使叶轮转速可以跟随风速的改变在很宽的范围内变化，保持最佳叶尖速比运行，从而使  $C_p$ （风能利用系数）在很大的风速变化范围内均能保持最大值，能量捕获效率最大。发电机发出的电能通过变流器调节，变成与电网同频、同相、同幅的电能输送到电网。相比之下，变速型风力发电机具有不可比拟的优势。

目前流行的变速变桨风力发电机组的动力驱动系统主要两种方案：一种是升速齿轮箱+绕线式异步电动机+双馈电力电子变换器；另一种是无齿轮箱的直接驱动低速永磁发电机+全功率变频器。两种方案各有优缺点：前者采用高速电机，体积小重量轻，双馈变流器的容量仅与电机的转差容量相关，效率高、价格低廉，缺点是升速齿轮箱价格贵，噪音大、易疲劳损坏；后者无齿轮箱，可靠性高，但采用低速永磁电机，体积大，造价高，变频器需要全功率，成本提高。

除了上述两个方案外，还引入了两个折中方案，一个是低速集成齿轮箱的永磁同步电机+全功率变频器；一个是高速齿轮箱的永磁同步电机+全功率变频器。根据美国国家可再生能源实验室 NREL 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。

## 1 四种风力发电系统简介

### 1.1 高速异步发电机双馈系统（DFIG）

高速异步发电机双馈系统主要由升速齿轮箱+绕线异步发电机+双馈变频器构成，ABB 发电机典型功率范围为 600~5 000 kW，如图 1 所示。

DFIG 的特点是发电机转速可以在同步转速上、下两个方向变化。假设 1.5 MW 风电机组的叶轮转速变化范围为 10~20 r/min，通常令 15 r/min 对应电机同步转速，这样转速变化范围为电机额定转速的  $\pm 1/3$ ，相应变频器的功率只有电机功率的 1/3。若想简化机构采用直接驱动，电机额定转速也应该为 15 r/min，由于异步电机定子接在 50 Hz 电网，则要求电机极对数为 200，很难实现，因此该方案必须使用升速齿轮箱，配高速异步电机（通常采用 6 极电机）。升速齿轮箱速比大，负荷重，随风速变化波动大且频繁，造价高、易疲劳损坏是该方案的主要缺点，另外绕线式异步电机的电刷和滑环也会影响系统的可靠性，增加维护工作量。

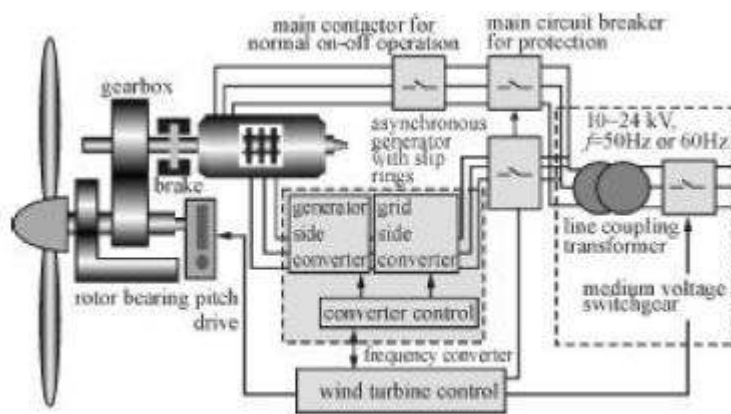


图1 双馈风力发电系统图

对数为 200，很难实现，因此该方案必须使用升速齿轮箱，配高速异步电机（通常采用 6 极电机）。升速齿轮箱速比大，负荷重，随风速变化波动大且频繁，造价高、易疲劳损坏是该方案的主要缺点，另外绕线式异步电机的电刷和滑环也会影响系统的可靠性，增加维护工作量。

### 1.2 低速永磁同步发电机直驱系统（PMDD）

低速永磁同步发电机直驱系统主要由低速永磁同步发电机 全功率变频器构成，如图 2 所示。ABB 发电机典型功率范围为 600~5 000 kW。

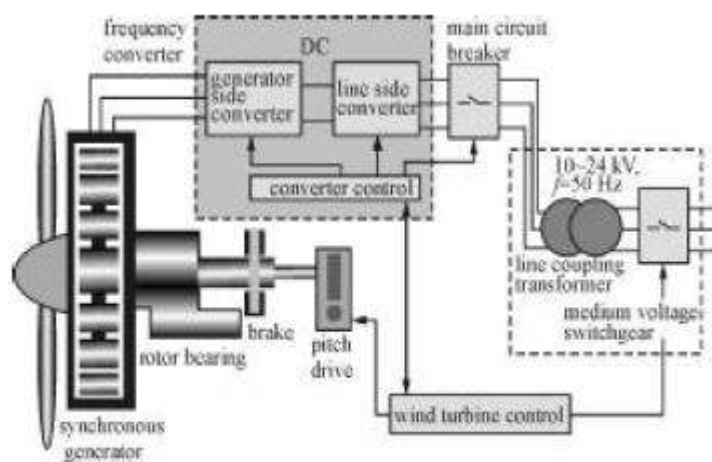


图2 低速永磁同步发电机直驱系统图

PMDD 的特点是没有升速齿轮箱，叶轮直接驱动低速发电机转子，消除了 DFIG 的薄弱环节，大大提高可靠性，降低维护工作量。由于发电机定子绕组不直接与电网相连，而是通过变频器连接，因此电机额定转速可以降低，使电机极数减少至合理值。缺点是低速电机体积大，定子绕组绝缘等级要求高，变频器要输送发电机全功率，因此电机和变频器的价格都比 DFIG 高。

### 1.3 集成低速齿轮箱的永磁机风力发电系统

该风力发电系统将低速齿轮箱集成在永磁发电机内，使系统的结构更加紧凑，通常极数大于 20，电机额定转速一般为 120~450 r/min，具有更可靠和更长的使用寿命。ABB 发电机典型功率范围为 1~5 MW，结构如图 3 所示。

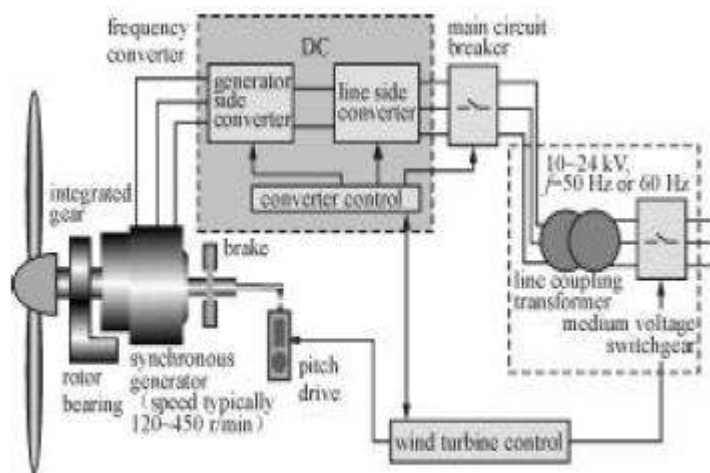


图 3 低速集成齿轮箱永磁同步风力发电系统图

#### 1.4 高速齿轮箱的永磁机风力发电系统

该系统机械结构与双馈型基本相同，没有了绕线式电机滑环所带来的弊病，且发电机重量轻，发电效率高。通常电机的极数为 6 或 8 极，发电机的转速一般为 1 000~2 000 r/min，ABB 变频器典型功率范围为 1~5 MW，结构如图 4 所示。

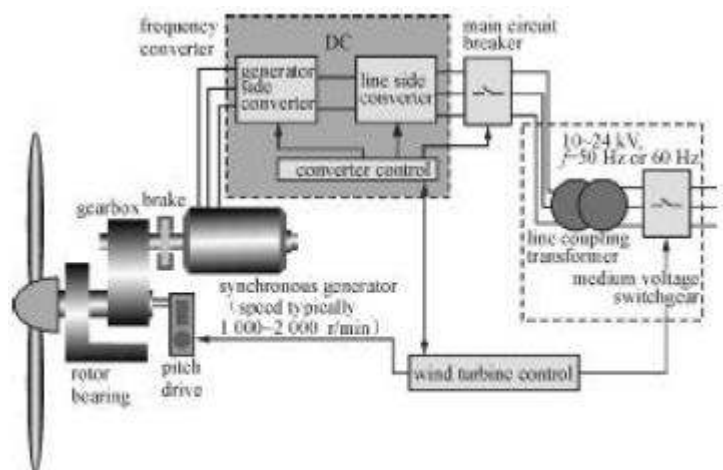


图 4 高速永磁同步风力发电系统图

## 2 变速恒频双馈风力发电系统工作原理

### 2.1 叶轮能量最大捕获原理

风力机通过叶轮来捕获流动的风能，风的能量转化为叶轮旋转的动能，齿轮箱再把这种机械能传输到发电机，由发电机通过内部的电磁关系将机械能变为电能输出。图 5 为在不同风速下，叶轮转速与风力机输出功率的关系图。由图可知，对应于每个风速的曲线，都有一个最大输出功率点，风速越高，输出功率越高，相应的叶轮转速也越高。因此，如果能随风速变化改变叶轮转速，使得风力机在所有风速下都工作于最大功率输出点，则发出电能最多，否则发电效能将降低。

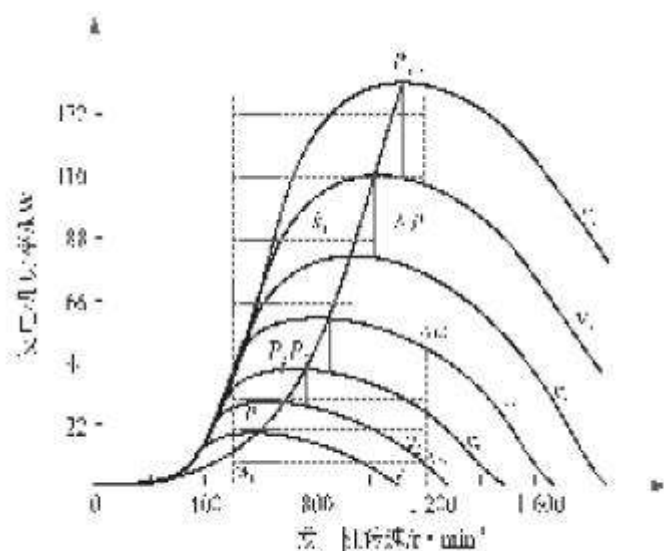


图5 不同风速下发电机转速与输出功率曲线图

双馈发电机的最大风能捕获控制就是通过预先制定的风速对应的最大功率曲线，控制风力机转速，使其跟随风速的变化而相应变化，保证风力机的叶尖速比恒定，达到最大功率输出。假设在风速  $v_2$  下，系统最初工作  $P_1$  点，如果风速阶跃变化到  $v_3$ ，风力机转速由于惯性保持不变，此时风力机输出机械功率达到  $P_2$  点，大于双馈发电机的发电功率，此时，风力机输入力矩大于双馈发电机的输出力矩，风力机转速增加，沿对应于风速  $v_3$  的曲线向  $P_3$  移动，当达到该点后，双馈发电机根据最大功率曲线给出相应的转矩给定值，并与风力机输入力矩相平衡，此时系统便稳定工作于  $P_3$  点，输出对应于  $v_3$  风速下的最大功率  $P_3$ 。

## 2.2 双馈发电机的变速恒频控制原理

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

$$f_1 = \frac{pn}{60} \pm f_2 \quad (1)$$

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  $P_s = P_{mec} + P_r$ 。因此，转子侧变频器应具有以下特点：

- 1) 具有四象限工作能力，实现能量的双向流动，而且变频器功率仅为发电机的转差功率，这有利于减少变频器体积，降低系统成本和投资；
- 2) 利用转子侧励磁电流控制定子侧的无功功率，利用转子侧电磁转矩电流控制定子侧的有功功率，实现定子侧有功功率和无功功率的独立调节；
- 3) 网侧变流器能够实现单位功率因数的正弦波控制。

根据以上特点，交-直-交双PWM电压型变频器成为变速恒频双馈风力发电系统首选的方案之一。

### 3 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 ACS800-67。

#### 3.1 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，电路图如图 6 所示。该变频器既可以安装在塔基处也可以安装于发电机舱内。

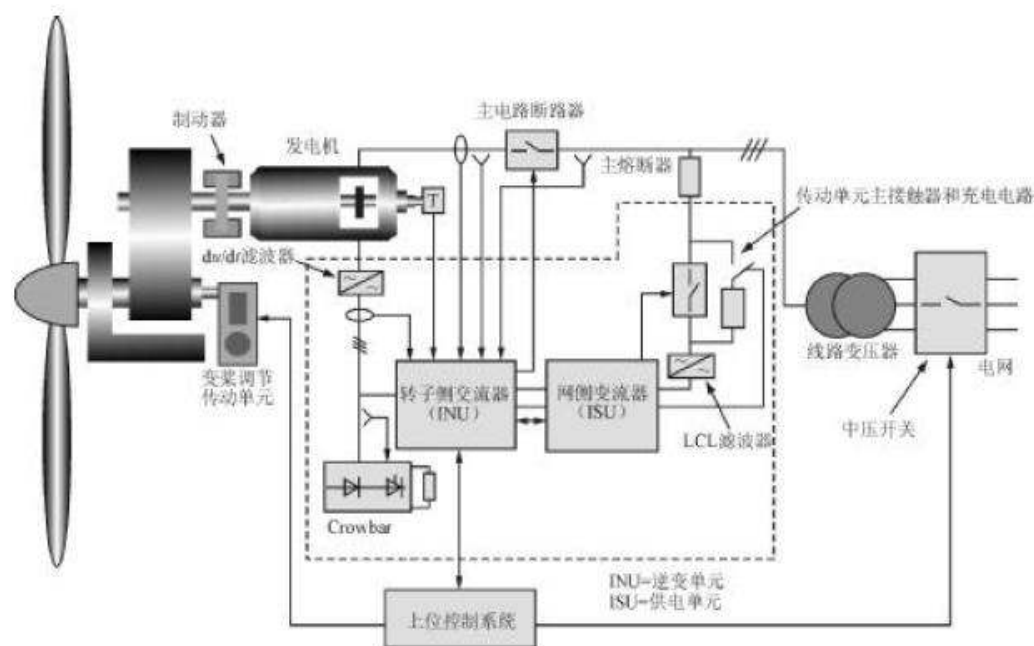


图 6 ACS800-67 风力发电变频器电路图

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（一般设置为 1）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。

### 3.2 变频器选型

如前所述，双馈风力发电系统的变频器由于接在发电机的转子侧，所以变频器容量可小于发电机的容量，仅为发电机的转差功率，因此，变频器容量的选择与风力发电机的调速范围密切相关。一般风力发电机的调速范围为额定转速的 70%~130%，转差率为±30%，所以变频器的额定容量可选为发电机额定容量的 1/3。表 1 为 ACS800—67 的选型表。

假设发电机额定电压为 690 V，额定功率为 2 MW，额定转速为 1 500 r/min，调速范围为±30%，即发电机转速工作范围为 1 000 ~2 000 r/min，因此，变频器的功率可选为  $2 \text{ MW} \times 30\% = 0.6 \text{ MW}$ ，根据选型表可得转子侧变流器型号为 ACS800—104—0770—7；而整流侧变流器由于控制的网侧功率因数为 1，只流过有功电流，故容量相对较小，型号为 ACS800—104—0580—7。

### 3.3 技术特点

ACS800—67 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 750 V，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 0 V 时，变频器也完全可控。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。

表 1 ACS800-67 风力涡轮机传动单元型号

ACS800-67	网侧变流器		转子侧变流器		LCL 滤波器
	型号	外形尺寸	型号	外形尺寸	型号
-0480/0580-7	ACS800-104-0580-7	R8i	ACS800-104-0580-7	R8i	ALCL-1x-x
-0480/0770-7	ACS800-104-0580-7	R8i	ACS800-104-0770-7	2xR8i	ALCL-1x-x
-0480/1160-7	ACS800-104-0580-7	R8i	ACS800-104-1160-7	2xR8i	ALCL-1x-x

## 4 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。系统连接示意图如图 7 所示。技术数据如下。

- 1) 发电机定子额定电压 690 V，定子额定电流 1500A，额定频率 50 Hz，额定功率 1345kW，额定转速 1 513 r/min，同步转速 1 500 r/min，功率因数 0.9，转子开路电压 1990V，转子电流 550A。
- 2) 变频器型号 ACS800-67-0480 / 0770-7，调速范围±30%。

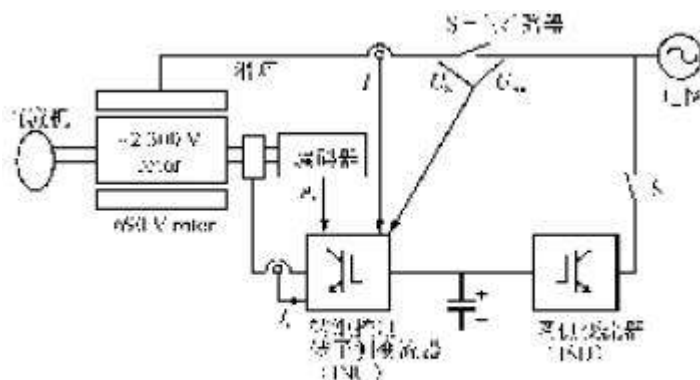


图 7 试验台系统连接图

### 4.1 同步运行

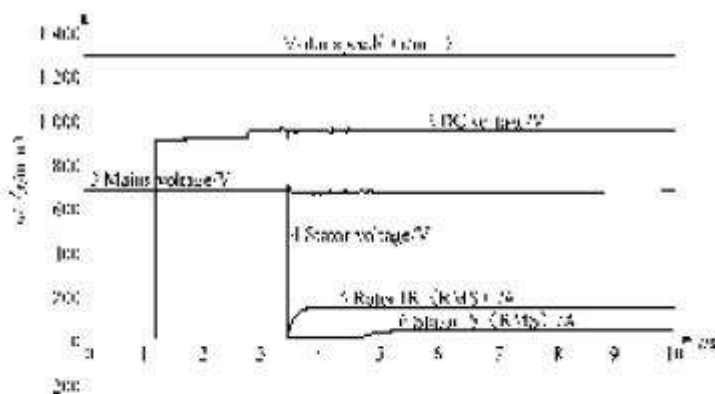
双馈风力发电系统投入电网前首先要进行同步运行，即使发电机的定子电压在幅值、频率和相位上与电网电压达到一致。典型的同步运行步骤如下：

- 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  $U_{grid}$ （开关 S2 的输入侧）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。

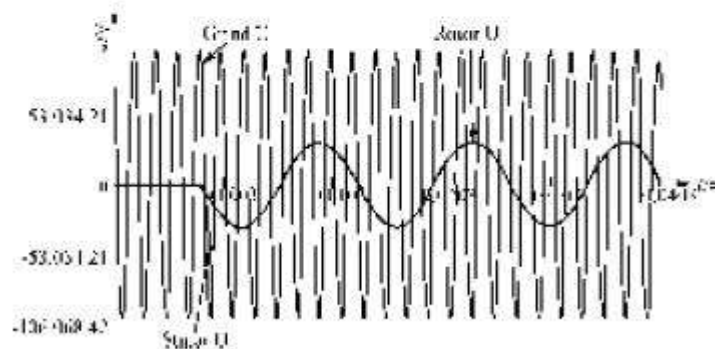
图 8 为同步运行时记录的曲线图。图 8 (a) 为发电机转子转速被直流电动机拖动到 1 300 r/min（如曲线 1 所示）后，变频器投入运行。开关 S1 闭合后，网侧变流器启动建立直流母线电压（如曲线 2 所示），当直流母线电压建立完成并稳定后，转子侧逆变器投入运行，为转子绕组提供三相励磁电流，产生旋转的磁场，并在定子绕组上感生电压（如曲线 4 所示），当定子绕组上的感应电压与电网电压（如曲线 3 所示）在幅值、频率和相位完全一致后，同步过程完成，可以随时闭合开关 S2，将发电机并入电网。曲线 5 和 6 分别为同步

过程中的定转子电流。

图 8 (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。



(a) 同步运行各变量变化曲线



(b) 定子和电网 U 相电压曲线

图 8 定子电压和电网电压同步运行曲线图

## 4.2 发电运行

图 9 为发电机处于超同步运行（转子转速为 1 513 r/min），给定转矩为额定转矩的 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  $180^\circ$ ，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  $-1$ 。



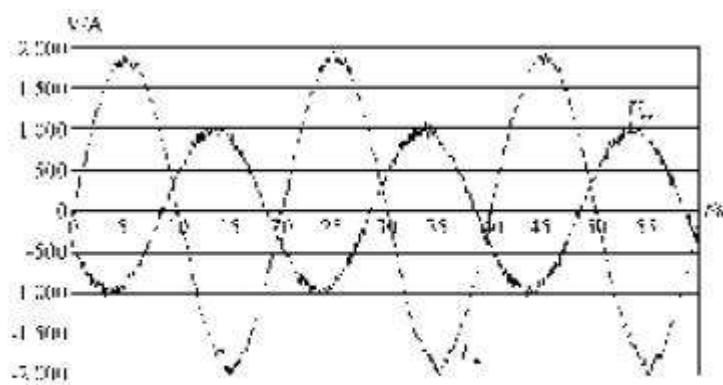


图9 网侧线电压与电流波形图

## 5 结语

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，对风电技术的全球发展起到了积极的推动作用。