

ABB 变频器在双馈发电机试验台上的应用

收藏此信息 打印该信息 添加：北京 ABB 电气传动系统有限公司 李时杰 郭晓虎 李 鹏 来源：未知

1 引言

能源和环境是人类面前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。风能作为一种清洁的可再生能源，越来越受到世界各国的重视。其蕴量巨大，全球的风能约为 $2.74 \times 10^9 \text{mw}$ ，其中可利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{mw}$ ，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。随着全球经济的发展，风能市场也迅速发展起来。近 5 年来，世界风能市场每年都以 40% 的速度增长。1997 年全世界风电装机容量只有 7000 兆瓦，2007 年已有 9 万兆瓦。预计未来 20~25 年内，世界风能市场每年将递增 25%。随着技术进步和环保事业的发展，风能发电在商业上将完全可以与燃煤发电竞争。

中国风能储量很大、分布面广，仅陆地上的风能储量就有约 2.53 亿千瓦。“十五”期间，中国的并网风电得到迅速发展。截至 2006 年 6 月全国风电装机总容量达到 126 万千瓦，位居世界第 10 位，亚洲第 3 位，成为继欧洲、美国和印度之后发展风力发电的主要市场之一。

2 动力驱动系统方案

(1) 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；
- 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。

(2) 还引入了两个具有很大的发展潜力折中方案

- 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。

2.1 高速异步发电机双馈系统(dfir)

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 600~5000kw，如图 1 所示。

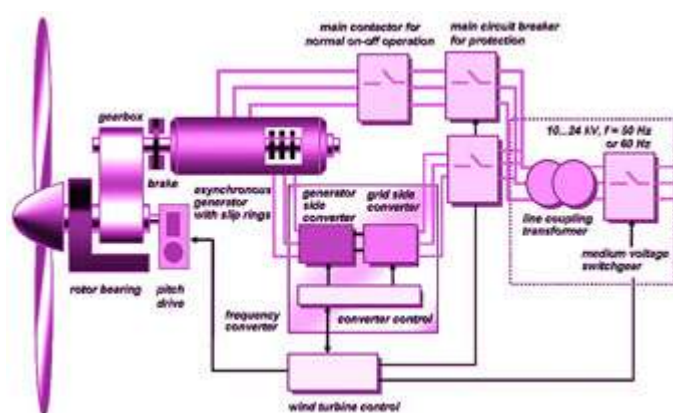


图 1 双馈风力发电系统图

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 1.5mw 风电机组的叶轮转速变化范围约为 10~20r/min，通常令 15r/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 50hz 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。

2.2 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 600~5000kw。

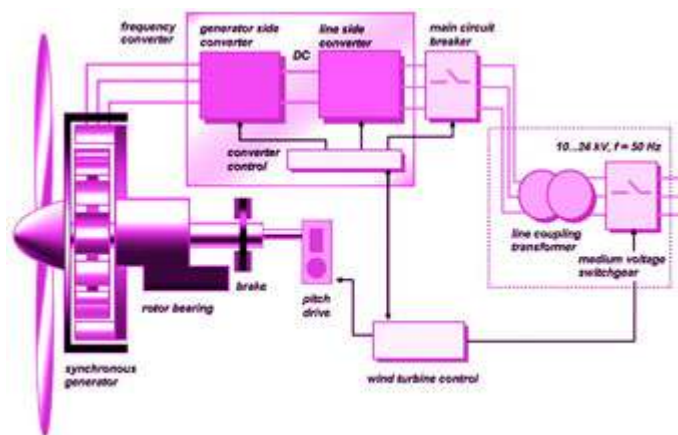


图 2 低速永磁同步发电机直驱系统图

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。

2.3 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 1~5mw，结构如图 3 所示。

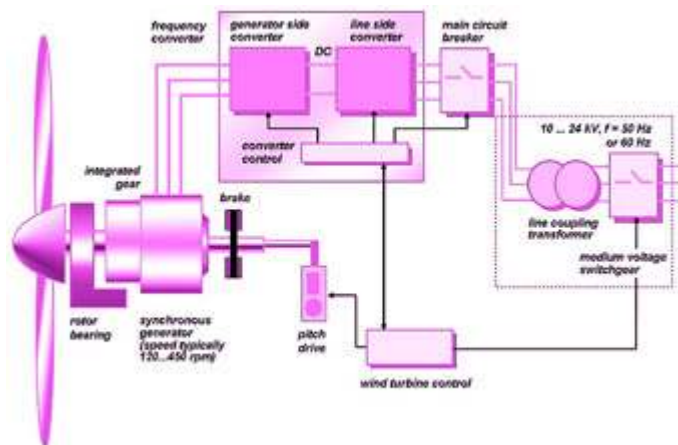


图 3 低速集成齿轮箱永磁同步风力发电系统图

2.4 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 1000~2000r/min，abb 变频器典型功率范围为 1~5mw，结构如图 4 所示。

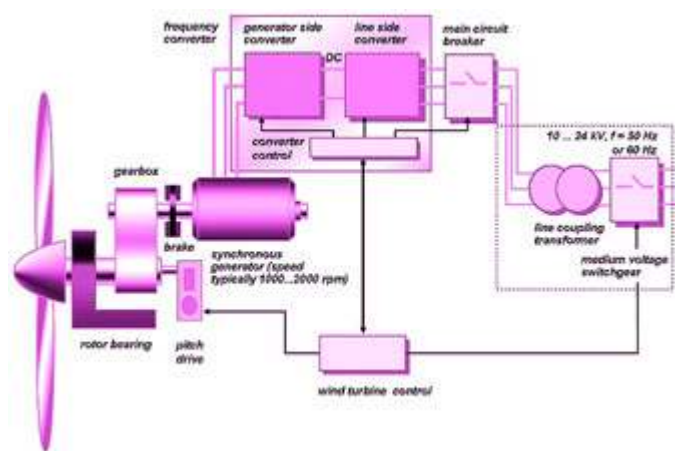


图 4 高速永磁同步风力发电系统图

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，这里主要介绍变频产品 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，电路图及控制原理^[1]所示。图中的 crowbar 可用来在电网出现异常情况时(例如电网失压或电网短路)防止直流母线过电压。 这里有两种 crowbar 可供选择。

(1) 无源 crowbar

无源 crowbar 测量直流母线电压，如果直流电压超过 1210v，就会触发 crowbar，传动单元立即可从电网切除。

(2) 有源 crowbar

对于要求传动单元在电网电压瞬变时仍然在网的场合，必须使用有源 crowbar，通过产生容性无功功率来支撑电网。crowbar 可以根据电网电压对转子侧变流器的影响开通或关断，保证了传动单元即使在电网电压快速变化时都能正常工作。

3.2 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，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。

4 应用案例

四川乐山东风电机厂采用 **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 5 所示。

技术数据如下所示：

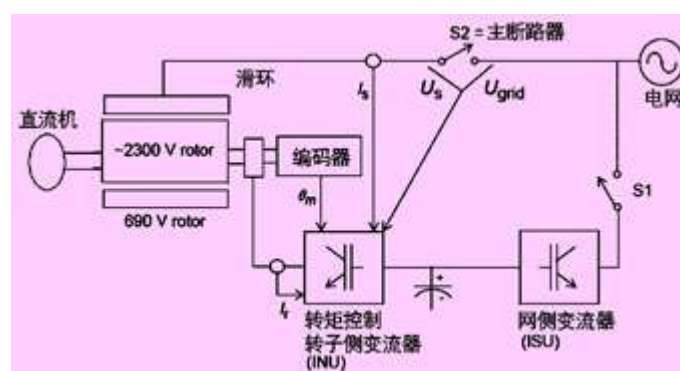


图 5 试验台系统连接图

(1) 发电机数据：

定子：额定电压 690v；额定电流 1095a；额定频率 50hz；发电功率 0~1310kw；同步转速 1500r/min；功率因数 0.87；

转子：开路电压 1955v；电流 372a；额定转速 1513 r/min；发电功率—50~250kw；

(2) 变频器型号：acs800—67—0480 / 0770—7；额定输入电流 400a，额定输出电流 645 a，调速范围 $\pm 30\%$ 。

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，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。同步运行步骤及波形如参考文献[1]所示。

4.2 发电运行

图 6 为发电机工作于欠同步状态(转子转速为 1300r/min)，给定转矩为额定转的 70%，功率因数为 1 时，发电机定子 u 相磁通和电流以及转子 u 相电流的波形图。

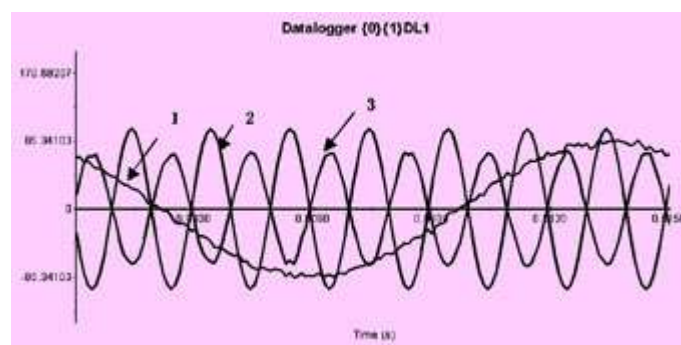


图 6 发电机定子 u 相磁通和电流以及转子 u 相电流的波形图

图 6 中：波形 1 为转子 u 相电流(rotor i_u [%])；

波形 2 为定子 u 相磁通(stator u flux[%])；

波形 3 为定子电流在 x-y 静止坐标系下的 y 轴分量(stator i_y [%])。

由电机内部电磁理论可知，定子 u 相磁通滞后 u 相电压 90° 电角度。

由电机三相绕组到两相绕组的坐标变换(3/2)可知(变换过程中始终保持旋转矢量幅值不变)，

定子电流在 x 轴上的电流分量超前 y 轴电流分量 90° 电角度，而 x 轴电流分量与定子 u 相电流同相，即定子 u 相电流超前 y 轴电流分量 90° 电角度。

由图 6 可知，曲线 2 超前曲线 3 是 180° 电角度，即定子 u 向磁通与定子 y 轴电流分量反相。

由电机内部电磁理论与 $3/2$ 坐标变换的关系可以发现，定子 u 相电压超前定子 u 相电流 180° 电角度，即定子 u 相电压和电流完全反相，电机工作于发电状态，且功率因数为 1。

图 7 为发电机工作于欠同步状态时(转子转速为 1300r/min)，给定转矩为额定转的 70%，功率因数为 1 时，发电机定子侧和转子侧发电功率波形图。

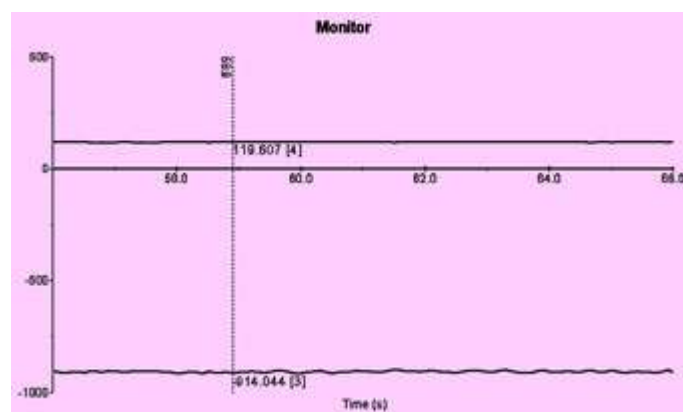


图 7 发电机定子侧和转子侧发电功率波形图

图 7 中：波形 1 为转子侧发电功率(kw)；波形 2 为定子侧发电功率(kw)。

由图 7 可知，由于转子转速低于定子磁场旋转的同步转速(1500r/min)，对于转子侧而言，从电网吸收电功率为发电机提供励磁磁场，此时转子侧所消耗的功率为 119.607kw。对定子侧而言，处于发电工作状态，将转子的动能转化为电能输出给电网，此时的发电功率为-914.044kw，因此，此时总的发电量为 $-914.044 + 119.607 = 794.437$ kw。

图 8 为发电机工作于超同步状态(转子转速为 1800r/min)，给定转矩为额定转的 100%，功率因数为 1 时，发电机定子 u 相磁通和电流以及转子 u 相电流的波形图。

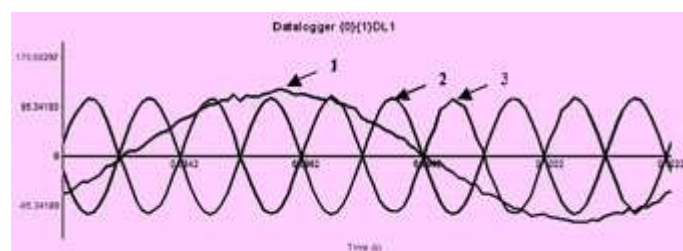


图 8 发电机定子 u 相磁通和电流以及转子 u 相电流的波形图

图 8 中：波形 1 为转子 u 相电流(rotor iu[%])；

波形 2 为定子 u 相磁通(stator u flux[%])；

波形 3 为定子电流在 x-y 静止坐标系下的 y 轴分量(stator iy[%])。

由图 8 可知，曲线 2 超前曲线 3 是 180° 电角度，即定子 u 向磁通与定子 y 轴电流分量反相。

由电机内部电磁理论与 $3/2$ 坐标变换的关系可以发现，定子 u 相电压超前定子 u 相电流 180° 电角度，即定子 u 相电压和电流完全反相，电机工作于发电状态，且功率因数为 1。

图 9 为发电机工作于超同步状态(转子转速为 1800r/m)，给定转矩为额定转矩的 100%，功率因数为 1 时，发电机定子侧和转子侧发电功率波形图。



图 9 发电机定子侧和转子侧发电功率波形图

图 9 中：波形 1 为转子侧发电功率(kw)；波形 2 为定子侧发电功率(kw)。

由图 9 可知，由于转子转速高于定子磁场旋转的同步转速(1500r/min)，对于转子侧而言，向电网发送电功率，此时转子侧所提供的功率为-261.454kw。对定子侧而言，处于发电工作状态，将转子的动能转化为电能输出给电网，此时的发电功率为-1298.24kw，因此，此时总的发电量为-1298.24-261.454=-1559.694kw，达到发电机的额定发电功率。

图 10 为发电机工作于超同步状态(转子转速为 1800r/min)，给定转矩为额定转矩的 100%，功

率因数为 0.91 时(无功功率给定[即参数组 24.01local react p ref]为 52%), 发电机定子 u 相磁通和电流以及转子 u 相电流的波形图。图 10 中: 波形 1 为转子 u 相电流(rotor iu[%]); 波形 2 为定子 u 相磁通(stator u flux[%]);

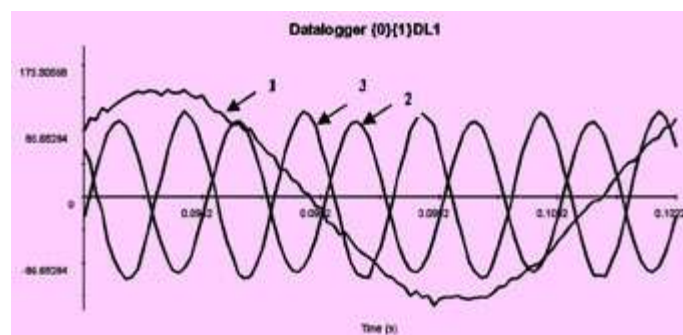


图 10 发电机定子 u 相磁通和电流以及转子 u 相电流的波形图

波形 3 为定子电流在 x-y 静止坐标系下的 y 轴分量(stator iy[%])。

由图 10 可知, 定子 u 相电压与电流不再是完全的反相关系, 而是超前电流 155° 电角度, 功率因数为 0.91。因此, 通过无功功率的调节, 可以实现网侧功率因数的调节。

5 结束语

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 已经成功应用于世界各地, 在国内得到了广大客户的普遍认可, 并运行于国内的各个风场, 这对于我国充分利用风能, 发展清洁能源, 起到了积极的促进作用。

作者简介

李时杰 男 博士, 电力电子与电力传动专业, 从事变频器的研究、普及及推广工作。

参考文献

[1] 李时杰. abb 变频器在风力发电行业的应用. 变频器世界, 2008(3)