

# 风力发电用功率调节器和变换器中的 电路与控制技术

Circuits and Controlling Technology of Power Conditioner and Converter for Wind Power Systems

邓隐北，张子亮

河南亮明电控设备有限公司 郑州 450044

**摘要：**风力发电中，由于风速的变化导致发出的功率变动，进而影响到系统的电压。为了大量的引入风力发电，必须确保系统中的电源质量。作为功率波动的补偿，有用于电力稳定化的功率调节器(PCS)，其中使用了AT—NPC三电平变换电路，不仅能大幅降低IGBT器件的开关损耗，而且削减了高次谐波成分，达到了工业界最高的效率98.1%。此外，当因雷击等系统电压下降时，还具备不与系统解列、可保持继续运转的（故障穿越）功能，实现了足以联网的电源品质。

**关键词：**风力发电，功率调节器，变换器，功率单元，永磁同步发电机，FRT功能，气流循环冷却

中图分类号：TN86 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2014)06-5-124

## 1 前言

从2012年7月以来，由于“可再生能源固定价格认购制度”的制定，不断促进了可再生能源的发展和引入。迄今，风力发电是以陆上风力的应用为主体，但为了提高发电效率的大容量化，以及选定安装场所的限制条件少和风况相对稳定，而加速了海上风电的开发。在未来风力发电大量引入之际，必须提高电力品质，平缓风力所发出的功率波动。对有利于确保电力品质的功率调节器(power conditioner)和风电用变换器其中的电路技术和控制技术介绍如下。

## 2 电力稳定化用 PCS

### 2.1 配置蓄电池型风力发电系统的结构

配蓄电池型风力发电系统的基本结构如图1所示。该系统的供电方式是在接于同步发电机的AC/DC变换器中，将风力发电机输出的交流变换为直流，接着，在DC/AC变换器中又将直流变成交流，再与系统连接。对于风力发电来说，功率与风速的3次方成比例，故稍微的风速变化就会引起大的功率变化。今后在风力发电引入量增加时，将会导致电力系统的功率变动和频率波动，因而导致电力品

质的下降。作为对此进行补偿的装置，有电力稳定化用的PCS。关于电力储存部分，按照用途不同，可选用铅酸蓄电池和锂离子电池。在DC/AC变换器中，控制着电力储存部分的充电、放电，使得因风力发电产生的功率波动能稳定化。

### 2.2 电力稳定化用“PCS—PV1750—3/500”

图2为电力稳定化用“PCS—PV1750—3/500”的外观图。  
(1) 系统结构 PV1750—3/500是由2台250kW的逆变器(图3)组成。因蓄电池模块(module)的交换、维护

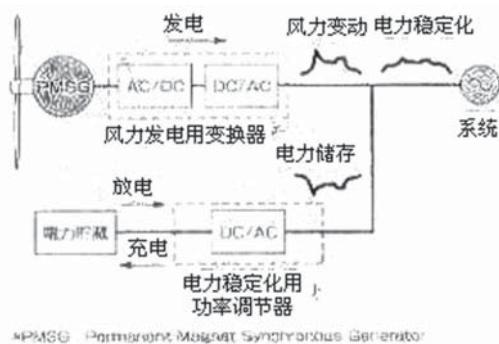


图1 配蓄电池型风力发电系统的整体架构

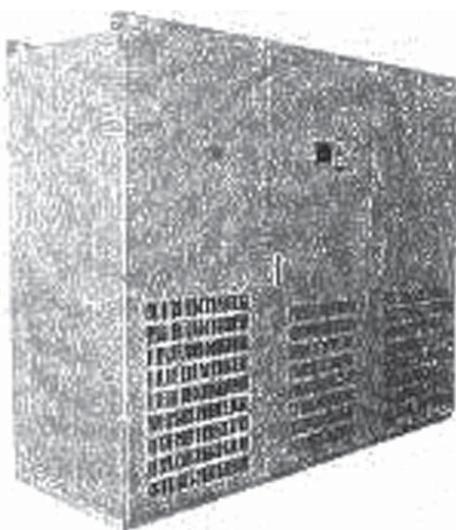


图 2 PV1750—3/500 外观图

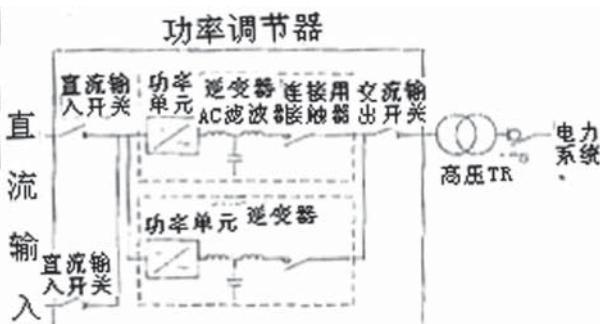


图 3“PV1750—3/500”的系统结构

均能个别进行，故将二个直流输入开关的二次侧接至一个直流连线（link）上。起动时，因各个逆变器将与系统同步的电压在输出状态下接通接触器，以和系统连接，能完成起动，故不会产生流向系统的突变电流。

逆变器的功率单元，由 AT—NPC（先进的 T 型中性点箝位）三电平 IGBT 模块、保险丝（fuse）和 LCL 滤波器组成（图 4）。三电平回路是早 在上世纪八十年代提出的方案，因当时不能提高 IGBT 元件的耐压等级而未得到普及。但是，在不需元件串联的逆变器中，能使通过输出电流的元件数减少，故具有可降低损耗的优点。

在要求反向耐压的直流中间与交流输出的连接开关采用了 RB—IGBT（反向阻塞型 IGBT），这一AT—NPC 三电平 IGBT 模块（图 4），富士电机公司已将其实用化。由此，能以原来二电平逆变器相同的模块数组成三电平逆变器，避免了回路的复杂化，可实现高效率的逆变器。

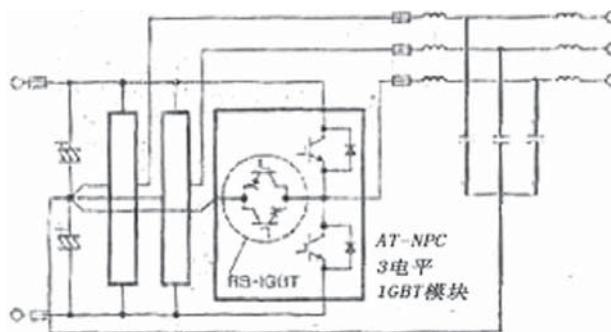


图 4 功率单元和滤波器回路

## (2) 规格

表 1 列出了 PV1750—3/500 的各项规格参数。表中的直流电压范围能适应于在低压下施工的 DC750V。PCS 输出的交流电压为 200V。此外，其效率曲线如图 5 所示。由于采用了 AT—NPC 三电平 IGBT 模块的变换回路，功率单元的开关损耗已大幅度下降。而且对于逆变器，包括输出脉宽调制（PWM）波形中的高次谐波成分比原来产品减少一半，由此，滤波器的损耗也降低，最终达到了工业领域的最高效率 98.1%（IEC—61683 效率裕度，不包括内部电源）。

表 1 PV1750—3/500 的规格

项目	规格
容量	500KVA
直流电压范围	1600A
最大输入电流	200V (-10--+10)
交流电压	200V (-10--+10)
频率	50/60Hz
功率因数	0.99
谐波畸变率	5%以下
最高效率	98.10%
欧洲效率	97.80%
内部电源容量最大值	900W
待机损耗	130W

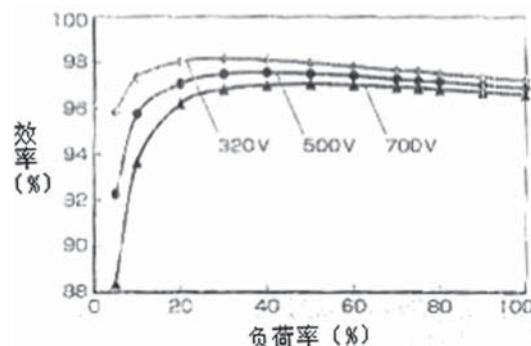


图 5 效率曲线

### (3) 特性 [FRT (故障穿越) 性能与逆变器控制方式]

在 PV1750—3/500 上标准配置了 FRT 功能，这是正在成为新能源所必须的故障穿越功能。所谓 FRT 功能，意味着即使在系统中产生三相短路或二相短路的事故时，逆变器在规定范围内（在各国所要求的瞬时降低时间和电压下降范围内），仍输出三相电流，仍能抑制系统的电源变动进行操作且继续运转。这一 FRT 功能在欧洲和美国已形成义务化：在日本，2013 年以来引进的机器上也在实行义务化。而且，作为 FRT 功能，要求的残存电压与继续时间在每个国家是不同的。因此，即使残存电压在 0%，也是有可能继续运转的。控制电源，可选择外部供给或从系统的本身提供。1 秒钟以内的瞬间断开，由内部的电容器支持（back up），超过 1 秒钟 FRT 继续时间的情况下，则采取相应的选件（option）解决，可实现成本与要求规格的两面兼顾。

在控制验证机（10kW）上进行了 FRT 功能的操作验证。当 0% 的残存电压时，通常处于栅极锁定（gate-lock）状态。由于进行 OA 控制而持续运转。残留电压 20% 时，如图 6 所示，从发生瞬时降低 6ms 以后，断续的栅极锁定不会发生。已确认，约 2 个周期后能输出额定电流。因此，瞬时下降发生时 PCS 仍能继续运转，这点已得到确认。

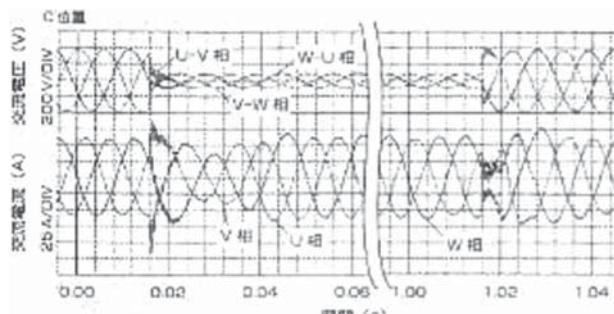


图 6 FRT 功能的操作验证波形

## 3 风力发电用的变换器

图 7 所示为风力发电机由多线圈构成的情况。1500kVA 变换器盘 2 台并联连接。变换器盘，由 500kVA 水冷功率单元的 3 个并联 DC/AC 变换器、斩波器，以及耗能用的阻抗器组成。这一斩波器是在系统异常时，控制 DC/AC 变换器使得直流中间电压不致上升的器件。水冷功率单元为 3 个并联的插入式（Plug-in）结构，因变换器盘为 2 个并联，维护方便，故障时，在键盘上仍可运转，因而提高了其使用效率。表 2 为风力发电用变换器的规格。

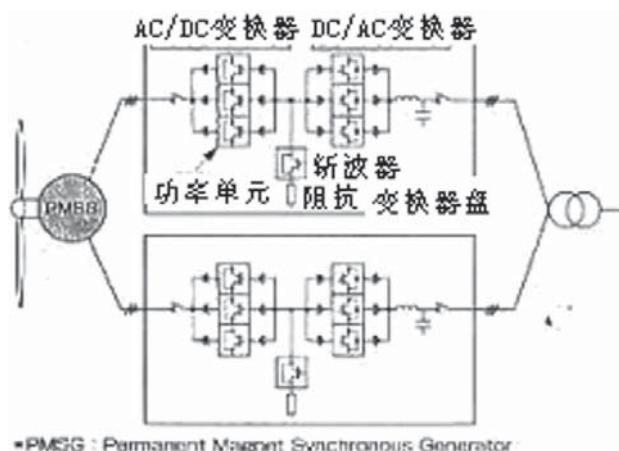


图 7 风力发电装置（同步发电机）

表 2 风力发电用变换器的规格

项目	规格
容量	1,500kVA × 2(3,000kVA)
额定有功功率	1,350kW
额定无功功率	650kVar
额定电压	200V (-10~+10)
额定电流	1,255A
频率	50/60Hz
功率因数	0.99
谐波畸变率	5%以下
最高效率	97.80%

### 3.1 水冷功率单元

采用了富士电机公司制造的 IGBT “6MB1450V—170—50”的水冷功率单元，是由水冷散热片，直流中间用薄膜电容器，散热器（radiator）风扇，栅极驱动（gate drive），保护监视电路等组成。这一功率单元因采用插入式结构，提高了其维护性，且对已故障单元也能间隔一段时间再运转。为了实现这，在功率单元插入前后，将阻抗保持一定，把叠片式汇流条（lamelat bus bar）与共模式电缆心线（common mode core）组合一起，由此，可取得各个功率单元之间的电流均衡。横向电流被控制在 5% 以下。为适应需要，即使卸下哪个位置的功率单元，也能继续运转。图 8 为水冷功率单元与变换器盘的外观。

在控制装置与功率单元之间，通过光纤（fiber）连接。从控制装置输出的门脉冲（gate）信号，对功率单元的故障信息进行通信。而且，还对作为本身监视功能的桥臂（arm）短路，元件温度异常，单元内的温度异常，过电流

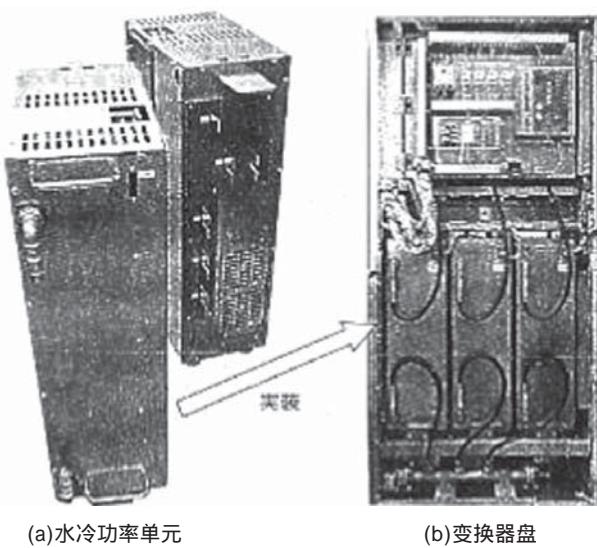


图 8 水冷功率单元 (500kVA)

保护，栅极电压异常等进行检测，在进行异常判定保护的同时，也将信息发送至控制装置。

### 3.2 利用散热器的盘内气流进行循环冷却

适用于风力发电的变换器盘，应能适应海上等环境，防护等级为 IP54。采用了变换器外面气体不能进入的气密结构。为此，冷却系统如图 9 所示，是将散热器风扇单元实装在功率单元内。同时，在过滤器用的电抗器附近也进行配置。利用风扇的强制气流循环，对变换器盘内进行冷却。

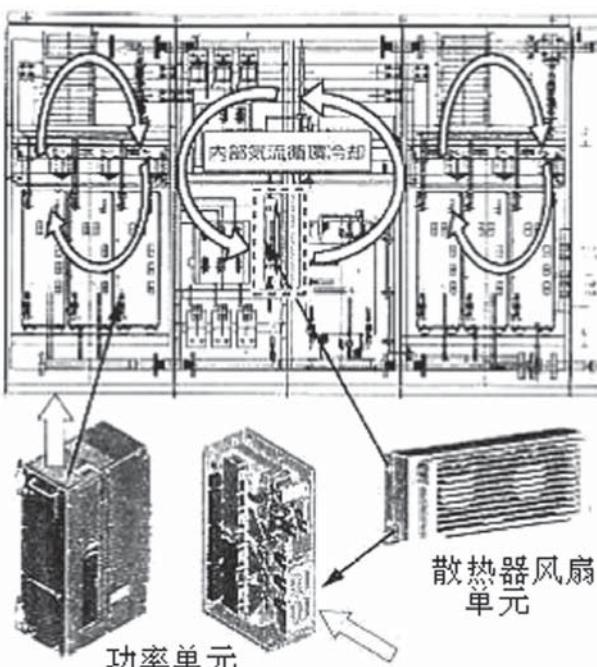


图 9 利用散热器的内部气流循环冷却

### 3.3 系统并联

伴随着今后风力发电容量的扩大，应抑制预想的对电力增大的影响度，和提高使用效率的要求。如图 7 所示，两个变换器盘对着发电机并联运行，由此，无论哪个盘因故障停止，会将来自健全变换器盘的转矩降低请求指令发出信息，因而利用风力发电机叶片 (blade) 的变桨距 (pitch) 控制，进行减少容量的运转，这是在健全变换器盘的容许功率范围内，能实现可连续运转的系统。

### 3.4 系统电压稳定控制

由于风力发电的变动将引发系统电压的变动。为此所采取的对策是：配备以下两种无功功率控制功能，力图提高补偿性能。

#### (1) 利用功率因数一定指令的无功功率控制

按照预先设定的功率因数供给无功功率，适用于限制对系统电压影响的场合。尤其是，不需要控制电力系统电压和功率因数的系统控制器。

#### (2) 利用来自系统控制器的指令进行控制

从系统控制器，发送出各个风力发电装置的指令。适用于正确控制连接点电压的场合。

由此，即使不刻意配置 SVC (静态无事故补偿器) 等设备，也能将系统电压控制在容许范围内。

### 3.5 FRT 功能

在联网的系统中，光伏发电和风力发电等发电容量增加、其重要性也增加的场合，由闪电雷击及系统事故导致系统电压下降，导致这些新能源一齐与系统解列，使得系统功率不足陷于停电的危险性提高。为了具有避免解列、停电的功能，就是如 2.2 节所述的 PCS 同样的 FRT 功能。即使出现系统紊乱也能确保继续运转。

所谓系统事故，有三相短路和二相短路等各种各样的现象。此时，产生系统三相电压的不平衡和相位的跳跃。能通过对变换器的控制而不需相应这一现象的过负荷跳闸 (trip)，不管系统的任何变化也能高速地跟踪，为继续稳定运转的技术有以下三点。

(1) 系统电压下降时发电的功率不能向系统输出情况下，由装置内的斩波器 (限制器，chopper) 和阻抗来消耗功率。

(2) 为了跟踪系统电压的突变，通过变换器的系统电压检测处理，按照调正带通滤波器 (band-pass filter) 与相

位的正弦波，作成变换器的基本电压指令，使波形的响应性提高。

(3) 从系统残存电压 0% 起动时，为减少波形畸变，和进行稳定的控制，对从系统电压生成的第三次谐波波形，与控制装置内部存在的 PWM 载波 (carrier) 同步的第三次谐波表格数据进行同步控制 (图 10)。

按照上面所述，将 PWM 载波经过 0.1 秒左右则可在基本波上实现同步。通过控制验证用的试验机 (3Kw) 所获得的 FRT 工作特性，如图 11 所示。实现了系统异常时的输出电流、输入电流一起稳定的运转。

(注 : \*IP54 : IEC60529 规定的有关防尘、防水的保护等级 ; \* 解列 : 发电设备等从电力系统分列出来 )

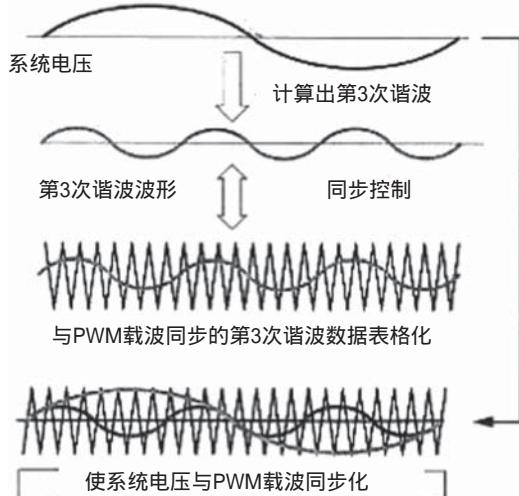


图 10 系统电压与 PWM 载波的同步

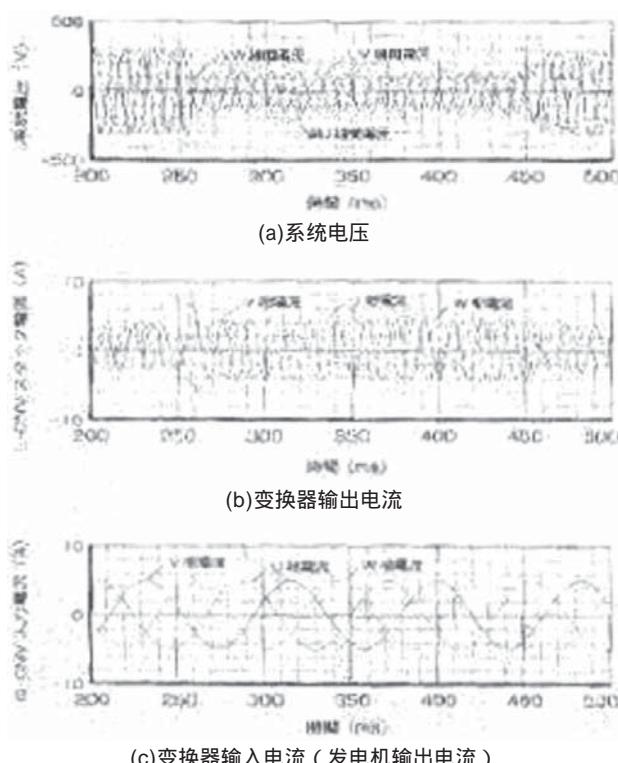


图 11 由控制验证机上得到的FRT工作特性

#### 4 结束语

本文阐述了风力发电的功率调节器和变换器中有关的电路与控制技术。今后，针对风力发电系统的大量引入，应进行更好的技术开发。对于环境的适应性，电力的高品质、高效率化，由继续运转达到的使用效率提高，电源干扰的抑制等控制技术以及功率变换器回路技术均能予以实现，这正是我们所期待的。