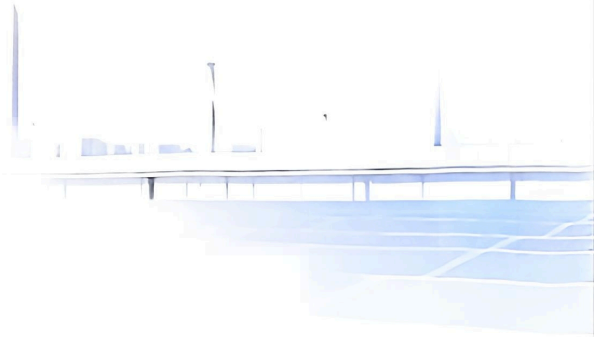
“十四五”职业教育国家规划教材

高等职业教育
电气类新形态一体化数字教材

风光发电技术及应用

主　编　罗宇强　谢锡锋　王江伟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材以现行工程实践中涉及的太阳能光伏发电技术和风力发电技术需求基础理论为主，以典型实践工作任务为载体，按照“任务引领、行动导向”的职业教育教学理念，将太阳能光伏发电系统的构成、安装、运行、调试和维护以及风力发电系统的组成、选型、运行和维护相关知识与技能有机融合，让学习者在完成典型的工作任务过程中，掌握太阳能光伏发电技术和风力发电技术相关知识。全教材涵盖了太阳能光伏发电技术、风力发电技术、分布式发电和智能微电网三方面内容。

本教材可供高职高专院校类电气类相关专业作为太阳能光伏发电技术及应用、风力发电技术及应用课程使用，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

风光发电技术及应用 / 罗宇强，谢锡锋，王江伟主编. -- 北京 : 中国水利水电出版社，2018.3(2023.8重印)
普通高等教育高职高专“十三五”规划教材. 电气类
ISBN 978-7-5170-6333-9

Ⅰ. ①风… Ⅱ. ①罗… ②谢… ③王… Ⅲ. ①风力发电系统－高等职业教育－教材②太阳能发电－高等职业教育－教材 Ⅳ. ①TM614②TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第035226号

书　名	普通高等教育高职高专“十三五”规划教材　电气类 **风光发电技术及应用** FENGGUANG FADIAN JISHU JI YINGYONG
作　者	主　编　罗宇强　谢锡锋　王江伟
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路1号D座　100038） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@mwr.gov.cn 电话：（010）68545888（营销中心）
经　售	北京科水图书销售有限公司 电话：（010）68545874、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　版	中国水利水电出版社微机排版中心
印　刷	天津嘉恒印务有限公司
规　格	184mm×260mm　16开本　20.25印张　493千字
版　次	2018年3月第1版　2023年8月第3次印刷
印　数	4001—6000册
定　价	58.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

目录 MULU

前言

项目1　认识太阳能资源 …… 1
任务1.1　认识太阳辐射 …… 1
任务1.2　认识太阳方位角和高度角 …… 8
任务1.3　认识太阳能资源计算与分区 …… 14

项目2　选型太阳能光伏电池组件 …… 21
任务2.1　认识太阳能光伏电池发电原理 …… 21
任务2.2　了解太阳能光伏电池分类 …… 29
任务2.3　测试太阳能光伏电池特性 …… 36
任务2.4　设计太阳能光伏电池组件阵列 …… 42
任务2.5　安装与维护太阳能光伏电池方阵 …… 51
任务2.6　调试光伏组件跟踪太阳方法 …… 54

项目3　光伏控制器和逆变器 …… 60
任务3.1　认识太阳能光伏控制器 …… 60
任务3.2　认识太阳能光伏逆变器原理 …… 67
任务3.3　太阳能光伏逆变器选型 …… 77

项目4　蓄电池和储能装置 …… 87
任务4.1　蓄电池选型 …… 87
任务4.2　蓄电池充放电特性测试 …… 92
任务4.3　了解电池组的应用 …… 102
任务4.4　认识其他储能装置 …… 108

项目5　设计太阳能光伏发电系统 …… 115
任务5.1　了解太阳能光伏发电系统及相关设备、部件 …… 115
任务5.2　调试光伏最大功率点跟踪方法 …… 124
任务5.3　设计独立光伏发电系统 …… 135
任务5.4　设计并网型光伏发电系统 …… 147
任务5.5　安装太阳能光伏发电系统 …… 161
任务5.6　调试、检查和维护太阳能光伏发电系统 …… 171

项目6　认识风能资源与风能利用 …… 184
任务6.1　认识风能资源及其计算 …… 184

任务 6.2　认识风能的利用 …… 193
项目 7　了解风力发电系统 …… 207
任务 7.1　了解风力发电组成 …… 207
任务 7.2　了解定桨、变桨风力发电机组 …… 217
任务 7.3　了解风轮机的调向、调速和保护装置 …… 228
任务 7.4　调试最大风能追踪方法 …… 234
任务 7.5　了解大型风力发电机组功率控制 …… 239
任务 7.6　了解大型风电场电力输送及并网 …… 246
任务 7.7　了解风光发电互补系统 …… 252
项目 8　选址风电场、选型及运行风电机组 …… 262
任务 8.1　选址风电场 …… 262
任务 8.2　选型风力发电机组 …… 273
任务 8.3　安装风力发电机组 …… 281
任务 8.4　远程监控与运行风电场 …… 286
项目 9　运行与维护分布式发电系统与微电网系统 …… 296
任务 9.1　运行与维护分布式发电系统 …… 296
任务 9.2　运行与维护微电网系统 …… 303
参考文献 …… 313

（5）在压接接线端子时，剥开的线芯插入接线端子套时，将所有的线芯全部插入端子中；采用压线钳压接接线端子时，应使压痕在接线端子套的底部（反面），压接后，压接部位不允许有导线外露。

（6）对设备运行数据观察到位，记录正确，记录参数数据包含数值和单位。

4. 任务成果及考核评价

（1）系统调试正确且成功运行、数据界面运行数据正确，能记录运行数据，曲线绘制平滑，布局合理，占 90%。

（2）操作过程展现较好职业素养，做到 7S 管理，占 10%。

【习题】

1. 水平轴风轮机中常用的调向装置，其结构依风轮机功率的大小有哪些不同形式？
2. 风轮机的调速方法及装置有多种多样，常用的有哪几种？
3. 水平轴风轮机的保护装置有哪些？它们的分别起到什么作用？

任务 7.4　调试最大风能追踪方法

编写40分钟教案

【学习目标】

知识目标：了解最大风能跟踪的含义；掌握最大风能跟踪的常用方法。

能力目标：能调试常用的最大风能跟踪方法。

素养目标：培养严谨细致、团队协作的职业精神。

重点：最大风能跟踪的方法。

难点：风机最大功率输出的运行与监测。

【任务分析】

最大风能跟踪是实现最大风能捕获的控制方法，目的就是尽最大可能地接近贝兹理论极限值曲线，从而获得最大风力发电功率，提高风能的利用效率。

依托全国职业院校技能大赛“风光互补发电系统安装与调试”设备平台，完成风力发电系统的运行与监测。

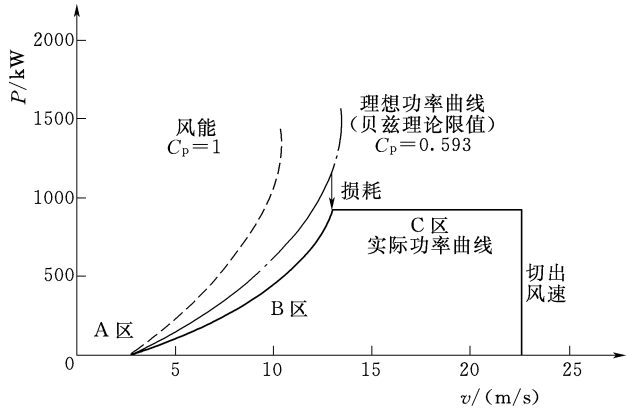


图 7.23　功率曲线

【知识学习】

变速风电机组主要运行在如图 7.23 所示的 3 个区。其中，5m/s 风速左侧的实线部分属于 A 区，主要完成风电机组的启动；5～14m/s 风速之间的实线部分属于 B 区，主要实现发电机的最大风能捕获。采用各种控制策略的目的就是尽最大可能地接近贝兹理论极限值曲线。改变节距角，使风速达到

或超过额定风速后，风电机组的功率达到额定功率。

实现最大风能追踪控制，使风力机的转速迅速跟踪风速变化，风力发电机始终保持在最佳叶尖速比上运行，从而最大限度地获得风能。

7.4.1　叶尖速比控制

不同风速下风力机输出机械功率随叶轮转速变化而变化，每一种风速下都存在个最大输出功率点，对应于最大的风能转换系数 C_{pmax}。将各个风速下的最大输出功率点连接起来，就可以得到风力机输出机械功率的最佳曲线 P_{max}。要使风力机运行在这条曲线上，必须在风速变化时及时调节叶轮转速，以保持最佳叶尖速比。

叶尖速比控制的就是，使系统在风速变化时保持一个最优的叶尖速比。获得最大的输出功率。该方法简单，但实现起来并不容易，因需要增加风速仪，不仅增加了成本，同时也给系统维护带来困难。

7.4.2　功率信号反馈

在风速和桨叶节距角一定时，总存在一个最佳叶尖速比 λ_{opt}，对应着一个最大的风能转换系数 C_{pmax}，此时能量转换效率最高。针对一个特定的风速，只有运行在一个特定的机械角速度下，风力机才会获得最大的能量转换效率。因此，在任何风速下，只要调节风力机转速，使其叶尖线速度与风速之比保持不变，并且都满足又 $\lambda=\lambda_{opt}$，就可以维持风力机在 C_{pmax} 下运行，这就是功率信号反馈法实现最大风能捕获的原理。

功率信号反馈控制方法按照输出功率选择相应的转速，得到一个恒定的叶尖速比。这种方法的缺点是输出的功率——风速曲线很难获得，而且对于不同的叶轮，这种曲线是不同的。

7.4.3　爬山搜索法

爬山搜索法主要用于直驱式风力发电系统中。图 7.24 所示为典型的直驱式风力发电系统拓扑结构，虚线框内的电路为 buck－boost 电路。在 t_{on} 期间，VT 导通、VD 反偏关断，此时的电感电压 $U_L=U_{in}$；在气 t_{off} 期间，VT 关断，电感储能以自感电势形式释放，VD 导通。此时，负载电压平均值与输入电压极性相反，并且认 $U_L=U_o$。一个周期内电感电压积分平均值为零，即

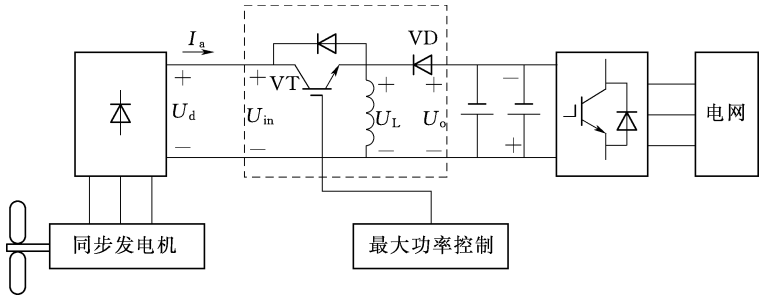


图 7.24　典型的直驱式风力发电系统拓扑结构

$$U_{in}t_{on}+U_o t_{off}=0 \tag{7.2}$$

占空比 d 定义为

$$d=\frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}} \tag{7.3}$$

因此，可得

$$\frac{U_o}{U_{in}}=\frac{d}{d+1} \tag{7.4}$$

式（7.4）说明，当占空比 $d\leqslant 0.5$ 时，$U_o\leqslant U_{in}$，输出电压 U_o 下降；当占空比 $d>0.5$ 时，$U_o>U_{in}$，输出电压 U_o 上升，并且输入、输出电压反极性。

图 7.25 所示为风力发电机的输出功率特性曲线，由 A、B 两部分组成。

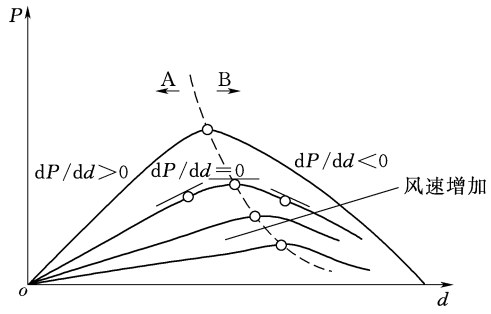


图 7.25　风力发电机的输出功率特性曲线

（1）在 A 区，$dP/dd>0$，当 $dP>0$ 且 $d>0$ 时，工作点向最大功率处靠近。此时，为使系统工作在最大功率处，需继续增加 d；当 $dP<0$ 时，需要改变工作点的移动方向，同时增加 d。

（2）在 B 区，$dP/dd<0$，当 $dP>0$ 且 $dd<0$ 时，工作点向最大功率处靠近，为使系统工作在最大功率点处，需继续减小 d；当 $dP<0$ 且 $dd>0$ 时，工作点背离最大功率点处，需改变工作点的移动方向，同时减少 d。

7.4.4　最大功率小信号扰动法

最大功率小信号扰动法主要用于直驱式风力发电系统中。如图 7.26 所示，最大功率控制小信号扰动法即在系统注入小幅正弦波信号，该信号与控制器输出信号重叠后形成斩波器控制信号。其中，控制器输出信号是通过采样正弦波信号极大值点和极小值点对应的输出电流，再对该采样值的差值进行积分得到的。假设正弦波扰动信号的幅值为 D_m、角频率为 ω，当系统工作在 A 区时（假定系统工作在 a_1 点），对应的占空比为 d_1，正弦波信号产生的扰动量在 d_2 和 d_3 之间连续变化，则此时瞬时占空比 d 为

$$d=d_1+D_m\sin\omega t_0 \tag{7.5}$$

在输出电压恒定时，输出功率与输出电流成正比。当测得来自电流检测回路的电流时，占空比 d_1 为

$$d_1=k\int(I_2-I_3)\mathrm{d}t \tag{7.6}$$

从图 7.25 中可以看出：

（1）系统工作在 A 区时，随着占空比的增大，系统输出功率增大，此时，占空比 d 应向顶点方向增大。

（2）当系统工作在 B 区时，随着占空比的增大，系统输出功率减

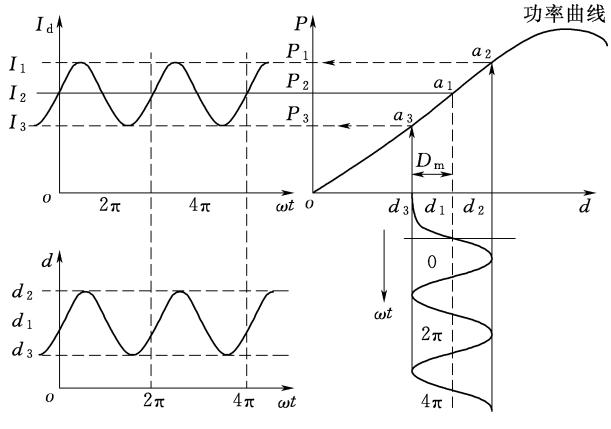


图 7.26　最大功率扰动法控制原理

小，此时，占空比 d 应向顶点方向减小。

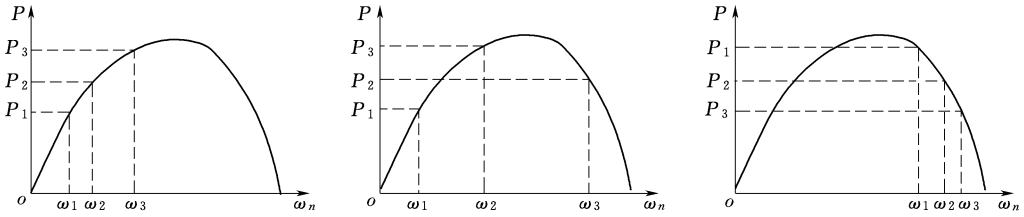
（3）当 $I_2=I_3$ 时，$\Delta d=0$，占空比稳定在最大点上。

（4）当系统达到最大点时，输出电流和扰动信号之间的相位差为 90°。

利用小信号扰动法可以实现系统平均功率达到最大值，并且该方法简单，易于实现。

7.4.5　三点比较法

如图 7.27 所示，针对某特定风速，在风力机输出功率与机械角速度的关系曲线上取 3 个功率进行比较，然后再根据这 3 个输出功率比较的大小来调节机械角速度从而实现最大风能的追踪。



（a）$P_1<P_2<P_3$　　（b）$P_1<P_2$ 且 $P_2>P_3$　　（c）$P_1>P_2>P_3$

图 7.27　风力机输出功率与机械角速度的关系曲线

（1）当出现图 7.27（a）所示的情形时，应继续增加机械角速度 ω_1，实现最大功率的追踪。

（2）当出现图 7.27（b）所示的情形时，应在机械角速度 $\omega_2\sim\omega_3$ 调节，实现最大功率的追踪。

（3）当出现图 7.27（c）所示的情形时，则减少机械角速度 ω_1 来追踪最大的风能。

三点比较法的特点为简单、易于实现，取三点不同的机械角速度下输出功率，能够准确快速追踪到最大功率点。缺点是因风速的随意性与不确定性，势必会因取点误差引起误操作。

7.4.6　实时追踪最大风能法

试讲10分钟内容

风力发电机转子最佳角速度为

$$\omega_{\mathrm{opt}}=\frac{V\lambda_{\mathrm{opt}}}{R}\Rightarrow V=\frac{R\omega_{\mathrm{opt}}}{\lambda_{\mathrm{opt}}} \tag{7.7}$$

风速是常常变化的，测量也比较困难，存在误差。为了避免测量速度，用式（7.7）来代替风速，则风力机输出的最大功率为

$$P_{\mathrm{m}}=0.5\rho\pi R^2 C_{\mathrm{pmax}}(\lambda_{\mathrm{opt}},\beta)\left(\frac{R\omega_{\mathrm{opt}}}{\lambda_{\mathrm{opt}}}\right)^3 \tag{7.8}$$

最大风能追踪方法实施步骤如下。

（1）选择一个初始转子角速度，同时测出风力机对应的输出功率。

（2）通过选择一个步长 ω_{step} 来增加或减少转子的角速度，同时检侧其输出功率。

（3）计算 $\mathrm{sgn}(\Delta P)$ 和 $\mathrm{sgn}(\Delta\omega)$。

（4）$\omega_{\mathrm{ref}}=\omega_{\mathrm{ref}}(n-1)+\mathrm{sgn}(\Delta P)\mathrm{sgn}(\Delta\omega)\omega_{\mathrm{step}}$。

（5）不断从步骤（3）开始重复，直到达到最大功率点。

如图 7.28 所示，假设风速为 V_1 时，风力发电机工作在 A 点，曲线表示的坐标为（ω_A，P_A）。现假设转子角速度增加一个步长 ω_{step}，增加到 ω_B 点，新的运行工作点的坐标为（ω_B，P_B），从而有

$$\left.\begin{aligned}\Delta P=P_B-P_A>0\Rightarrow \mathrm{sgn}(\Delta P)=1\\ \Delta\omega=\omega_B-\omega_A>0\Rightarrow \mathrm{sgn}(\Delta\omega)=1\end{aligned}\right\}\Rightarrow\omega_{ref}=\omega_A+\omega_{step} \tag{7.9}$$

继续增加一个步长到达工作点（ω_C，P_C），用同样方法继续增加步长直到跟踪到达最大工作点（ω_1，P_1）。假如风速突然增加到 V_3，新的工作点的曲线坐标为（ω_D，P_D），从而有

$$\left.\begin{aligned}\Delta P=P_D-P_1>0\Rightarrow \mathrm{sgn}(\Delta P)=1\\ \Delta\omega=\omega_D-\omega_1=0\Rightarrow \mathrm{sgn}(\Delta\omega)=1\end{aligned}\right\}\Rightarrow\omega_{ref}=\omega_1+\omega_{step} \tag{7.10}$$

同样，增加一个步长到达（ω_E，P_E）点，依此类推直到找到在风速 V_3 的情况下的最大功率点（ω_3，P_3）。现在假设风速变化到 V_2，工作运行点为（ω_F，P_F），从而有

$$\left.\begin{aligned}\Delta P=P_F-P_3<0\Rightarrow \mathrm{sgn}(\Delta P)=-1\\ \Delta\omega=\omega_F-\omega_3=0\Rightarrow \mathrm{sgn}(\Delta\omega)=1\end{aligned}\right\}\Rightarrow\omega_{ref}=\omega_3-\omega_{step} \tag{7.11}$$

这种情况应减少一个步长到工作运行点（ω_G，P_G）。

$$\left.\begin{aligned}\Delta P=P_G-P_F>0\Rightarrow \mathrm{sgn}(\Delta P)=1\\ \Delta\omega=\omega_G-\omega_F<0\Rightarrow \mathrm{sgn}(\Delta\omega)=-1\end{aligned}\right\}\Rightarrow\omega_{ref}=\omega_F-\omega_{step} \tag{7.12}$$

在这种情况下，减少角速度到运行点（ω_G，P_G），直至到达在风速 V_2 情况下的最大功率点（ω_2，P_2）。

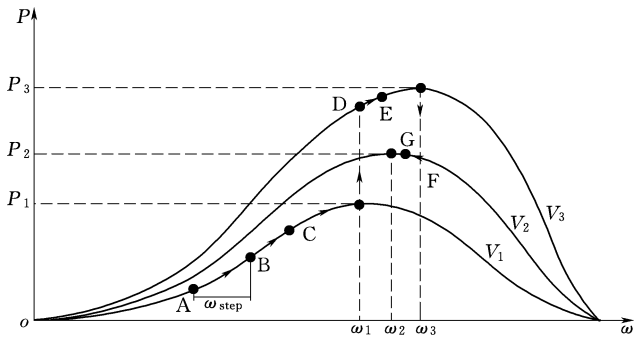


图 7.28　调节转子运行工作点来实现的最大风能追踪

实时追踪最大风能法简单，易于实现操作，无需测量风速并能够实时跟踪最大风能。

【任务实施】

1. 任务准备

“风光发电系统安装与调试”竞赛设备平台 1 个、一字螺丝刀 1 把、十字螺丝刀 1 把、剥线钳 1 把、U 型压线钳 1 把、管型压线钳 1 把、万用表 1 个、上电检查记录表 1 份、风力发电系统运行与维护记录表 1 份、导线若干。

2. 任务内容及步骤

任务 1：风资源控制系统搭建。

任务内容：完成风资源控制系统的接线与设计。

任务步骤：

（1）完成风资源控制系统连接导线的制作。

（2）按照接线图，完成风资源控制 PLC 和继电器模块的布线与接线。

（3）按照接线图，完成风资源控制变频器模块的布线与接线。

（4）按照接线图，完成工控机上风资源控制界面设计。

（5）完成系统上电检查，正确调试与运行风资源控制系统。

电子资源



任务 7.4 相关任务实施图表

任务 2：风力发电系统运行与监测。

任务内容：完成风力发电系统的运行与监测。

任务步骤：

（1）控制特定风向不同风速下风力发电系统的运行，填写风力发电系统运行与维护记录表。

（2）控制特定风速不同风向下风力发电系统的运行，填写风力发电系统运行与维护记录表。

（3）控制不同风速和风向下风力发电系统的运行，填写风力发电系统运行与维护记录表。

3. 技能要求

（1）正确使用万用表档位进行不同参数的测量，操作规范，无短路、无错档测量。

（2）正确测量风力发电系统运行电压、电流等参数。

（3）U 型冷压端子在插入端子排时，U 型部分应充分插入，并保证正面朝外。

（4）号码管在套入时，所有接线方向垂直于地面的套管，号码及字母组合读序从远离接线端至接线口，所有接线方向平行于地面的套管，号码及字母组合读序从左至右。

（5）在压接接线端子时，剥开的线芯插入接线端子套时，将所有的线芯全部插入端子中；采用压线钳压接接线端子时，应使压痕在接线端子套的底部（反面），压接后，压接部位不允许有导线外露。

（6）对设备运行数据观察到位，记录正确，记录参数数据包含数值和单位。

4. 任务成果及考核评价

（1）系统调试正确且成功运行、数据界面运行数据正确，能记录运行数据，曲线绘制平滑，布局合理，占 90％。

（2）操作过程展现较好职业素养，做到 7S 管理，占 10％。

【习题】

最大风能追踪方法有哪些？

任务 7.5　了解大型风力发电机组功率控制

【学习目标】

知识目标：了解大型风电机组变桨距控制方法及其技术；了解变速恒频双馈风力发电机控制方法及其技术。