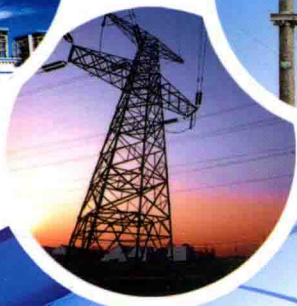


电力系统 新技术应用

宋云亭 丁剑 唐晓骏 吉平等 编著

Application of New Technology
In Power System



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

主要内容

电力系统 新技术应用

宋云亭 丁剑 唐晓骏 吉平等 编著

Application of New Technology
In Power System

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着智能电网、通信技术、网络技术的不断发展,许多新技术都在电力系统中得到了实际应用。本书归纳整理了发电、输电、配电、用电、储能各个环节以及电网分析与控制领域的新技术,对这些技术的优缺点、应用情况进行介绍,为读者了解国内外电力系统的新技术应用提供有益借鉴。

本书可供从事电力系统规划、运行、控制及管理工作的工程技术人员学习使用,也可供高校电气工程专业师生和从事电力系统研究工作的人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统新技术应用/宋云亭等编著. —北京:中国电力出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-5198-1223-2

I. ①电… II. ①宋… III. ①电力系统-新技术应用 IV. ①TM7-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 240914 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 刘丽平 王蔓莉 (010-63412791)

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 张俊霞 赵姗姗

责任印制: 邹树群

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

版 次: 2018 年 3 月第一版

印 次: 2018 年 3 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 12

字 数: 258 千字

印 数: 0001—1000 册

定 价: 50.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

《电力系统新技术应用》

编 委 会

宋云亭	丁 剑	唐晓骏	吉 平	汤 伟	苗 森
刘柏私	柯贤波	项 丽	刘英志	姜 宁	王京景
杨晓东	张 鑫	陈 湘	王 青	陈得治	申旭辉

作 者

2017 年 1 月

中国电力出版社

前言



随着我国电力需求的快速增长以及全国联网战略的实施，我国电网的互联程度不断提高，规模日益扩大。而我国能源和负荷分布不均衡的特点决定了在未来较长的发展时期内，国家电网仍将以大规模电源接入电网、通过特/超高压长距离交直流大规模电力输送为主要特点。如何保证如此大规模巨型电网的安全、可靠、经济、清洁运行将成为我国电力系统未来 20 年面临的关键性和迫切性的问题，其所涉及的技术十分复杂。

随着欧美等主要发达国家对能源供应安全、应对气候变化等重大问题关注度的不断提高，尤其是在金融危机情况下对新技术产业带动作用的期待，近年来智能电网已成为世界范围内的研究热点和关注重点。欧美等发达国家根据各自电网及资源的特点，立足于各种发展动因，相继提出了各自的电网发展战略构想。在这些电网发展目标下，能源结构和相应发电技术以及电力系统的发展将更多地考虑对环境 and 生态的影响，太阳能、风能等清洁能源将会有更大的发展，所占比例越来越大；新型输电技术和控制技术的应用，使电网的复杂程度日益加剧；信息技术、计算机技术、电子技术、新材料等渗透到电力工业的各个方面，电力系统将进一步提高其可观测性和可控性，也更注重提高电网运行的安全性、经济性和控制的灵活性。所有这一切，在提高电力系统先进性的同时，也对电网相关技术的发展提出了更高的要求。

为了应对上述电网发展面临的挑战，本书总结了电力系统发、输、配、用、储各环节新技术和电网分析与控制领域的新技术及其应用情况。

囿于作者水平，对于书中疏漏和不足之处，恳请广大读者不吝赐教，意见和建议请发送至 songyunting@tsinghua.org.cn，谢谢！

作 者

2017 年 7 月

于 中国电力科学研究院

目录



前言

第一篇 发、输、配、用、储新技术

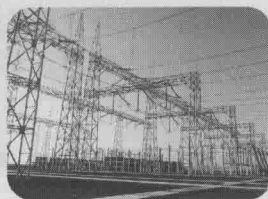
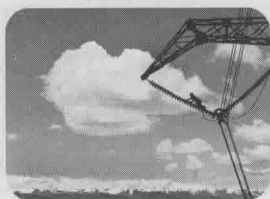
1	发电新技术	3
1.1	风力发电	3
1.2	太阳能发电	8
1.3	核能发电	15
1.4	生物质能发电	20
1.5	地热发电	23
1.6	海洋能发电	25
2	输电新技术	36
2.1	新型交流输电技术	36
2.2	灵活交流输电技术	44
2.3	新型直流输电技术	65
2.4	新型管道输电技术	72
2.5	无线输电技术	77
2.6	其他新型输电技术	79
3	配电新技术	85
3.1	智能配电规划及运行技术	85
3.2	配电信息系统	86
3.3	量测和通信技术	88
3.4	配电新技术与新装备	89
4	用电新技术	91
4.1	微网	91
4.2	分布式电源	93
4.3	电动汽车	94
5	储能新技术	96
5.1	电化学储能	96
5.2	飞轮储能	101
5.3	压缩空气储能	103
5.4	超导储能	106
5.5	超级电容器储能	110

第二篇 电网分析与控制新技术

6	电网分析控制基础性技术	117
6.1	分布式计算机系统体系结构	117
6.2	数据平台支持	118
6.3	PMU/WAMS 的应用	119
6.4	面向智能电网的电力通信技术	120
6.5	人机交互及可视化技术	121
7	电网仿真技术	123
7.1	先进的计算技术	123
7.2	电力系统建模	126
7.3	数字仿真	129
7.4	在线仿真	132
7.5	实时仿真	133
8	电网调度运行技术	135
8.1	控制中心自动化技术	135
8.2	变电站自动化技术	139
9	在线分析与控制技术	146
9.1	电力系统模型的在线辨识与校核技术	146
9.2	基于风险理论的电网安全评估技术	147
9.3	在线智能决策分析技术	147
9.4	基于 WAMS 的在线监控和分析技术	148
10	电网运行优化控制技术	150
10.1	大电网阻尼控制技术	150
10.2	电力系统次同步振荡和谐振控制技术	150
10.3	机网协调控制技术	151
10.4	基于 FACTS 的柔性控制技术	152
11	电网安全稳定紧急控制技术	154
11.1	交直流及多回直流协调控制技术	154
11.2	大规模新能源基地安全稳定控制技术	157
11.3	后加速追加紧急控制技术	158
11.4	基于响应的安全稳定控制技术	162
11.5	连锁故障识别及控制技术	163
12	电网故障后恢复技术	166
12.1	黑启动及后续恢复技术	167
12.2	极端外部条件下的电网恢复技术	169
	参考文献	171

第一篇

发、输、配、用、储新技术



发电新技术

1.1 风力发电

我国风能资源比较丰富，全国陆上 50m 高度层年平均风功率密度大于等于 $300\text{W}/\text{m}^2$ 的风能资源理论储量约 73 亿 kW，陆上 80m 高度（风速达到 $6.5\text{m}/\text{s}$ ）的风能资源技术开发量约为 91 亿 kW。我国陆上风能资源丰富区主要分布在东北、内蒙古、华北北部、甘肃酒泉和新疆北部，此外，云贵高原、东南沿海也是风能资源较丰富的地区。近海地区中，台湾海峡风能资源最丰富，其次是广东东部、浙江近海和渤海湾中北部。各区域电网的风能资源储量见表 1-1。

表 1-1 区域电网的风能资源储量表

区域	风能资源储量（万 kW）	
	总储量	技术可开发量
华北电网	109175	16007
东北电网	39918	312
华东电网	11470	688
华中电网	23502	118
西北电网	148685	12350
南方电网	22744	246
西藏电网	77280	—
台湾地区	2235	—

注 数据来源：《国家电网公司促进清洁能源发展研究专题—我国风能资源及风电开发规划研究》。

1.1.1 风力发电的基本原理及相关概念

风力发电是将风力机采集的风能（动能）转换成转动的机械能，再通过传统装置将机械能传递给发电机，最终转化成电能的过程。其基本工作原理是风以一定的速度和角度吹动风力机叶片，使风轮获得旋转载矩并以较低的转速转动，经齿轮箱增速后连接到发电机转子并带动发电机发电，发电机输出端经升压变压器连接到电网中，如图 1-1 所示。

1. 风能

按照空气动力学理论，流动的空气具有动能，其计算公式为：

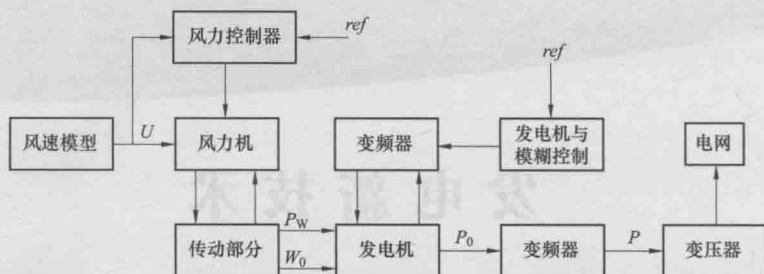


图 1-1 风力发电原理示意图

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-1)$$

式中, m 为气体的质量, kg ; v 为气体的速度, m/s 。

考虑单位时间内气流流过截面积为 A 的气体的体积为 V , 则该体积的气流所具有的动能就是风能, 其表达式为:

$$E = \frac{1}{2}\rho Vv^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (1-2)$$

式中, ρ 为空气密度, kg/m^3 ; A 为单位时间内气流流过的截面积 (又称扫略面积), m^2 ; E 为风能, W 。

从风能公式可以看出, 风能的大小与气流密度和通过的面积成正比, 与气流速度的立方成正比。其中 ρ 和 v 会受到地理位置、海拔、地形等因素的影响。

2. 风能的转换效率

依据空气动力学贝兹极限理论, 理想情况下, 风能转化成机械能的最大效率称为理论风能利用系数, 可用式 (1-3) 表示:

$$\eta_{\max} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (1-3)$$

考虑风力机的实际风能利用系数 C_p (又称功率系数) 小于 0.593 后, 实际的功率输出为:

$$P = \frac{1}{2}C_p\rho Av^3 \quad (1-4)$$

1.1.2 风机类型与基本运行特性

目前, 根据各组成部分的结构和工作原理, 风电机组通常分为以下几种类型:

固定转速风力发电机——容量相对较小, 技术较老;

变速双馈风力发电机——容量较大, 当前广泛应用;

变速直驱风力发电机——容量较大, 现在开始采用, 发展前景良好。

1. 固定转速风力发电机

固定转速风力发电机的基本结构如图 1-2 所示。目前国内外普遍使用的是水平轴、

上风向、定桨距（或变桨距）风力机，其有效风速范围约为 $3\sim 30\text{m/s}$ ，额定风速一般设计为 $8\sim 15\text{m/s}$ ，风力机的额定转速大约为 $20\sim 30\text{r/min}$ 。发电机通常采用鼠笼型异步发电机，与系统直接相连。

叶片的安装角度，即桨矩角，一般采用固定的和可调的两种方式。根据桨矩角的调节性能，风力机又可分为被动失速型和主动失速型。

固定转速风力发电机（又称恒速风机）的显著缺点是风速变化时，风能利用系数 C_p 不可能保持在最佳值，因此不能最大限度地捕获风能，风能利用率不高。另外，对恒速风机来说，当风速跃升时风能将通过风力机传递给主轴、齿轮箱和发电机等部件，在这些部件上产生很大的机械应力，如果上述过程频繁出现，会引起这些部件的疲劳损坏。因此设计时不得不加大安全系数，从而导致机组质量加大，制造成本增加。

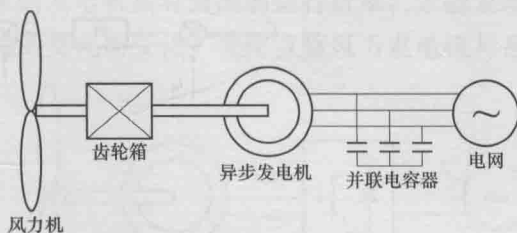


图 1-2 固定转速风电机示意图

异步风电发电机组在向系统发出有功功率的同时，需要从系统吸收无功功率，就无功电压特性而言与电动机负荷一致。异步风电机组稳态运行中依赖于系统或风电场内无功补偿装置提供的无功功率，而在电压跌落的暂态过程中会吸收大量无功功率，进一步恶化系统的无功电压特性。

2. 变速双馈风力发电机

发电机部分采用一般的绕线式异步电机结构，感应发电机的定子绕组直接与系统相连，转子绕组通过背靠背换流器与系统相连。变速双馈风力发电机示意图如图 1-3 所示。

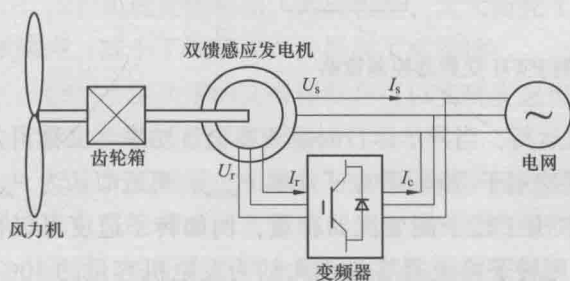


图 1-3 变速双馈风电机组示意图

发电机励磁电源由两个脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）变频器通过中间直流环节连接而成，由于 PWM 变频器产生的电压与电流能够在四象限内任意控制，因此通过适当控制，双 PWM 变频器既能由转

子从电网吸收功率也可以向电网输出功率，即实现能量的双向流动。通过控制换流器可以控制转子电压的幅值和角度，进而控制有功、无功功率。

（1）电网侧 PWM 变频器及其控制策略。电网侧 PWM 变频器通常采用电网电压定向的矢量控制策略，通过控制变频器 d 轴电流来控制输出变频器的有功功率，从而实现中间直流链电压的调节；通过控制变频器 q 轴电流来调节输出的无功功率，实现电网侧变频器功率因数的控制。为了减小变频器运行容量，提高运行效率，通常情况下电网侧变频器被控制在单位功率因数运行，其控制策略框图如图 1-4 所示。

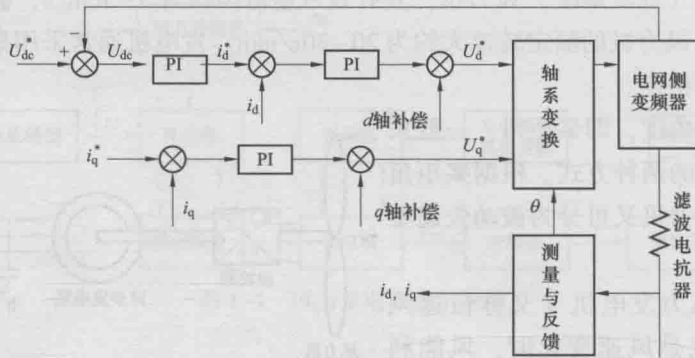


图 1-4 电网侧 PWM 变频器控制策略

(2) 转子侧 PWM 变频器及其矢量控制策略。转子侧 PWM 变频器采用定子磁链定向的矢量控制策略，其控制策略框图如图 1-5 所示。控制器采用双闭环结构，内环是相应的转子电流控制环，外环则是定子无功功率与电磁转矩控制环。

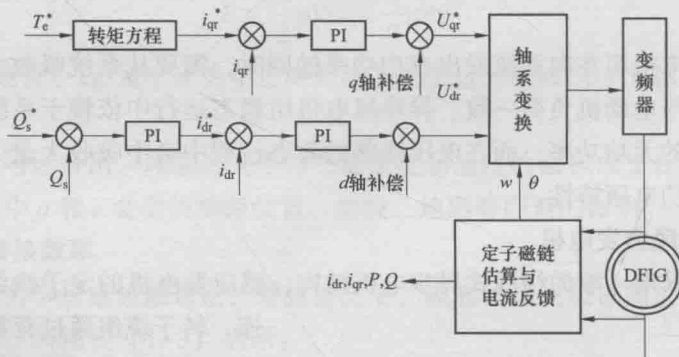


图 1-5 转子侧 PWM 变频器控制策略

双馈感应电机可以在一定范围内变速运行，当异步运行时换流器会有功率（又称滑差功率 P_{rotor} ）馈入电机的转子，此功率主要决定于滑差 s 和定子功率 P_{stator} ，可近似认为 $P_{\text{rotor}} \approx -sP_{\text{stator}}$ 。双馈电机变速运行范围主要取决于转子侧变流器容量，例如转子速度可以在额定转速（-30%~30%）范围内调整，则转子换流器容量也大约为发电机容量的 30%。换流器容量越大，双馈感应电机的变速范围越宽。在次同步条件下，功率从电网侧通过换流器流向转子，即 $P_{\text{rotor}} < 0$ ；在超同步条件下，功率从转子通过换流器流向电网侧，即 $P_{\text{rotor}} > 0$ 。因此，换流器的容量与选择调整范围有关。

换流器的引入使得双馈电机的控制能力相比以往的固定转速风机有了很大的提高，双馈风机的性能与变流器控制策略密切相关。当前通用的控制策略是基于定子磁链定向或定子电压定向的矢量控制策略，通过控制转子变流器的电压幅值和相角，可以实现双馈电机的有功功率与无功功率的解耦控制，风电机组在一定范围内发出或吸收无功功率，甚至可以在暂态过程中像常规机组一样提供电压支撑，大幅度改善了并网风电机组的无功电压特性。同时，合适的控制策略还可以为风电机组提供一定的低电压穿越

能力。

3. 变速直驱风力发电机

变速直驱风力发电机一般采用多极永磁同步电机，转子为永磁式结构，无需外部提供励磁电源，提高了效率。发电系统中，永磁发电机具有最高的运行效率；永磁发电机的励磁不可调，其感应电动势随转速和负荷的变化而变化。变速直驱风力发电机与系统完全通过换流器相连，示意图如图 1-6 所示。

同步电机与电网之间通过频率换流器相连，频率换流器用于控制发电机的转速和与电网交换的有功功率。频率换流器包括两个背靠背电压源换流器，通过绝缘栅双极晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）的投切控制，两者之间通过直流电容器相连。该换流器可以使发电机根据风电涡轮机理想的优化转动速度控制自身的端电压和频率，与电网的电压和频率无关。

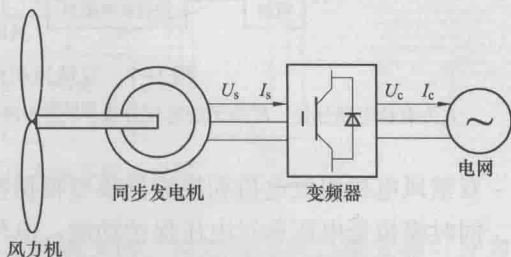


图 1-6 直驱风电机组示意图

涡轮机转子直接与发电机耦合，无齿轮箱，即为直接驱动式结构。该结构可大大减小系统运行噪声，提高可靠性。永磁铁安装在发电机转子轴上，定子包含线圈并与换流器直接相连。风力机与永磁同步发电机的转子直接耦合，使发电机的输出端电压、频率随风速的变化而变化，网络频率保持恒定。

变速直驱风力发电机与其他主流机型相比，具有以下优越的性能：

- (1) 效率高；
- (2) 实现直接驱动，无齿轮箱，大大简化了传动系统，提高了系统效率，降低了机械噪声，减小了维修成本，提高了可靠性；
- (3) 与全功率的变换器配合可以实现变速恒频发电；
- (4) 风能捕捉效果优良；
- (5) 发电机通过变流器与电网隔离，因此其应对电网故障时承受能力更强，与双馈风力发电系统相比，直驱风力发电系统更容易实现低电压穿越。

但是，由于直驱式永磁发电机的转速很低，致使发电机体积增大，且全功率变换器的采用增加了变流器制造成本；此外，为了增加容量还需要并联功率器件，其控制变得复杂。

1.1.3 风电机组仿真建模

针对当前广泛应用的双馈风电机组和直驱风电机组，参考应用最为广泛的 GE 风机模型，建立了相应的机电暂态模型，并在 PSD-BPA 仿真软件中得到实现。

双馈风电机组结构如图 1-7 所示。从图中可以看出，双馈风机的机电暂态模型包括发电机和换流器模型、电气控制模型、原动机及其控制系统模型、风速模型和各部分之间的数据接口。

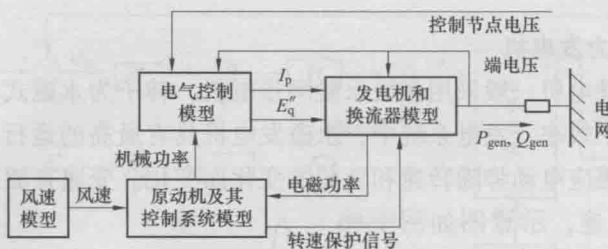


图 1-7 双馈风机的总体系统结构图

I_p 为有功电流分量； E_q'' 为无功电压分量； P_{gen} 为风机注入电网的有功； Q_{gen} 为风机注入电网的无功。

双馈风电机组发电机和换流器模型根据控制系统命令向系统注入有功功率和无功功率，同时模拟低电压和过电压保护功能；电气控制部分模型中包括风电场的无功控制部分和有功控制部分，为发电机和换流器模型提供无功和有功控制信号；原动机及其控制系统模型反映的是风机和其他主要机械部分的物理模型和控制模型，包括风功率模型、桨距角控制等；风速模型则模拟风速的变化情况。

直驱风机采用永磁同步电机，利用全功率变流器并网，具备更好的电气控制性能，与双馈风机的主要区别在于发电机和换流器环节、电气控制模型以及原动机控制模型。

1.2 太阳能发电

我国太阳能资源十分丰富，但分布极不均衡，其中西部和北部的大部分地区直射资源较为丰富，特别是西藏、新疆、内蒙古、甘肃和青海等地区。根据长期观测积累的资料，全国太阳辐射年总量大致在 $3.35 \times 10^3 \sim 8.40 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ 之间，其平均值约为 $5.86 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ 。全国有 $2/3$ 以上的地区年辐照总量大于 $5.02 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ ，年日照时数在 2000 h 以上。

太阳能发电技术可分为直接发电和间接发电两类。太阳能直接发电主要包括光伏发电和光感应发电；太阳能间接发电首先将太阳能转换为其他能源，然后再转换为电能，主要包括太阳能光化学发电、太阳能光生物发电、太阳能热发电等，其中较为成熟、最具规模化开发潜力的是太阳能光伏发电和太阳能热发电。

1.2.1 光伏发电系统基本原理与特性

光伏发电是利用光生伏打效应，使太阳光辐射能转变成电能的发电方式，是当今太阳能发电的主流。光伏发电系统一般由光伏阵列、并网逆变器等部分组成，太阳能光伏发电系统的组成如图 1-8 所示。

光伏发电系统各部分作用如下：

(1) 光伏电池板直接将太阳辐射能转换成直流电，是光伏发电系统最基本的单元。光伏电池板是太阳能光伏发电系统的核心部件，其受外界日照强度和温度变化影响较大。

(2) 逆变器是将直流电转换成交流电的电子设备。由于太阳能电池和蓄电池发出的

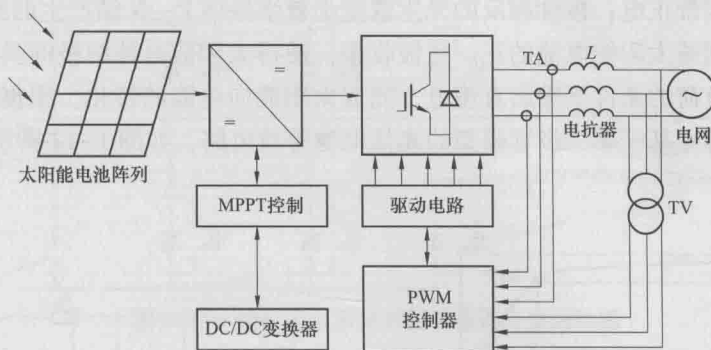


图 1-8 太阳能光伏发电系统示意图

是直流电，当负载是交流负载时，逆变器是不可缺少的。按运行方式，逆变器可分为独立运行逆变器和并网逆变器。独立运行逆变器用于独立运行的太阳能电池发电系统，为独立负载供电。并网逆变器用于并网运行的太阳能电池发电系统，将发出的电能馈入电网。按输出波形，逆变器又可分为方波逆变器和正弦波逆变器。方波逆变器电路简单、造价低，但谐波分量较大，一般用于几百瓦以下和对谐波要求不高的系统。正弦波逆变器成本高，但可以适用于各种负载。从长远看，SPWM 脉宽调制正弦波逆变器将成为发展的主流。

(3) DC-DC 是两级式变换器，在光伏发电系统中通过调节占空比改变光伏阵列的输出电压，并实现最大功率点跟踪，使其输出电压始终维持在最大工作电压。

(4) 控制器为了最高效率地利用太阳能，采用最大功率跟踪控制技术（Maximum Power Point Tracking, MPPT），以保证光伏阵列输出功率始终保持在最大值。

光伏发电系统按照功率变换的级数划分主要有单级式光伏发电和多级式光伏发电等，如图 1-9 和图 1-10 所示。



图 1-9 单级式光伏发电拓扑结构

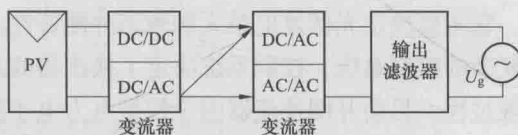


图 1-10 多级式光伏发电拓扑结构

光伏发电与直驱型风电机组类似，通过变流器与电网相连，运行特性很大程度上取决于变流器的控制作用。光伏发电同样可以实现有功功率与无功功率的解耦控制，并在一定范围内发出或吸收无功功率，具体的电压支撑能力和换流器容量、控制目标与策略相关。

1.2.2 光伏发电系统仿真建模

1. 光伏电池模型

光伏电池是实现光电转换的基本单元，其发电外特性如图 1-11 所示。在太阳光辐射条件下，光伏电池的半导体 P—N 结内产生大量的电子—空穴对，两者极性相反，电

子带负电，空穴带正电；极性相反的光生载流子被半导体 P—N 结产生的静电场分离开；电子和空穴分别被太阳能电池的正、负极收集，使得太阳能电池两极间具有一定的直流电动势，在有负荷的条件下输出直流电，完成太阳能向电能的转化。根据以上分析和电子学理论，可建立基于单二极管模型的光伏电池等效电路，如图 1-12 所示。

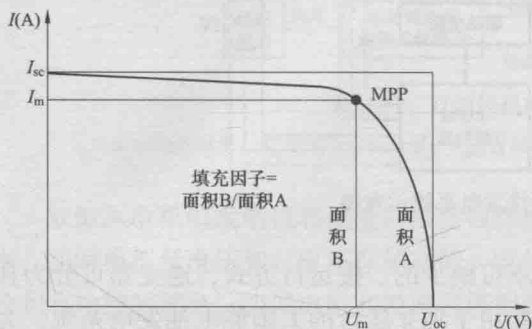


图 1-11 光伏电池的外特性

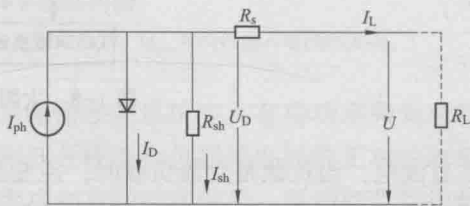


图 1-12 基于单二极管模型的光伏电池等效电路

图 1-12 中， I_{ph} 为光生电流，其值正比于光伏电池的面积和入射光的光照强度； I_L 为光伏电池输出端电流； U 为光伏电池输出端电压； I_D 为流经二极管的电流； R_s 为光伏电池等效串联电阻； R_{sh} 为光伏电池等效并联电阻。

2. 光伏阵列集成模型

在光伏发电系统中，通常需要根据容量和端电压确定光伏电池串联和并联的数目。首先将多个光伏电池串联组成电池串，再将多个电池串并联组成光伏阵列。实际工程中，同一光伏发电系统原则上都采用同一型号的光伏电池，以保证光伏阵列内的光伏电池具有较高的一致性。因此，光伏阵列集成模型可以根据光伏电池模型和串并联关系组合而成。

3. 光伏并网换流器及控制系统模型

并网换流器是光伏发电系统的并网部件，将光伏阵列的直流电转换为交流电并入电网，它主要决定光伏发电单元的暂态并网特性。光伏并网换流器主要包括换流器硬件装置和复杂的控制系统，控制系统决定了换流器的并网策略，换流器装置则决定了并网策略的实现过程。目前并网换流器因全控型电力电子器件的使用而拥有快速、强大的可控性，其控制系统主要采用内外环的控制方式。外环控制主要以电压为输入，经过控制环节生成内环控制的电流参考值，决定换流器的并网策略和外特性；内环控制以电流为输入，以外环控制的电流参考值作为基准，经过控制环节和换流器装置实现电流入网。因此，对光伏并网换流器的建模包括两部分内容：换流器及内环控制模型、外环控制模型。

(1) 换流器及内环控制模型。换流器硬件电路结构如图 1-13 所示：

按照图 1-13， $dq0$ 坐标系下的换流器机电暂态模型可描述如下：

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R + Ls & -\omega L \\ \omega L & R + Ls \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

其中， E_d 、 E_q 为换流器交流电压的 d、q 分量； U_d 、 U_q 为电网侧电压的 d、q 分量； i_d 、 i_q 为换流器交流电流的 d、q 分量； L 、 R 为连接电抗、电阻； ω 为系统频率； s 为微