

阴影条件下光伏微网系统 控制策略研究

杨海柱 著



煤炭工业出版社

阴影条件下光伏微网系统 控制策略研究

杨海柱 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

阴影条件下光伏微网系统控制策略研究/杨海柱著. -- 北京:
煤炭工业出版社, 2016

ISBN 978 - 7 - 5020 - 5489 - 2

I. ①阴… II. ①杨… III. ①太阳能光伏发电—控制系统
IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 211302 号

阴影条件下光伏微网系统控制策略研究

著 者 杨海柱
责任编辑 徐 武 杨晓艳
责任校对 高红勤
封面设计 于春颖

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010 - 84657898 (总编室)
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 煤炭工业出版社印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 850mm × 1168mm^{1/32} 印张 7 插页 2 字数 186 千字

版 次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

社内编号 8352 定价 22.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010 - 84657880

内 容 提 要

本书介绍了目前光伏微网发电系统的研究现状,分析了光伏发电基础理论和光伏发电系统的拓扑结构,针对光伏微网发电系统的两个热点问题,即阴影条件下光伏阵列最大功率跟踪控制和如何保证微网可靠稳定地运行给出了具体的解决方法,并且对提出的控制策略进行理论分析和仿真试验研究。

本书可作为学习光伏微网发电系统控制策略的配套教材,适合从事光伏发电系统设计、规划、运行、控制、维护管理和其他相关专业的工程技术人员阅读,也适合高等院校相关专业作为工程实践教学环节的辅助参考教材。

前 言

随着电网规模的不断扩大,传统的集中发电和远距离输电的电网建设模式表现出越来越多的局限性,作为大电网的补充,微网应运而生,微网能够整合大量分布式新能源发电,有助于解决大电网遇到的各种问题。太阳能作为一种新的清洁能源,光伏微源作为微网的重要组成部分得到了快速发展。但是随着光伏发电和微网的快速发展,新的问题又出现了:一是阴影条件下光伏阵列最大功率跟踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT);二是如何保证微网可靠稳定地运行。这两个问题也是目前光伏并网发电系统研究的热点问题。

阴影条件是指光伏阵列局部或全部被沙尘、鸟粪、云层、建筑物及树木的影子等遮盖,组件所受光照强度小于实际光照强度的工作条件。在阴影条件下,受组件本身特性与阵列构成的影响,光伏阵列的输出 $P-U$ 特性变得尤为复杂,出现多个局部峰值点,如果系统不能快速、准确地应对这些变化,及时调整追踪至阵列的最大功率点,会导致阵列功率失配,造成严重的功率浪费,严重时甚至会损害光伏阵列的寿命。在光伏微网控制方面,通过分析国内外研究现状发现,目前对微网控制策略的研究大多是在传统的电力电子逆变器控制基础上提出的,大多采用数字PI控制技术。微网中DG(Distribute Generation)依据本地信息进行自动调节,以保证对负荷供能的稳定和运行状态的平滑过渡。因此有必要建立微网运行控制仿真平台分析控制策略的性能和不足,从而为控制方式的改进和更先进、更智能控制方式的应用提供支持。

本书针对光伏微网系统主要做了如下研究：①局部阴影条件下光伏阵列建模与仿真。对比3种光伏电池建模方法，使用运动学平抛模型建模计算量小、误差满足工程需求，因而得到应用。经过建模与仿真，仿真结果表明运动学平抛模型建模方法的可行性。②带光伏预测的混合型MPPT算法研究。除去扰动观测法与智能粒子群算法的不足，结合两者的优点，本文提出了一种带光伏预测的混合型MPPT算法。使用该算法，寻优时间短，波动小。③微网的分段滞环下垂控制策略。针对微网传统下垂控制策略的不足，提出了分段滞环下垂控制策略。通过建模并与传统下垂控制策略模型相比较，表明改进控制策略的可行性。④光伏微网综合控制算例模型。建立光伏微网算例模型，通过设定局部阴影条件、改变外部光照条件、负荷的投切操作，以及改变微网的工作运行方式，来对微网的工作稳定性进行分析。

本书得到了国家自然科学基金项目“模块化多电平高压双PWM变频器关键技术研究”及河南省教育厅科技计划项目“光伏并网发电系统的核心控制问题研究”的资助，得到了河南理工大学电气工程与自动化学院的大力支持，在此表示衷心的感谢。在图书出版过程中，煤炭工业出版社的徐武编辑和杨晓艳编辑对该书提出了许多中肯的修改意见，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中有不妥之处，敬请各位读者批评指正。

著 者

2016年8月

目 录

1 绪论	1
1.1 光伏发电的研究现状	1
1.2 阴影条件下光伏发电的研究现状	3
1.3 微电网控制研究现状	8
2 光伏发电基础	11
2.1 光伏电池的工作原理	11
2.2 光伏电池的基本特性与模型研究	12
2.3 阵列组成与特性研究	18
3 光伏发电系统的拓扑结构	22
3.1 光伏并网逆变器	22
3.2 ZSI 和 QZSI	27
3.3 基于 QZSI 的光伏并网发电系统控制策略研究	31
4 光伏发电系统控制策略	43
4.1 最大功率跟踪技术的原理	43
4.2 无阴影或均匀阴影条件下的 MPPT 算法	45
4.3 两级变换结构光伏并网逆变器的最大功率点 控制方法	48
5 光伏发电系统中的阴影问题	60
5.1 非均匀阴影条件下光伏阵列建模与仿真	60
5.2 非均匀阴影条件下光伏阵列最大功率追踪	71

6 光伏并网发电系统的孤岛效应及防止策略	87
6.1 引言	87
6.2 孤岛效应的国际通行标准和非检测区问题	88
6.3 孤岛检测方法比较分析	91
6.4 正反馈频率扰动法	95
6.5 并网逆变器反孤岛能力的测试方法及测试电路	98
6.6 孤岛检测试验结果	102
7 微电网的 PQ 控制策略和光伏并网控制研究	104
7.1 微网结构与控制策略	104
7.2 PQ 控制模型设计及仿真	106
7.3 光伏系统的 PQ 控制模型设计及仿真	121
7.4 局部阴影条件下光伏并网模型及仿真	132
8 改进下垂控制策略研究建模	138
8.1 下垂控制策略	138
8.2 分段滞环下垂控制	140
8.3 模型设计	153
8.4 分段滞环控制与传统下垂控制比较	158
9 光伏发电接入微网控制仿真研究	165
9.1 微网对等控制	165
9.2 微网综合控制	174
9.3 光伏接入微网系统	181
附录 1 光伏电站孤岛效应检测技术规程	192
附录 2 光伏系统并网技术要求	198
参考文献	207

1 绪 论

1.1 光伏发电的研究现状

早在 20 世纪 60 ~ 70 年代,以化石能源为基础的传统能源结构所带来的问题已经引起了世界各国的关注。与此同时,化石能源的逐年枯竭与战略能源安全问题也一直困扰着世界各国。安全、可再生、环境友好的新能源成为各国追寻的对象。德国、美国、日本等国起步较早,开始了核能、氢能、太阳能、风能等可再生清洁能源的研究和探索^[1]。其中太阳能以其广泛、无穷、廉价、便捷和无公害等特点,在众多能源形式中脱颖而出,使得光伏发电技术成为世界各国的研究热点。

20 世纪 70 年代中期,世界上第一座太阳能电站——巴斯托太阳能 1 号电站在美国建成投产,拉开了人类大规模利用光伏发电技术的序幕^[2]。随着材料改良与技术升级,光伏发电快速发展,各国政府也陆续推出如“百万屋顶”计划(美国)、“新太阳”计划(日本)、《可再生能源法》(德国)等政策法令,大力推广光伏发电,构建新的战略能源结构。国际能源协会下属研究小组(IEA - PVPS)发布的报告显示,2014 年,全球新增光伏装机容量 38.7 GW,当前累计装机容量已达 177 GW。其中,亚太地区(以中国、日本、印度 3 国为主)、北美和欧洲是光伏产业的主要市场。市场研究机构 IHS 预测,未来全球新增光伏装机容量将以 30% 左右的规模持续增长^[3]。

我国大部分地区太阳能资源比较丰富,光伏发电发展潜力巨大。虽然我国光伏发电产业稍落后于欧美,但涨势迅猛。从 2000 年开始,我国的光伏发电技术进入大规模并网发电阶段,涌现了一大批千瓦级、兆瓦级的光伏并网发电系统。国家重大战

略,如“西部省区无电乡光明工程”“社会主义新农村建设”“金太阳计划”“竞价上网”等的实施,以及国家财政补贴的落实,也极大地推动了光伏发电产业的增长。

目前,我国光伏发电主要以大型并网光伏电站、光伏建筑一体化发电系统(BIPV)、分布式光伏发电系统、离网型光伏系统形式实现。其中,国家战略投资的大型并网光伏电站是我国光伏发电的主体。2012年11月1日实行光伏免费并网政策后,个人和企业投资的分布式光伏发电系统也迅速发展,并网光伏发电的装机容量迅速提升。

经过10多年的蓬勃发展,我国光伏发电产业的装机容量和并网发电量已经相当可观,在节约化石能源的同时,提高了环境效益。根据国家能源局统计:截至2014年底,全国的光伏发电累计并网装机容量已达 $2805 \times 10^4 \text{ kW}$,同比增长60%。光伏年发电量约 $250 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ (可供5000万人使用1年),同比增长超过200%。从环境效益上来看,以每发 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电耗费约0.4 tce,排放0.272 kg碳粉尘、0.997 kg二氧化碳、0.03 kg二氧化硫、0.015 kg氮氧化物的环境成本来计算,2014年光伏 $250 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的发电量节约了10亿tce,减少各类污染物排放 $328.5 \times 10^8 \text{ kg}$,为治污减霾做出了巨大贡献。有关业内人士预计,2016年光伏新增装机将达到23 GW^[4]。

总之,国内外光伏发电在未来数年仍将保持较快的增幅,光伏发电技术的持续研究与创新是未来能源安全与环境可持续发展的关键。

然而,光伏发电技术现在仍面临着许多问题:

- (1) 光伏电池材料的转化率较低。
- (2) 光伏电池生产环节中污染问题较为严重。
- (3) 最大功率点追踪技术仍存在许多不足。
- (4) 系统的前期投资较高,成本回收周期长。
- (5) 并网及储能问题。

上述问题中,第三点最大功率点追踪技术问题,尤其是局部

阴影条件下的最大功率点追踪技术问题更为重要。阴影条件是指光伏阵列局部或全部被沙尘、鸟粪、云层、建筑物及树木的影子等遮盖,组件所受光照强度小于实际光照强度的工作条件。在阴影条件下,受组件本身特性与阵列构成的影响,光伏阵列的输出 $P-V$ 特性变得尤为复杂,出现了多个局部峰值点,如果系统不能快速、准确地应对这些变化,及时调整追踪至阵列的最大功率点,会导致阵列功率失配,造成严重的功率浪费,严重的甚至会损害光伏阵列的寿命^[5]。

另外,从成本上来说,若发电系统没有使用合理的最大功率点追踪技术,不能使光伏阵列工作在最大功率点处,实际发电量小于应有发电量,发电效率将大打折扣。假定由此引起的发电效率下降 1%,在世界光伏发电装机容量不断增加的背景下,1% 乘以巨大的装机容量将是一笔巨额的能源浪费。

仅以我国为例,80% 以上的光伏电站仍沿用传统的最大功率追踪技术,如固定电压法(CVT)、扰动观察法(P&O)等,并不能应对阴影条件下光伏阵列的最大功率点追踪问题,阵列失配现象非常严重。在某些光伏发电系统中,由于失配问题所造成的功率损失甚至高达 10%^[6]。据测算,我国并网光伏电站系统每年因失配问题引起的损失高达 $1 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,以每年每人消费 $500 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 计算,可供 20 万人使用 1 年。

因此,解决好阴影条件下光伏阵列的最大功率跟踪控制(MPPT)问题,减少由于适配造成的输出损失,对于增加光伏发电系统的发电量,缩短成本回收周期,节约化石能源,改善生态环境,都有着非常重要的作用。

1.2 阴影条件下光伏发电的研究现状

1.2.1 阴影条件下阵列模型的研究现状

光伏阵列的模型研究是阴影条件下光伏阵列 MPPT 算法研究的基础,而光伏电池的模型研究又是光伏阵列模型研究的基础。在光伏电池的模型研究方面,bishop、苏建徽等学者做出了突出

贡献,提出了常用的数学模型和工程模型。数学模型是根据光伏电池的物理结构进行建模,结果较为准确,但参数较多,适用于实验室的定性研究。工程模型是在数学模型的基础上做了许多假设,对一部分数值进行忽略后得到的,工程模型仅依靠光伏组件上的出厂参数就可以进行功率估算,方便工程应用。

在阵列模型研究方面,国内外学者多根据阵列的实际组成以上文两种基础模型进行建模。文献[1]提出了一种基于数学模型的光伏阵列建模方法,但没有考虑阴影条件的影响,只适用于均匀光照下的阵列建模。文献[2]考虑了阴影条件、阵列结构对阵列输出特性的影响,在 Matlab 中建立了光伏阵列的特性模型,该模型能够较准确地反映不同条件下光伏阵列的输出特性,但该建模方法是通过给定电流进行电压计算的,不符合工程中根据电压求电流的实际需要。文献[3]利用 Lambert W 函数表达光伏阵列的 $V-I$ 关系,再利用数值算法求解关于 $P-V$ 的非线性方程组。文献[4]对光伏阵列的非线性方程组求解方法进行了研究,选择牛顿迭代法计算阵列的电流,阵列的建模基础仍然选择数学模型。文献[5]建立了带旁路二极管的光伏组建模型,并根据阵列的隐形互补性质提出了基于效用函数的输出特性求解算法,该方法具有较高的精度,但其基本模型仍使用数学模型,求解过程比较复杂。文献[6]提出了一种适用于局部阴影条件下的光伏阵列特性建模方法,利用分段函数的思想描述阵列的 $I-V$ 函数,间接地得到阵列的 $P-V$ 函数,该方法基于阵列的实际工作原理,但使用的基本模型是数学模型,精度较好,但不便于实际应用。文献[7—12]也都是以数学模型和工程模型为基础进行阵列建模,精度能够得到满足,但由于模型本身含有大量的指数运算和对数运算,阵列的模型运算量更大,对运行平台的性能要求较高。

文献[13]提出了一种运动学模型,利用曲线拟合思想对光伏电池的输出特性进行建模。与数学模型和工程模型相比,极大地减少了运算量,方便在控制器上运用。文献[14]中简单

介绍了局部阴影条件下光伏阵列的运动学建模方法,利用关键点将阵列的 $I-V$ 曲线进行分段,然后分段、分区描述,与现有方法相比,该方法在精度上和运算难易程度上均有较好表现,值得深入研究。

1.2.2 阴影条件下光伏阵列 MPPT 技术的研究现状

20 世纪 70 年代,国外在光伏利用实践中意识到光伏阵列受到阴影遮挡所导致的一系列问题,但直到 21 世纪初阴影条件下光伏阵列的最大功率追踪技术研究才真正得到各国学者的重视。针对这一问题国外学者提出了两种解决思路:①对阴影条件下光伏阵列进行补偿或拓扑结构优化,改善其输出特性曲线,使多峰值寻优问题变为单峰值寻优问题^[15,16];②研究阴影条件下光伏阵列输出特性,根据特性提出新的多峰值寻优算法。

根据第一种解决思路,文献 [17, 18] 考察了光伏阵列实际安装条件,对局部阴影的分布特征及散射光照比进行测量和估算,从而对光伏阵列的结构做出优化设计。采用阵列拓扑结构优化的主要思路是根据受阴影影响的情况,将发生遮挡的电池组件进行补偿或阵列重构。通过改变受遮挡组件在阵列中的位置,将阵列中各组件串的输出功率进行平均,或者去掉受阴影影响比较严重的组件,对阵列的拓扑结构进行重新构造,由此去除阴影对光伏阵列造成的不良影响^[19,20]。文献^[21,22]根据局部阴影情况,给受阴影影响的光伏模块并联功率补偿单元,使输送到后级变流器的功率在特性曲线上不出现多极值点特性。这两种方法都先对光伏阵列的结构进行优化,降低其输出特性的复杂程度,然后用常规算法进行最大功率点追踪。

国内还采用分布式 MPPT 方法,包括采用直流模块和交流模块,来解决阴影条件下光伏阵列的最大功率追踪问题^[23,24]。其主要思想是将光伏阵列分割成多个小的子阵列,采用直流或交流模块对每个子阵列进行独立的 MPPT 控制,保证每个子阵列能够输出最大功率,从而提高整个阵列的输出功率。这种思路有效地

解决了光伏阵列输出特性曲线发生畸变的问题，增强了系统对阴影影响的免疫能力，但实现起来都需要增加额外的硬件电路，系统成本较高，且控制较为复杂。受其缺点影响，这种思路一般应用在大中型地面光伏电站中。

第二种解决思路不用添加大量硬件，仅从控制算法上进行研究，受到各国学者的广泛关注。根据光伏阵列的输出特性，国内外在阴影条件下 MPPT 控制问题的研究上做了大量尝试，许多实用的多峰值 MPPT 控制算法纷纷出现，各种方法见表 1-1。

表 1-1 多峰值 MPPT 控制算法

方法类别	特点和细分
基于传统 MPPT 算法的复合型算法	对传统算法进行改进和复合，在寻优的不同阶段用不同传统算法进行处理 ^[34-36]
基于现代控制理论的智能控制算法	1. 粒子群算法 2. 模糊控制算法 3. 神经网络算法 4. 蚁群算法等
基于大数据的预测型算法	利用神经网络算法对连续数天内的环境条件及工作情况进行分析，得出大致的预测值，再利用传统算法进行寻优
其他 MPPT 算法	黄金分割法、矩阵分割法等

文献 [25, 26] 对传统的算法进行了改进，提出了基于传统算法的复合型算法，能够实现多峰值下最大功率追踪。该方法实现起来比较容易，实用性比较好，但是算法的寻优时间较长，寻优精度受步长影响较大。文献 [27] 提出了用快速扫描法对电压进行控制，比较不同电压处的功率大小，从而找到全局最大功率点，但寻优过程耗时较长，系统的稳定性也受一定影响。

近几年，智能算法发展迅速，粒子群算法、蚁群算法、模糊控制算法、神经网络算法开始应用到阴影条件下光伏阵列的多峰

值寻优问题上。文献 [28] 将粒子群算法与光伏阵列的 MPPT 问题进行结合, 实现了全局峰值点的快速寻优, 但由于粒子群算法本身的缺陷, 该方法仍有陷入局部峰值点的风险。文献 [29] 对阵列特性进行了大量研究, 改进了粒子初始化位置的设置, 从而减少了算法陷入局部峰值寻优的风险, 具有较好的实用性。还有不少学者对粒子群算法本身提出了改进方法, 出现了回退法、惩罚因子法等改进型算法^[30,31], 寻优效果得到了提高。粒子群算法能够对阴影条件下光伏阵列的非线性输出特性进行快速寻优, 但是算法在寻优过程中会造成较大的电压波动, 对系统的稳定性会有一定的影响。

文献 [32] 采用神经网络算法进行了阴影条件下的 MPPT。该方法先采用遗传算法采样并优化不同环境下光伏阵列的电压电流数据, 再利用优化后的数据训练神经网络, 从而达到快速高效进行全局搜索的控制目的。但是此方法的不足在于目标函数可能因训练数据的数量不足而陷入局部极值点。

基于模糊逻辑的 MPPT 控制算法对阵列的实际参数和构成要求不高, 算法对阵列的电压电流进行采集, 通过模糊化、反模糊化等环节处理, 可以得到阵列的全局最大功率点, 然而算法对控制器的要求较高, 实际应用较少^[33,34]。

基于大数据的预测算法^[35,36]综合考虑了各种信息, 利用模糊逻辑、神经网络等算法对光伏阵列的输出功率进行评估, 对突发性的阴影遮挡考虑较少, 而且预测结果受所采用模型精确程度的影响, 运算量较大。

其他还有 Fibonacci 搜索法、黄金分割法、矩阵分割法等 MPPT 算法。文献 [37] 介绍了 Fibonacci 搜索法, 该方法的准确性和对环境的适应性都比较强, 但收敛速度比常规算法慢, 实用性不强。

总之, 光伏阵列的输出特性受阵列结构、温度、光照强度、组件特性等因素的共同影响, 在阴影条件下阵列的 $P-V$ 特性十分复杂, 造成阴影条件下阵列的最大功率追踪控制成为一个难

题。随着智能控制技术与电力电子器件的迅速发展,考虑到系统成本因素的影响,多峰值算法研究成为解决阴影条件下 MPPT 问题的主要应对方法。然而现有的多峰值 MPPT 算法各有各的特点,暂时还没有一种算法能够兼顾快速性、准确性、稳定性和适用性,仍需继续研究。

1.3 微电网控制研究现状

1.3.1 微网及其控制算法的研究现状

由于光伏并网发电系统直接将太阳能电池发出的电能逆变后馈给电网,因此需要有各种完善的保护措施。例如太阳能电池阵列输出电压的欠电压/过电压、电网电压欠电压/过电压、并网逆变器输出过流和漏电流保护等。然而,除了通常的电流、电压和频率监测保护外,太阳能光伏并网发电系统还需要考虑一种特殊的故障状态,即孤岛效应。

近年来,国外大量出现关于微网的研究成果,主要是对微网概念的阐述、建模、规划、DG 接入微网、微网的规划及可靠性评估、微网运行对内外电网电能质量的影响等方面。

文献^[38-41]对目前微网的研究做了综述,指出微网控制的主要目标如下:①调节微网内的馈线潮流,对有功和无功功率进行独立解耦控制;②调节每个微型电源接口处的电压,保证电压的稳定性;③孤网运行时,确保每个微电源能快速响应,并分担用户负荷;④根据故障情况或系统需要,平滑自主地与主网分离、并列或实现二者的过渡转化运行。根据以上目标,目前对微网中采用逆变器接口的 DG 系统,通常有 3 种控制策略: PQ 控制、V/f 控制、Droop 控制策略。

通常情况下, PQ 控制方式用于并网运行状态。在该状态下,微网内负荷波动、频率和电压扰动由大电网承担,各 DG 可以不考虑频率调节和电压调节,直接采用电网频率和电压作为调节基础,控制逆变器按照给定参考值进行有功功率和无功功率输出^[42,43]。

V/f 控制主要应用于独立运行和孤岛状态下的电压和频率调节。通过设定电压和频率参考值,在PI控制器作用下实时控制逆变器输出端口的电压和频率,可以作为恒压、恒频电源使用^[44,45]。

Droop控制策略是将逆变器的控制方式模仿传统电力系统下垂特性,通过解耦有功功率—无功功率与电压—频率之间的关系进行系统电压和频率调节的方式。常见的与传统同步发电机调节相似,采用有功—频率($P-f$)和无功—电压($Q-V$)的斜率控制方式^[46,47]。

目前,微网的主要控制方法如下。

1. 基于电力电子技术的“即插即用”与“对等”的控制方法^[48]

该方法根据微网的控制目标,灵活选择与传统发电机相似的下垂特性曲线作为微型电源的控制方式,利用频率有功下垂曲线将系统不平衡的功率动态分配给各机组,保证孤网下微网内的电力供需平衡和频率统一,具有简单、可靠的特点。但是,该方法没有考虑系统电压与频率的恢复问题,即传统发电机的二次调频问题。因此,当微网遭受严重破坏或干扰时,系统很难保证频率质量。另外,该方法基于电力电子技术对微型分布式发电系统进行控制,没有考虑传统发电机(如小型燃气轮机、柴油机)与微网的协调控制。

2. 基于功率管理系统的控制方法^[49]

该方法采用不同控制模块对有功无功分别进行控制,很好地满足了微网多种控制的要求,尤其是在调节功率平衡时,加入了频率恢复算法,能够很好地满足频率质量的要求。另外,针对微网中对无功的不同需求,功率管理系统采用了多种控制方法,从而增加了控制的灵活性并提高了控制性能。但是也没有考虑它们与含有调速器的常规发电机之间的协调控制。

3. 基于多代理技术的微网控制方法^[50]

该方法将传统电力系统中的多代理技术应用于微网的控制系