

前 言

配电网作为重要的国家基础设施，覆盖城乡区域，连接千家万户，支撑千行万业，是保障电力“落得下、用得上”的“最后一公里”，在建设新型能源体系、保障电力安全可靠供应、支撑能源清洁低碳转型等方面发挥了关键作用。随着分布式光伏、新能源汽车、新型储能等多元新要素大规模高比例接入，负荷聚合商、虚拟电厂等新业态、新模式蓬勃发展，配电网正逐步从单纯接受、分配电能给用户的电力网络，转变为源-网-荷-储融合互动、与上级电网灵活耦合的新型配电系统，呈现资源要素多样化、网络拓扑复杂化、运行控制交互化、市场主体多元化等新特征。

配电网运行协调控制是利用先进的通信、计算和控制技术，对接入配电网的大规模分布式源荷(如分布式光伏、储能、电动汽车充电桩/站等)进行统一调度、协同优化和分级管理，以确保配电网安全、可靠、经济、高效运行。当前，配电网作为承载大规模分布式源荷的枢纽平台，构建新型配电网运行协同控制技术体系，解决电压波动、反向重过载、谐波超标等关键问题，提升能量分层分区平衡能力，激励多元主体灵活互动，对促进分布式新能源消纳、提升配电网对分布式资源的承载能力意义重大。

本书作者多年来一直从事配电网运行分析、仿真与调度控制等方面的理论与应用研究。结合作者在配电系统运行控制领域的研究成果，本书阐述了大规模分布式电源接入配电系统的运行机理、形态演化和协调控制等方面的基础理论和前沿技术，力求为学术界与产业界在新型配电系统运行控制领域的创新实践提供有价值的参考。

全书共 9 章。第 1 章为大规模分布式源荷接入配电网运行控制概述；第 2 章研究分布式源荷建模方法；第 3 章探讨分布式源荷规模化接入对配电网的影响与分析；第 4 章聚焦配电系统承载力的提升技术，介绍配电网网络形态动态演化分析与评估方法；第 5 章和第 6 章分别阐述弱中心化配电网的运行特性以及交直流混合配电网运行优化；第 7 章介绍大规模分布式电源接入下中低压配电网分区优化与协调控制技术；第 8 章阐述大规模分布式电源接入下配电网运行仿真技术及软件；第 9 章面向新型电力系统发展目标，对未来新型配电系统运行协同控制技术进行展望。

本书由刘科研统稿，其中刘科研撰写第 1 章和第 9 章，贾东梨撰写第 2 章，

康田园撰写第 3 章，叶学顺撰写第 4 章，詹惠瑜撰写第 5 章，李昭撰写第 6 章，张振宇撰写第 7 章，霍龙撰写第 8 章。此外，本书参考了部分刊物上公开发表的文献资料，在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 大规模分布式源荷接入配电网运行控制概述	1
1.1 配电网发展趋势	1
1.2 配电网运行控制面临的关键挑战	2
参考文献	4
第 2 章 分布式源荷建模方法	5
2.1 分布式源荷运行机理分析与建模方法	5
2.1.1 分布式光伏、风力发电、储能电池运行机理分析与建模方法	5
2.1.2 常规负荷与新型负荷运行机理分析与建模方法	18
2.1.3 典型源荷的运行特性分析	28
2.2 随机性分布式电源与大规模随机负荷的时空聚合特性	35
2.2.1 多元源荷集群划分方法	35
2.2.2 随机移动负荷时空聚合等值模型构建方法	40
2.2.3 随机分布式电源聚合等值模型构建方法	48
参考文献	49
第 3 章 分布式源荷规模化接入对配电网的影响与分析	51
3.1 分布式源荷接入对配电网的影响	51
3.1.1 分布式源荷接入对配电网结构形态的影响	51
3.1.2 分布式源荷接入对配电网运行调控的影响	52
3.1.3 分布式源荷接入对配电网电能质量的影响	53
3.2 有源配电网电压和功率分布规律	55
3.2.1 有源配电网电压分布规律	55
3.2.2 有源配电网功率分布规律	59
3.2.3 仿真分析与验证	62
3.3 有源配电网电压波动特性	65
3.3.1 电压波动量化方法	65
3.3.2 电压波动综合评估	72
3.3.3 电压波动评估算例	77
3.4 有源配电网短路故障与谐波耦合特性	80

3.4.1	有源配电网故障特性	80
3.4.2	有源配电网谐波特性	87
3.4.3	短路故障与谐波信号耦合特性仿真	91
	参考文献	93
第4章	面向承载力提升的配电网网络形态动态演化分析	95
4.1	配电网网络形态演化分析	95
4.1.1	传统配电网网络形态	95
4.1.2	高供电可靠性配电网网络形态	98
4.1.3	新型配电系统网络形态	100
4.1.4	新型配电系统复杂形态演化规律	103
4.2	大规模分布式电源接入下配电网的承载力评估方法	104
4.2.1	配电网承载力评估指标体系构建	104
4.2.2	配电网承载力评估关键指标计算方法	105
4.2.3	基于动态权重的配电网承载力综合评估方法	112
4.3	新型配电网形态下的承载力提升及动态调整策略	114
4.3.1	新型配电网动态调整策略	115
4.3.2	基于台区-馈线-区域多层级平衡机制的运行控制	125
4.3.3	基于动态电压分区的配电网分层分级协调控制策略	127
	参考文献	132
第5章	基于源荷动态匹配的弱中心化配电网运行特性	133
5.1	弱中心化配电网双向潮流模型	133
5.1.1	新型弱中心化配电网	133
5.1.2	基于源荷动态功率匹配的弱中心化配电网双向潮流模型	135
5.2	故障场景下弱中心化配电网功率平衡控制方法	137
5.2.1	故障场景下弱中心化配电网运行特性	137
5.2.2	配电网故障恢复与快速功率平衡控制方法	140
5.3	弱中心化配电网互联互通能力及提升方法	148
5.3.1	基于边-云、边-边的弱中心化配电网控制架构	148
5.3.2	考虑边-云协同的弱中心化配电网局部-全局协调方法	152
	参考文献	161
第6章	交直流混合供电模式下配电网运行优化	162
6.1	交直流混合配电网典型网架结构	162
6.1.1	背靠背交互	162
6.1.2	辐射式交互	163
6.1.3	手拉手交互	163

6.1.4 环式交互	164
6.1.5 交直流混合配电网典型应用场景	165
6.2 交直流混合配电网潮流计算方法	166
6.2.1 交直流混合配电网变流器模型	166
6.2.2 交直流混合配电网潮流计算模型	168
6.2.3 算例验证	170
6.3 考虑多台区互联的交直流混合配电网双层协同优化调度方法	173
6.3.1 多台区互联的交直流混合配电网	173
6.3.2 多台区互联的交直流混合配电网优化调度模型	177
6.3.3 求解方法	179
6.3.4 算例分析	180
参考文献	185
第 7 章 大规模分布式电源接入下中低压配电网分区优化与协调控制	187
7.1 中低压配电网分区优化与协调控制架构	187
7.1.1 基于安全域的配电网分层分区划分方法	187
7.1.2 配电网分层分区态势感知技术	197
7.2 区域内资源自趋优控制技术	204
7.2.1 设备级自趋优运行控制方法	204
7.2.2 系统级自趋优运行控制方法	212
7.3 区域间多层次协调控制技术	217
7.3.1 多措施协同配合的配电网运行优化方法	217
7.3.2 区域间跨层级协调控制方案	223
7.3.3 中低压配电网多层次协调控制策略	226
参考文献	231
第 8 章 大规模分布式电源接入下配电网运行仿真技术及软件	233
8.1 常用配电网仿真分析软件介绍	233
8.1.1 ETAP 仿真软件	233
8.1.2 OpenDSS 仿真软件	235
8.1.3 CYMDIST 仿真软件	236
8.1.4 PowerWorld 仿真软件	236
8.1.5 DIgSILENT PowerFactory 仿真软件	237
8.2 配电网安全运行仿真与分层控制技术	238
8.2.1 配电网安全运行仿真技术	238
8.2.2 配电网分层控制技术	240
8.3 配电网分层协调控制与仿真分析软件	246

8.3.1	软件架构设计	246
8.3.2	数据流	246
8.3.3	数据接口适配	246
8.3.4	软件应用架构	247
8.3.5	数字仿真分析功能	248
8.3.6	协调控制功能	255
8.4	配电网分层协调控制与仿真分析软件工程应用	262
8.4.1	支撑城市核心区高品质供电工程应用	262
8.4.2	支撑县域高比例分布式电源接入工程应用	264
8.4.3	支撑低碳园区灵活运行工程应用	264
	参考文献	267
第 9 章	展望	269
	参考文献	271

第 1 章 大规模分布式源荷接入配电网 运行控制概述

1.1 配电网发展趋势

配电网作为新型电力系统建设的主战场，覆盖城乡区域，连接千家万户，支撑千行万业，是保障电力“落得下、用得上”的“最后一公里”，承担着广泛的政治责任、经济责任、社会责任，在推进中国式现代化、建设新型能源体系、保障电力安全可靠供应、支撑能源清洁低碳转型等方面发挥了重要作用。新型配电系统中，配电网有源化特征显著，大规模分布式电源、电动汽车充电桩/站、分布式储能等多元化源荷正在以容量小、数量多、空间分布广泛、时间波动性强的特点接入配电网，使得配电网从单纯接收、分配电能的电力网络逐步转变为源-网-荷-储深度融合的关键资源配置平台。这一转型正在重塑配电网的源荷结构、网络形态和运行方式，配电网运行控制技术体系需要与时俱进，适配复杂网络拓扑结构、多类型多主体资源接入、电力电子化并网装置规模化应用等一系列配电网发展过程中的新特征。

当前，多元化分布式源荷大规模接入配电网，使其兼具电源侧清洁替代和负荷侧电能替代的关键作用。在电力供给方面，分布式新能源渗透率快速增长，配电网有源化特征显著。2022~2024 年，中国分布式光伏并网容量从 157.62GW 增长至 374.78GW，3 年时间增长近 138%^[1,2]。在电力消费方面，预计 2030 年中国全社会用电量达到 $1.07 \times 10^{13} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，2060 年达 $1.7 \times 10^{13} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 左右^[3]，其中 90% 以上通过配电网供电。在供需互动方面，截至 2024 年，全国新能源汽车产量突破 1300 万辆，产销量连续 10 年保持全球第一^[4]。

新形势下，我国对新型配电系统建设发展高度重视。2024 年 2 月，国家发展改革委、国家能源局印发的《关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》(发改能源〔2024〕187 号)指出：结合分布式新能源发展目标，有针对性加强配电网建设，配套完善电网稳定运行手段，保障电能质量；全面提升可观可测、可调可控能力，逐步构建主配微网协同的新型有源配电网调度模式；提高状态实时感知与故障处理能力，加强分级分层控制，强化分布式电源管控能力。2024 年 7 月，国家发展改革委、国家能源局、国家数据局印发的《加快构建新型电力系统行动方

案(2024—2027 年)》(发改能源〔2024〕1128 号)明确指出:强化分布式资源管控能力,提升配电网层面就地平衡能力和主网的主动支撑能力。同年 8 月,国务院办公厅发布《中国的能源转型》白皮书,为推动全球绿色发展注入了“中国动力”。高比例新型源荷接入配电网,推动了传统配电网向新型配电系统演进。以加快构建新型配电系统为总目标,利用智能用电技术赋能新型配电系统建设,是切实提升新型配电系统承载力、灵活性与可靠性的关键手段。

电力行业和研究院所均积极响应政策导向,随着大规模分布式新能源的快速发展,由海量新要素、新业态耦合互动形成的新型配电系统关键技术研发已进入科研攻关的“深水区”。当前,世界主要国家均将智能配用电领域作为电网转型升级的关键所在,相继出台专项规划,如美国的“电网弹性和创新伙伴关系计划”、欧盟的“电网行动计划”、日本的“第六次能源基本计划”,纷纷将配电网作为发展建设重点,要求持续加大投资力度,强化科研技术攻关。“十三五”以来,我国在分布式电源接入、配电网典型供电模式、分布式资源运行控制、用户侧需求互动等方面进行了深入研究,并在多地开展了试点示范工程与实践应用。随着“双碳”目标的持续推进,我国已成为全球分布式新能源装机规模最大、新能源汽车保有量最多的国家,配电系统的形态结构、运行特性都发生了根本性变革,但是新型配电系统规划设计、运行控制、资源互动等关键技术研究路线尚不明晰,亟须开展相关技术研究,全面提升配电系统安全供电保障能力、清洁能源消纳能力、多元负荷承载能力与资源优化配置能力,支撑高水平科技自立自强能力建设,加快抢占国际配电系统领域关键技术制高点。

在发展趋势和政策引导的共同驱动下,当前我国配电网运行控制技术的先进性、成熟性与国外相比整体处于并跑状态。随着分布式源荷比例的进一步提高,配电网运行控制所面临的新挑战正在不断涌现。

1.2 配电网运行控制面临的关键挑战

新型配电系统运行工况日趋复杂,分布式光伏、储能系统、电动汽车充电桩/站等新要素大规模接入,以及虚拟电厂、微电网、负荷聚合商等新业态不断涌现,对系统的灵活接入能力、动态响应特性以及对新业务模式的综合承载力提出了更高的要求。与此同时,随着经济社会的持续发展,电力需求规模保持刚性增长,且受极端天气、产业调整、用户行为等多重因素影响,其波动性与不确定性显著增强。另外,尽管分布式资源总量可观,但其可调节潜力尚未被充分挖掘,参与电网调峰、需求响应等调节任务的能力与可靠性仍有待进一步提升。在此背景下,亟须系统性地开展有源配电网安全高效、灵活运行的关键技术攻关,重点突破多

类型分布式源荷、多元化主体的多层级有源配电网运行协调控制。目前,要实现有源配电网安全、高效、经济的运行控制优化目标,主要面临以下四个方面的关键挑战。

(1) 缺乏对多类型分布式源荷规模化接入的新型配电系统运行机理的深入认知。分布式光伏、储能、电动汽车充电桩/站等多种类型分布式源荷,以及电力电子化并网设备的大规模应用,颠覆了传统以确定性、无源性为主导的运行模式。从无源到有源,从单向辐射到双向潮流,从被动受控到主动参与,这种转变催生了复杂的多要素互动系统,亟须重新定义配电网运行调控的逻辑架构^[5]。同时,分布式源荷的动态行为在时间尺度上(从毫秒级的波动到季节性的变化)和空间尺度上(多层级多分区配电网)高度耦合,局部节点的电压和功率波动可能通过网络传播引发电压暂降、谐波加剧等连锁问题,其影响难以精确量化。构建新型配电系统运行机理分析方法,已成为亟待突破的基础理论问题。

(2) 新型配电系统的形态演化规律不清晰。明确新型配电系统包括网络架构和控制模式在内的形态特征是研究“双高”配电系统保护控制新方法和高效调控策略的基础。然而,在分布式电源、电力电子化设备/负荷点多、分散且多变的渐进态势下,新型配电系统源-网-荷-储各环节的多时空强不确定性导致系统形态演化形式多样、演化规律复杂,网架结构与控制模式演化的内在联系尚不明晰,难以刻画新型配电系统多维度形态的演化过程^[6]。因此,如何刻画源荷高度随机和强时空不确定条件下的配电网结构形态、形态演化路径是亟待解决的关键科学问题。

(3) 新型配电系统多层级特征显著、源-网-荷-储资源时空分散、主体多元化,协同调控难度大^[7]。海量分布式光伏、储能、柔性负荷等资源单体容量小,在空间上广泛分布,在时间上出力/用电行为各异,例如,电动汽车快充桩/站的冲击性负荷对配电网运行稳定性和电能质量构成严峻考验。同时,分布式资源归属权分属不同主体,难以直接参与电网调度。因此,尽管分布式资源总量巨大,但目前缺乏高效、经济的聚合技术,将分散资源整合成规模可控、灵活响应的聚合体,使其灵活调节和主动支撑潜力得以充分调控释放。单纯依靠就地化处理已难以实现源-网-荷-储的协同互动,因此,必须推动配电网从相对独立的设备层级运行向多层级互联架构转型,突破分层分区协同优化运行技术^[8],以实现更大范围内的资源优化配置。

(4) 多要素、规模化分布式电源接入的新型配电系统运行调控缺乏精准高效的仿真工具。仿真是配电网安全分析、运行优化和故障推演的基石^[9]。然而,传统配电网仿真技术在面对新型系统时存在明显瓶颈:在建模层面,难以精确描述海量电力电子设备带来的高度非线性、多时间尺度耦合的动态过程;在计算层面,无法兼顾跨电压等级、超大规模节点计算的效率与暂态-稳态多时间尺度仿真的精度。同时,在对海量分布式源荷及其负荷聚合商、虚拟电厂、园区微电网等多类

型新业态进行群调群控协同优化仿真时,要求仿真工具必须能够快速、精准地模拟各种调控策略下系统的动态响应。但现有仿真技术无法有效及时地评估调控指令在复杂网络中的执行效果,从而无法为分布式电源的安全接入与高效利用提供可靠的分析依据和决策支持。

针对上述挑战,本书将围绕有源配电网运行协调控制的理论基础、关键技术与相关工程实践进行系统阐述,旨在为读者构建一个从核心认知到关键方法再到实践工具的完整知识体系,为推动大规模分布式源荷接入配电网的安全、高效、经济、灵活运行技术创新提供参考。

参 考 文 献

- [1] 国家能源局. 2024 年光伏发电建设情况[R]. 北京: 国家能源局, 2024.
- [2] 国家能源局. 2022 年光伏发电建设情况[R]. 北京: 国家能源局, 2022.
- [3] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2021.
- [4] 新华社. 我国新能源汽车产销量连续 10 年保持全球第一 [EB/OL]. (2025-09-09). https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202509/content_7039823.htm.
- [5] 舒印彪, 汤涌, 张正陵, 等. 新型配电网构建及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6721-6732.
- [6] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [7] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4330-4341.
- [8] 盛万兴, 刘科研, 李昭, 等. 新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 1-18.
- [9] 盛万兴. 复杂有源配电网仿真基础理论[M]. 北京: 科学出版社, 2023.

第 2 章 分布式源荷建模方法

随着能源转型的深入推进和电气化进程的加速，分布式光伏、电动汽车充电桩、用户侧储能等新型分布式电源在配电网中呈现爆发式增长。这些元素具有显著的分散性、间歇性和随机性特征，其大规模接入正在深刻改变传统配电网的潮流分布、运行特性与控制逻辑。同时，多元化的负荷需求，特别是新型随机负荷(如电动汽车)的移动性和不确定性，进一步加剧了系统运行的复杂度。本章旨在系统性地探讨这些大规模分布式电源与随机负荷接入配电网的建模方法，为后续研究奠定模型基础。

2.1 分布式源荷运行机理分析与建模方法

2.1.1 分布式光伏、风力发电、储能电池运行机理分析与建模方法

1. 分布式光伏运行机理分析与建模方法

光伏发电单元的结构示意图如图 2-1 所示，一共分为三部分，包括 DC/AC 逆变器、Boost 电路与光伏阵列。

1) 光伏阵列建模

光伏阵列作为一种直流电源，通常需要经过电力电子装置将直流电变换为交流电才能接入电网。同时，光伏阵列自身具有的伏安特性决定了它必须通过最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)环节，才能获得理想的运行效率。此外，为了提高光伏阵列并网运行的安全性和可靠性，光伏发电系统还需要并网控制环节，以保证光伏阵列的输出在较大范围内变化时，始终以较高的效率进行电能变换。光伏阵列、电力电子变换装置、最大功率控制器、并网控制器构成了一个完整的光伏发电单元^[1]。

等效电路模型由光生电流源、模拟扩散效应的二极管以及串并联等效内阻构成。如图 2-2 所示光伏阵列等效电路，模型的输出电流电压关系为

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[e^{\frac{q}{AkT} \left(\frac{U}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)} - 1 \right] - \frac{N_p}{R_p} \left(\frac{U}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right) \quad (2-1)$$

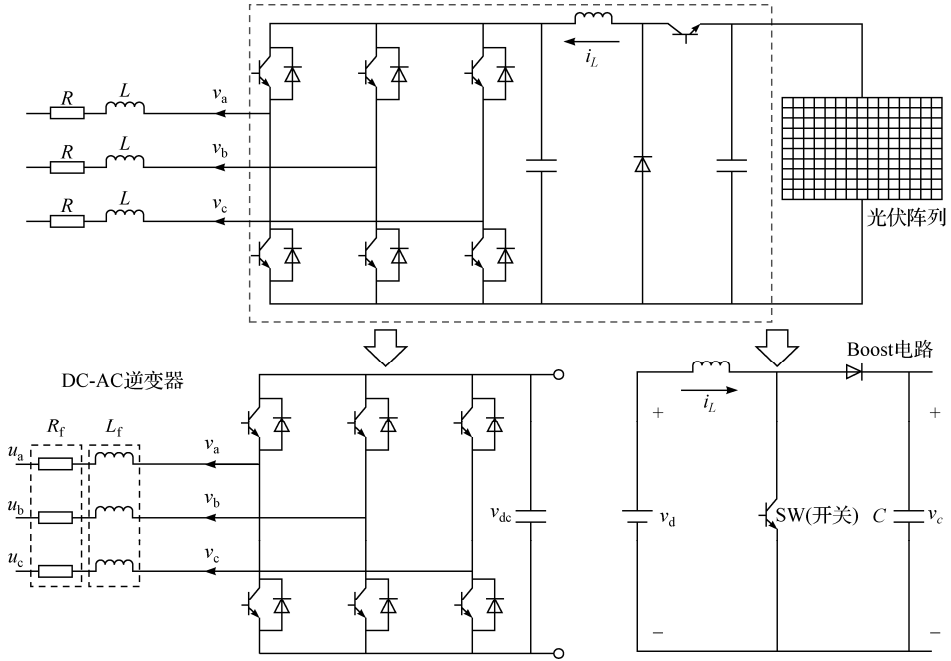


图 2-1 光伏发电单元的结构示意图

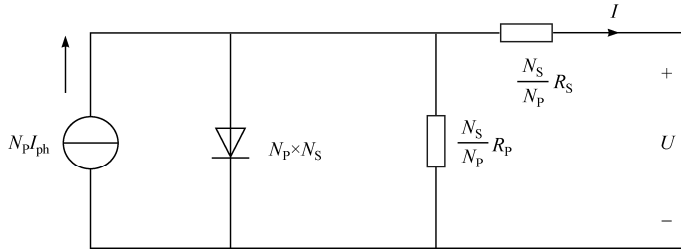


图 2-2 光伏阵列等效电路

式中, I 为光伏电池输出电流; U 为光伏电池输出电压; I_{ph} 为光生电流; I_s 为二极管饱和电流; T 为光伏电池工作的热力学温度; A 为二极管特性拟合系数; R_s 、 R_p 分别为串联阻抗和并联阻抗; N_s 、 N_p 分别为串联模块和并联模块数。

2) 光伏发电单元建模

令 P_{mpp} 是某温度下、辐照度为 1kW/m^2 时光伏阵列输出功率的基准值, T 为当前温度, I_{tr} 为当前辐照度, 利用各温度与对应的输出功率系数 F_T 曲线($P_{mpp}-T$ 图)和当前温度 T 可以得到当前的输出功率系数 F_T (当 $T = P_{mpp}$ 时, $F_T=1$)。也就是说, 光伏发出功率由当前辐照度、基准值与当前温度共同决定, 由式(2-2)即可求出光伏板发出的功率 P_{pv} :

$$P_{pv} = I_{tr} P_{mpp} F_T \quad (2-2)$$

逆变器设有启动功率和切断功率,当光伏板发出的功率 P_{pv} 小于切断功率时,逆变器停止工作;当光伏板发出的功率 P_{pv} 大于启动功率时,逆变器开始工作。考虑到逆变器损耗,逆变器模型设置了效率系数。光伏板发出的功率 P_{pv} 乘以其对应的效率系数 E_{FF} ,得到整个光伏系统发出的有功功率 P_n 为

$$P_n = P_{pv} E_{FF} \quad (2-3)$$

光伏板发出的功率 P_{pv} 对应的效率系数 E_{FF} 由 P_{pv} - E_{FF} 曲线得到。由式(2-2)、式(2-3)可以得到

$$P_n = I_{\pi} P_{mpp} F_T E_{FF} \quad (2-4)$$

光伏单元输出的无功功率有两种确定方法:①恒功率因数方法,给定功率因数 p_f ,其符号与无功功率的符号一致,当无功功率为正时,表示光伏单元发出无功功率,无功功率由式(2-5)计算;②恒无功方法,这时光伏单元输出的无功功率 Q_n 为给定值 Q_{spec} ,可由式(2-6)得到当前光伏单元的视在功率 S_n 。 Q_n 与 S_n 的表达式分别为

$$Q_n = P_n \sqrt{\frac{1}{p_f^2} - 1} \quad (2-5)$$

$$S_n = \sqrt{P_n^2 + Q_n^2}, \quad Q_n \equiv Q_{spec} \quad (2-6)$$

3) 光伏并网控制策略及建模

光伏发电系统可分为基于单级式并网型逆变器的光伏发电系统和基于双级式并网型逆变器的光伏发电系统。

(1) 基于单级式并网型逆变器的光伏发电系统建模。

单级式并网型逆变器首先将光伏阵列输出的直流电转换成交流电,进而实现并网。由于只含有一级逆变环节,单级式并网型逆变器需要同时实现最大功率点跟踪和并网控制两个控制目标。基于单级式并网型逆变器的光伏发电系统具有结构简单、电力电子器件少、光电转换效率高等优点。但由于一个逆变环节需要同时实现两个控制目标,控制参量多且相互耦合,相应的控制系统设计较为复杂。

基于单级式并网型逆变器的光伏发电系统如图 2-3 所示,主要包括光伏阵列、稳压电容、三相全桥逆变器、滤波器、隔离变压器和交流电网。控制环节多采用双环控制,外环由直流电压和无功功率控制,内环由基于 dq 同步旋转坐标系的电流控制^[2]。

基于 dq 同步旋转坐标系的控制环节需要利用锁相环(phase locked loop, PLL)将电网侧电压作为输入信号,并自动追踪其频率与相位。如图 2-4 所示,PLL 主要由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器组成^[3]。

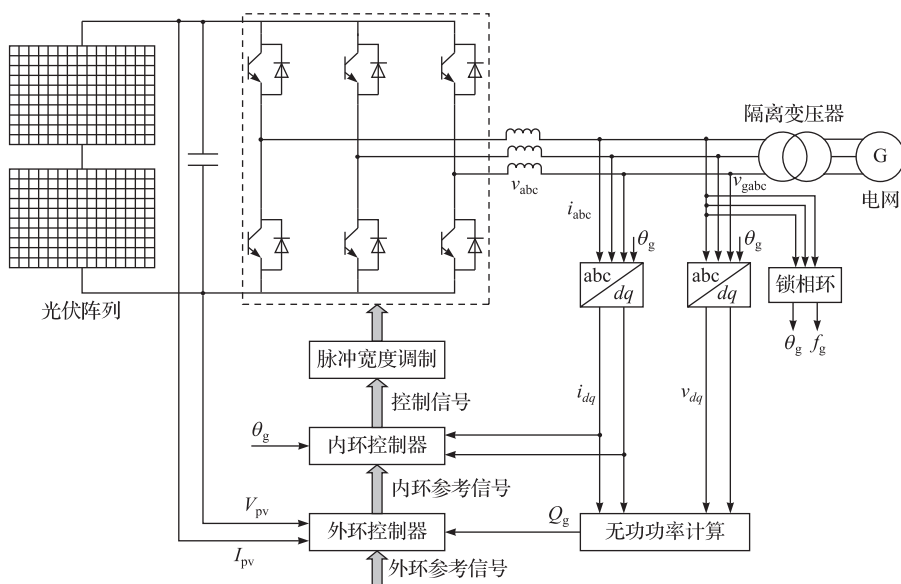


图 2-3 基于单级式并网型逆变器的光伏发电系统示意图

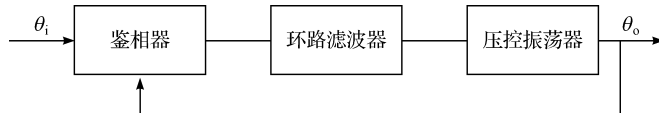


图 2-4 PLL 结构示意图

鉴相器通过比较输入信号相位 θ_i 和压控振荡器的输出信号相位 θ_o ，产生一个关于相位差的输出信号；环路滤波器用于滤除鉴相器输出信号中的高频分量；压控振荡器受环路滤波器输出电压的控制，其振荡频率将趋近 PLL 输出信号频率，且 PLL 输入信号与输出信号的相位将保持特定关系，即实现锁相。通过 PLL 实现锁相后，进一步进行如下的外环控制和内环控制。

① 外环控制。

在基于单级式并网型逆变器的光伏发电系统中，外环控制包括光伏阵列最大功率控制和无功功率控制两部分。如图 2-5 所示，光伏阵列最大功率控制过程中，将不断检测光伏阵列的输出电流 I_{pv} 和电压 V_{pv} ，然后通过最大功率点跟踪技术和限幅操作，得到直流电压的参考值 $V_{dc,ref}$ ，其与光伏阵列输出电压 V_{pv} 之间的差值 ΔV_{dc} 经过 PI 环节和限幅操作，得到有功电流参考值 $I_{d,ref}$ ，作为内环控制的输入信号之一。在无功率控制过程中，系统的实际无功功率 Q_{out} 与无功功率参考值 Q_{ref} 的差值 ΔQ 经过 PI 环节和限幅操作，得到无功电流参考值 $I_{q,ref}$ ，作为内环控制的另外一个输入信号。

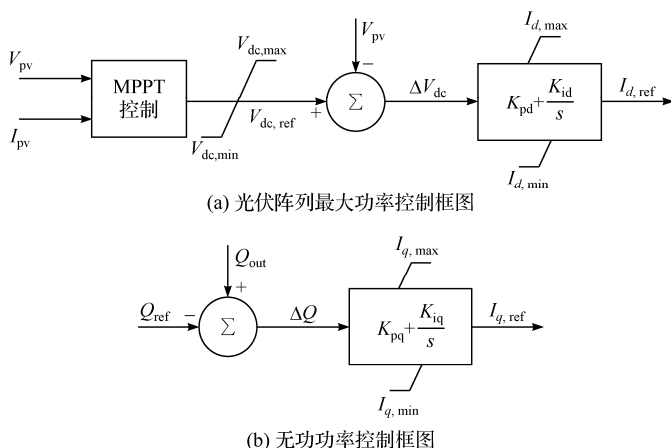


图 2-5 基于单级式并网型逆变器的光伏发电系统的外环控制框图

② 内环控制。

内环控制的实现需要将 abc 坐标系下的电压和电流变量经 Clarke 变换和 Park 变换后, 转换为 dq 同步旋转坐标系下的相应变量。单级式并网型逆变器在公共连接点(point of common coupling, PCC)处的电压与逆变器出口处电压和电流的关系为

$$\begin{cases} v_{ga} = L_f \frac{di_a}{dt} + R_f i_a + v_a \\ v_{gb} = L_f \frac{di_b}{dt} + R_f i_b + v_b \\ v_{gc} = L_f \frac{di_c}{dt} + R_f i_c + v_c \end{cases} \quad (2-7)$$

式中, v_a 、 v_b 和 v_c 为逆变器出口处的三相交流电压; v_{ga} 、 v_{gb} 和 v_{gc} 为 PCC 处电压(滤波后的三相交流电压); i_a 、 i_b 和 i_c 为交流侧三相电流; L_f 和 R_f 分别为滤波电感值和滤波电阻值。

经过 Clarke 变换和 Park 变换, 式(2-7)中 abc 坐标系下的电压和电流可以转换成 dq 同步旋转坐标系下 d 轴和 q 轴对应的电压和电流分量:

$$\begin{cases} V_{gd} = V_d - \omega L_f I_q + \left(L_f \frac{dI_d}{dt} + R_f I_d \right) \\ V_{gq} = V_q - \omega L_f I_d + \left(L_f \frac{dI_q}{dt} + R_f I_q \right) \end{cases} \quad (2-8)$$

式中, ω 为网侧角频率; V_{gd} 和 V_{gq} 分别为 PCC 处电压的 d 轴和 q 轴分量; V_d 和 V_q 分别为逆变器出口处电压的 d 轴和 q 轴分量; I_d 和 I_q 分别为交流侧电流的 d 轴和 q 轴分量。通常令

$$\begin{cases} V'_d = L_f \frac{dI_d}{dt} + R_f I_d \\ V'_q = L_f \frac{dI_q}{dt} + R_f I_q \end{cases} \quad (2-9)$$

则式(2-8)可写为

$$\begin{cases} V_{gd} = V_d - \omega L_f I_q + V'_d \\ V_{gq} = V_q - \omega L_f I_d + V'_q \end{cases} \quad (2-10)$$

基于单级式并网型逆变器的光伏发电系统的内环控制如图 2-6 所示。将外环控制输出的有功电流参考值 $I_{d,\text{ref}}$ 和无功电流参考值 $I_{q,\text{ref}}$ 作为内环控制的输入信号, 其与实际有功电流 I_d 和无功电流 I_q 的差值 ΔI_d 和 ΔI_q , 经 PI 环节和限幅操作后, 计算得到的参考电压与 PCC 处实际电压相加减, 得到 PCC 处的 d 轴电压参考值 $V_{gd,\text{ref}}$ 和 q 轴电压参考值 $V_{gq,\text{ref}}$ 。

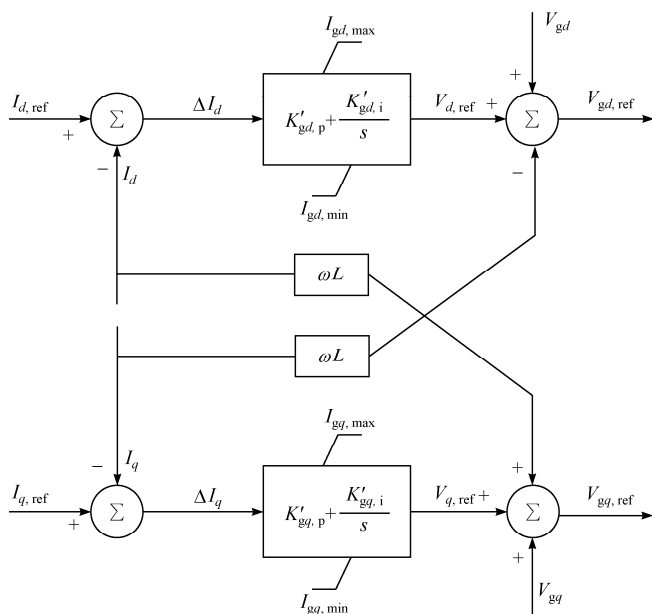


图 2-6 基于单级式并网型逆变器的光伏发电系统的内环控制框图