

分类号: TM715

单位代码: 10335

密 级: 无

学 号: 21860596

浙江大学

硕士专业学位论文



中文论文题目: 低压配电网分布式光伏消纳能力评估研究

英文论文题目: Research on distributed photovoltaic accommodation

capacity evaluation of low-voltage distribution network

申请人姓名: 陈郁典

校内导师(组): 郭创新

行业导师: 洪蕾

专业学位类别、领域: 能源动力(电气工程)

研究方向: 分布式光伏

培养类型: 非全日制定向

所在学院: 工程师学院

论文提交日期 2022年12月

低压配电网分布式光伏消纳能力评估研究



论文作者签名:

指导教师签名:

论文评阅人 1: 隐名评阅

评阅人 2: 隐名评阅

评阅人 3: 隐名评阅

评阅人 4: _____

评阅人 5: _____

答辩委员会主席: 徐政/教授/浙江大学电气工程学院

委员 1: 吴国忠/教授/浙江大学电气工程学院

委员 2: 杭大建/高级工程师/嘉兴供电公司

委员 3: 朱卫东/高级工程师/杭州供电公司

委员 4: 宋东驰/高级工程师/杭州供电公司

委员 5: _____

答辩日期 2022 年 12 月 11 日

摘要

在“双碳”战略指引下，我国大力推进光伏发电，分布式光伏在低压配电网接入的比例逐渐增高，加剧了电压越限问题，其不对称接入会加重电网的三相不平衡程度，同时过多的光伏功率无法就地消纳还会引起电网潮流反向流动增大网损，影响低压配电网安全经济运行，因而合理评估高比例光伏接入低压配电网的消纳能力具有重要的理论意义和实践价值。本文主要工作如下：

(1) 为了完善低压配电网光伏消纳能力评估体系，综合电能质量、环保性和经济性三方面，提出电压偏差、电压不合格率、三相不平衡度、环境改善程度和设备投资回报率等多个指标，采用主成分分析法和层析分析法进行组合赋权，建立低压配电网分布式光伏消纳能力评估体系。

(2) 为了解决三相四线制低压配电网光伏消纳能力评估问题，首先分析低压配电网拓扑结构并推导潮流计算方法，在此基础上以光伏消纳量最大为目标函数，综合考虑潮流和三相不平衡等约束建立最优潮流模型，评估不同光伏接入场景下综合指标最优时的光伏消纳能力。

(3) 为了兼顾所建立最优潮流模型的求解效率和准确性，将低压配电网分为三相平衡和三相不平衡状态分别进行评估。在三相平衡情况下，将线路简化为三相三线制，采用二阶锥松弛将三相潮流方程作凸松弛变形；在三相不平衡情况下，将同时含有幅值和相角的复数变量拆分为实数变量，以实数矩阵表示并凸化模型。最后通过两种情况的对比试验，验证模型的可行性和求解的有效性。

关键词： 低压配电网，分布式光伏，消纳能力评估，最优潮流，三相不平衡

Abstract

Under the guidance of the "dual carbon" strategy, China vigorously promotes photovoltaic(PV) power generation. The proportion of distributed PV connected to the low-voltage distribution network has gradually increased, aggravating the problem of voltage violations, and its asymmetric connection will aggravate the three-phase unbalance. Meanwhile, too much PV power cannot be absorbed locally, which will cause the reverse power flow to increase the network loss, affecting the safe and economic operation of the low-voltage distribution network. Therefore, it has important theoretical significance and practical value to reasonably evaluate the accommodation capacity of a high proportion of PV connected to the low-voltage distribution network. The main works are as follows:

Firstly, in order to improve the low voltage distribution network photovoltaic absorption capacity evaluation system, this paper considers the three aspects of power quality, environmental protection and economy, and proposes several evaluation indexes such as voltage deviation, three-phase unbalance, degree of environmental improvement, equipment ROI, and adopts principal component analysis method and analytic hierarchy process achieves the optimal combination of weighting for each index, establishing evaluation system of distributed PV accommodation capacity of Low-Voltage distribution network.

Secondly, in order to solve the PV accommodation capacity evaluation problem of three-phase four-wire low-voltage distribution network, this paper first analyzes the topology of low-voltage distribution network and deduces the power flow calculation method. On this basis, with the goal of maximum PV accommodation capacity, the optimal power flow model is established by considering the power flow and the three-phase imbalance degree and other indicators, and the PV accommodation capacity is evaluated when the comprehensive index reaches the optimal in different photovoltaic access scenarios.

Thirdly, in order to take into account the efficiency and accuracy of the solution of the optimal power flow model, the low-voltage distribution network can be divided into three-phase balanced and three-phase unbalanced states for evaluation respectively. In the case of three-phase equilibrium, the line is simplified to three-phase three-wire system, and the three-phase power flow equation is deformed by convex relaxation using second-order cone relaxation. In the case of three-phase imbalance, the complex variables containing both amplitude and phase angle are split into real variables, which are represented by real

matrix, and the model is convex. Finally, the feasibility of the model and the effectiveness of the solution are verified by the comparison test of the two cases.

Key words: low-voltage distribution network, distributed photovoltaic, accommodation capacity assessment, optimal power flow, three-phase unbalance

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 当前研究中存在的不足.....	9
1.4 本文的主要工作.....	10
2 分布式光伏并网模型及其影响	13
2.1 引言	13
2.2 分布式光伏发电原理	13
2.3 分布式光伏并网方式.....	16
2.4 分布式光伏发电对低压配电网的影响	18
2.5 算例分析	25
2.6 本章小结	28
3 低压配电网分布式光伏消纳能力评估指标体系	30
3.1 引言	30
3.2 指标的选取及其计算.....	30
3.3 指标评估方法.....	35
3.4 分布式光伏消纳能力综合评估方法	39
3.5 本章小结	43
4 基于平衡配电网的光伏消纳能力评估研究	44
4.1 引言	44
4.2 低压配电网网架特征.....	44
4.3 低压配电网基础模型.....	45
4.4 三相平衡配电网的光伏消纳能力评估模型	51
4.5 基于评估模型二阶锥松弛求解方法	54
4.6 算例分析	56
4.7 本章小结	59
5 基于不平衡配电网的光伏消纳能力评估研究	61
5.1 引言	61
5.2 三相四线制低压配电网潮流推导	61
5.3 不平衡低压配电网的光伏消纳能力评估模型	66
5.4 最优潮流模型的凸化求解方法	69
5.5 算例分析	71
5.6 本章小结	75
6 结论与展望.....	76

6.1 研究结论.....	76
6.2 研究展望.....	77
参考文献.....	79

1 绪论

1.1 研究背景和意义

在全球能源转型背景下，可再生能源尤其是光伏得到了迅猛发展。当前，能源发电形势仍然以化石能源为主导。化石能源是非再生能源，其形成时间长且总量有限，同时还会造成环境污染，严重影响了经济的可持续发展^[1-5]。太阳能作为可再生资源相较于化石能源有诸多优点，分布广泛、无污染、无噪声且无需消耗燃料，取之不尽、用之不竭，光伏发电是对太阳能的充分利用^[6, 7]。

当前，全球日益重视对环境的保护，光伏发电的发展存在着紧迫性和必然性^[8]。化石能源燃烧时会产生出大量二氧化碳（CO₂）和其它污染气体。从一方面来说，二氧化碳等温室气体的排放，造成了全球性的气温上升。1978年至今，海平面抬升的速度逐年增快^[9]引发了一系列问题，如频繁的极端气候、日益严重的全球性干旱等^[10]。另一方面来说，化石能源的燃烧会释放大量氮氧化物、SO₂等气体，这些气体进入大气层会引发臭氧层破坏、酸雨等生态问题。同时，燃烧时所产生的可吸入颗粒物会对人类的健康造成威胁。

近年来，分布式光伏接入低压配电网的比例逐渐提高。早期，集中发电是光伏发电的主要形式，在我国西北地域如甘肃、新疆等地区有很多大的光伏电站，光伏升压后经过高压输电线路的传输，为远方的负荷供电，然而由于受到线路输电容量的限制，依然存在大量弃光现象。相较于集中并网的光伏电站，分布式的光伏设备接入电网可以做到太阳能的就地利用，改善由大容量输电引起的线路损耗和输电容量占用等问题^[11]。根据《2021年全国光伏发电统计信息》，截止2021年底，我国新增光伏装机容量达54.88GW，较2020年增长了13.9%，其中29.28GW为分布式装机，占总新增容量的53.4%，其中2021年的户用装机容量达到了21.6GW，较2020年增长了113.3%，占2021年我国总体新增光伏装机容量的39.4%^[12]。因而，增加低压配电网中分布式光伏的接入比例已成为光伏利用的必然趋势^[13]。

然而，在低压配电网接入分布式光伏比例提高会对电网各项运行参数造成影响：

（1）电压越限

配电网主要以居民用电负荷为主，会出现源荷不匹配的问题，大大增加了电压越

限的可能性。白天光伏并网功率高，而此时居民的负荷较低；晚间是居民用电高峰，而此时光伏发电功率接近于零^[14-16]。因此，若接入的分布式光伏比例过高，白天在太阳光照充足时会产生大量的功率，而此时负荷较低则产生功率剩余，导致过电压的问题；而在晚间，负荷处于高峰期，光伏功率为零无法改善低压配电网所存在的固有的电压下降问题。因而，配电网电压越上下限的问题在分布式光伏设备高比例并网后会加重^[17]。

（2）三相不平衡

配电网本身存在三相不平衡问题，在低压配电网中尤为显著，由于用户的用电行为是随机不可控的，同时分布式光伏接入配电网的容量和位置也是随机的，会进一步加重电网的三相不平衡。三相不平衡问题会造成一系列影响，由于低压配电网是三相四线制网络，存在三相负荷，三相不平衡会影响其正常运转，导致设备发热，设备老化速度加快，同时中性线电流的增加会导致网损加大^[18]。

（3）网损增加

光伏的并网在一定程度上可以改善网损，当光伏接入比例比较低时，光伏输入功率的就地消纳可以减少线路中的电量传输，从而改善网损。然而，随着光伏发电的发展，光伏接入低压配电网的比例逐步提高，光伏的并网功率甚至会高于用户负荷，若光伏功率大量剩余则会在配网线路中产生逆向潮流。线路的网络损耗也会随着光伏渗透率的提高而增加。同时，源荷不匹配的现象也会造成网损现象的加剧^[19, 20]。

综上所述，在低压配电网接入高比例分布式光伏会带来一系列问题，如电能质量降低、电网安全运行风险增加等。目前，在低压配电网高比例接入分布式光伏已成为我国大力研究的趋势，因此，在高比例分布式光伏并网情况下研究低压配电网的消纳能力评估问题显得尤为重要。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 分布式光伏研究现状

目前，光伏发电的研究在世界各国都在如火如荼的进行，欧美国家在 1997 年提出了“百万屋顶”的计划，德国通过立法促进了可再生能源在电力发展中的运用，分布式光伏发电系统的装机容量在长达二十多年的建设发展中已经有了非常大的提升。

德国以其处于世界领先水平的光伏发电技术，同时借助于政府政策和资金的支持，大力发展战略性光伏^[21]。

从世界范围来看，光伏并网容量快速增长，在利用光伏发电方面，大多以分布式发电为主导，分布式发电占光伏总发电量的 80%左右，近几年世界各国依然大力发展战略性光伏发电系统，光伏发电产业在不断发展壮大。国际能源署（IEA）的数据见图 1.1，2021 年全球累计装机 942GW，新增装机容量超过 175GW。我国将绿色能源作为 2050 年发展方向之一，各地政府积极推进能源转型确保各方资源的主动性和积极性，起到政府主导和政府监管，电力体制改革进一步推进可再生能源良性发展，各级电网企业制定计划确保新能源安全可靠并网，充分发挥全社会优势，将分布式光伏的发展提上了国家电力行业发展的日程并发展壮大^[22]。

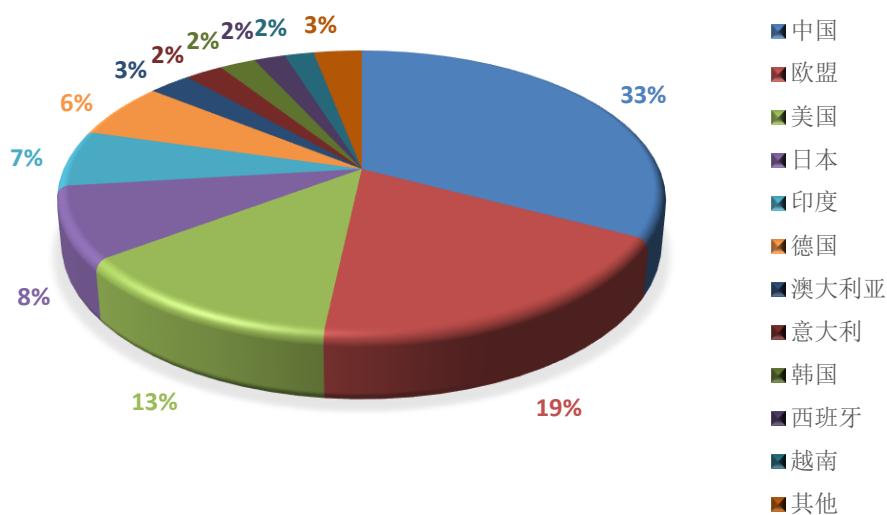


图 1.1 截至 2021 年底各国累计光伏装机容量

从全球情况来看，各国分布式光伏的发展都与国家政策息息相关，一旦国家发布政策对于分布式光伏的投资和发电予以补贴，或是实行税务减免规定，会在极大程度上促进国家分布式光伏的发展^[23]。可再生能源署（IRENA）发布的《可再生能源装机容量数据 2021》数据表明，全球光伏产业发展快速，光伏装机容量不断增加，我国的光伏发电装机容量在 2021 年位于全球第 1，总装机容量为 308.5GW，占全球总装机容量 32.75%；其中 2021 年新增装机容量 54.9GW，占全球当年总新增装机容量的 31.37%，如图 1.2 所示。

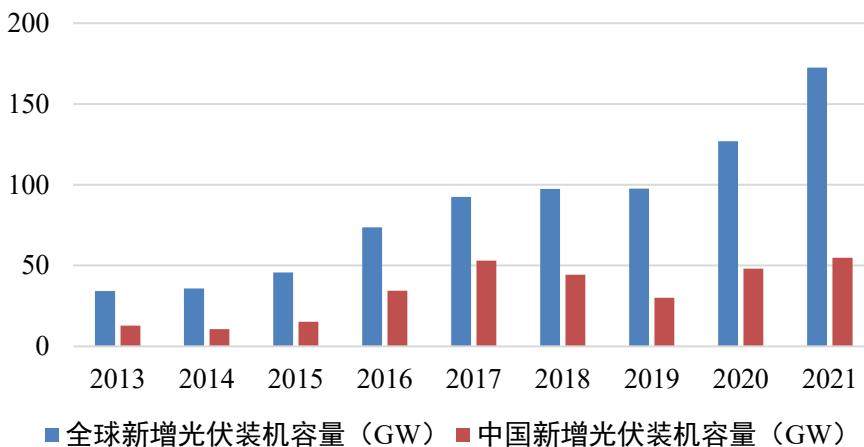


图 1.2 国内外新增光伏装机容量统计

我国虽然是能源消费大国，但开采能源和利用能源的效率较低，传统的高耗能产业占据极大比例，单位 GDP 能耗很高，相较于发达国家，还有很大提升空间，甚至落后于世界平均水平，因此我国发展新能源发电也势在必行^[24]。如图 1.3 所示，图中数据为根据世界能源机构分析数据对于世界和我国的常规能源进行的预测预测，对于石油、天然气、煤、铀 4 种资源，世界的剩余可开采年限仅为 23 年、39 年、208 年和 59 年^[25]。因此，我国发展新能源发电特别是太阳能发电迫在眉睫。

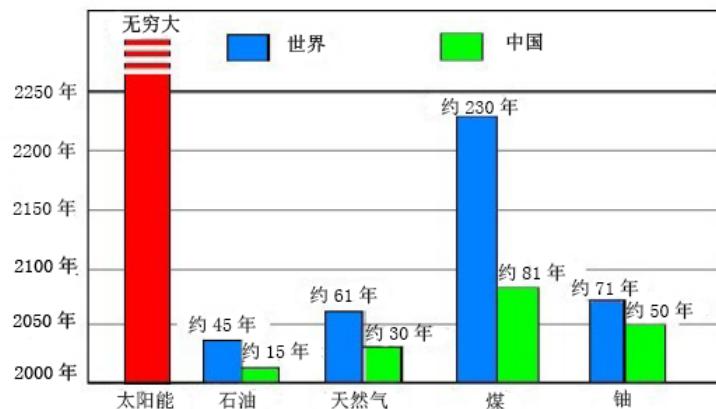


图 1.3 世界和中国能源余量预测

近十几年来，我国也在大力推进光伏发电，并且制定了大规模光伏扶贫计划。但相比于欧美国家，我国的分布式光伏发电水平仍然有一定差距，存在着很大的上升空间。如今，国内分布式光伏发电项目发展得到了大力的发展，光伏发电装机容量达到了 253.4GW，居世界第一。此外，国内分布式光伏发电也存在着一些制约因素，比如政策持续性差、政策落地效果不显著、投资回报周期长等问题，依然存在很大的提升空间。

在低压配电网中，分布式光伏发电通常利用太阳能电池板、交直流逆变器等设备，

在用户侧安装设备，实现太阳能到电能的转化，以用户侧自发自用、余电上网的方式运行。分布式光伏发电设备的安装遵循因地制宜、分散布局的原则，提倡就近发电，就近并网，提高当地光伏利用率，避免远途传送电能带来的损耗，同时降低传统能源燃烧造成的环境污染危害。

电网企业正在大力推进分布式光伏发展，在内蒙古、青海、西藏等太阳能资源丰富的西部地区省市架设了大量的太阳能发电板，尽可能利用太阳能资源^[26]。同时，在浙江等地进行光伏扶贫试点工程，在鼓励家庭装设小型户用光伏设备，实行用户侧“自发自用、余量上网、电网调节”的运营模式，并给予一定的电价补贴，以良好的政策和资金扶持促进分布式光伏发电的推广^[27]。分布式光伏规模较小，其占地面积也相对较小，对电网的供电依赖性较低，可以上网进行售电，给用户带来一定经济利益。分布式光伏系统容量一般相对较小，采用分散式排布、在用户侧并网发电，且电压等级低，对电网冲击影响小，环保效果显著。

近年来光伏电池技术的发展十分迅猛，光伏产品的发电效率不断地提高同时价格也在不断下降，但是与常规发电产业相比，成本仍然很高，但是光伏发电有着很大的现实意义^[28]。我国越来越注重可持续发展战略，结合考虑经济发展与环境保护，用长远的眼光看待利弊，坚持绿色发展，因此，国家对分布式光伏的补贴也在持续调整中，对分布式光伏采取激励政策，鼓励用户自发自用，减少了电网的电能消耗，同时，将多余的电能上传的电网中，对电网又做出了贡献。

1.2.2 光伏消纳能力评估方法研究现状

当高比例的户用光伏接入配电网时，会对配电网多项指标造成影响，不仅会使其电压越限，还会造成三相不平衡等问题。因此，研究低压配电网的光伏消纳能力对于配电网安全稳定运行显得尤为重要。目前国内外学者普遍将配电网对分布式光伏的最大承载能力概括为“消纳能力”，光伏消纳能力为在满足电网安全运行的条件下，配电网可以接入的分布式光伏最大容量。

目前对于光伏消纳能力评估的研究方法可以大致分为两大类^[29]：第一类方法是动态仿真法，这类方法通常使用计算机软件如 PSCAD、MATLAB 等进行仿真分析^[30-32]，可以对电网中的各项参数进行实时测算，虽然原理简单，但仿真工作量大；第二类方法是数学优化法，大多考虑光伏接入量最大，依据电网运行约束条件建立模型，使用

优化算法求解，模型计算准确，但建模较为复杂、求解难度大。

动态仿真法操作简单，建模工作量大，主要依靠仿真软件的建模，本文不再过多描述；而数学优化法种类多，可改进空间大，作为本文主要研究对象。数学优化法一般包括随机场景模拟法^[33-36]、智能优化法^[37, 38]和解析法^[39, 40]。随机场景模拟法大多基于蒙特卡罗仿真等模拟方法^[41]，考虑配电网安全稳定运行约束评估光伏消纳能力；智能优化法在评估配电网消纳能力时容易得到局部最优解，目前，应用较为广泛的如遗传算法和粒子群算法等；而解析法对非线性模型凸化进行最优潮流求解，包含内点法、简化梯度和二次规划法等。

(1) 随机场景模拟法：通过随机模拟算法，模拟分布式光伏接入配电网的各种可能情况，通过大量抽样模拟得到多种场景的光伏接入情况，并保存每次随机模拟的光伏接入场景，从统计学角度来评估配电网光伏消纳能力。

基于传统确定性的随机场景模拟法^[42-44]通常将电压为重要评估指标，对光伏接入的各参数进行随机生产模拟，得到多种光伏配置场景，然后计算配电网潮流得到各个场景下的节点电压幅值，最后根据电压越限情况来评估光伏消纳能力。文献^[45]选取年典型场景进行随机模拟，基于电压灵敏度的分析方法，提出一种改进均匀分布的类高斯分布抽样法，既能保证计算的准确性，又可以提高计算速度，高效生成具有代表性的典型场景。有学者提出简化随机场景模拟法，计算光伏消纳能力的“积极-保守”临界值，可确定光伏可接入容量的合理区间，从而可以缩短计算时间^[46]。

也有学者采用基于不确定性的随机场景模拟法如文献^[47]基于光伏、负荷的时序性，计算各个潮流约束的概率边界，仿真结果更加贴近实际电网运行状况。文献^[48]考虑运行约束风险利用对数分布进行分布式光伏消纳能力评估。文献^[49]通过大量随机场景模拟，统计分析其多场景模拟结果，近似拟合出消纳能力的边界概率分布函数。

(2) 智能优化法：大多以光伏消纳容量最大为目标，考虑线路潮流、电压偏差、电压波动等约束，建立光伏消纳容量评估模型，并找到适合的智能算法优化求解。

目前，基于确定性的光伏消纳能力评估中广泛运用了遗传算法等智能优化方法，算法在求解过程中不断寻优，计算方法简单但是计算量较大，如文献^[29]采用遗传算法分析有载调压变压器和并联电容器联合调压的情况，求解多个光伏同时接入情况下的消纳能力；文献^[50]采用启发式算法，针对电压、电流等参数的限制，评估光伏消纳能力。文献^[51]通过遗传算法以光伏接入容量最大为目标，在保证电压指标不越限的

基础下考虑短路容量，建立最大可接入边界容量的计算模型，进而求解模型。文献^[52]利用模拟退火算法，分析光伏和负荷间的关联性，提出光伏就地消纳能力指数进而构建相关性样本矩阵，针对电压、潮流等约束条件求解。除此之外，针对当前配电网电压电流等数据采集量不够的问题，文献^[53]对配电自动化、分布式发电监控、电网调度等实时测量数据和计量、营销等电量数据进行多源数据融合，解决了针对配电网信息不完整的光伏消纳能力评估模型。

基于不确定性的智能优化法大多采用概率论方法，最具代表性的是机会约束规划。它利用遗传算法通过随机模拟技术处理约束条件，进而解得目标函数的最优值和决策变量的最优解集，本质上是处理含多个随机变量的多目标函数或多约束非线性规划问题，计算精度取决于置信水平的区间估计大小。文献^[54]以最大光伏并网容量为目标，计算电网指标合格率，通过蒙特卡罗模拟和遗传算法混合求解。文献^[55]考虑风光互补的间歇性影响，基于机会约束规划建立了风光并网的极限接入容量评估模型，并采用改进遗传算法求解。

(3) 解析法：对配电网进行潮流计算，得到配电网每个节点的电压值，由此分析各节点的注入功率与电压的关系，通过计算最优潮流等方法得到最合理的调压手段，来保证配电网的电能质量在合理范围内，相比于智能优化法更能得到全局最优解，更好地实现配电网对光伏消纳能力评估。

内点法是求解光伏消纳能力的一种常用的解析法，文献^[56]改进传统内点法，结合牛顿法、对数障碍函数和拉格朗日函数，得到了非线性原-对偶路径跟踪内点算法，有效求解了最优潮流问题，但该方法计算量大，计算时间长。文献^[57]提出了二阶锥规划模型，将非线性约束线性化处理，有效解决了光伏消纳能力评估的混合整数非线性规划问题。文献^[58]通过泰勒公式将非线性模型线性化，将非线性解近似为线性解，有效提高了计算效率。文献^[59]对网络模型进行了线性变换，依靠电压灵敏度矩阵运算得到光伏消纳能力，降低了计算量。文献^[60]通过数学推导得到光伏消纳能力评估的计算表达式，以节点电压和支路电流为约束建立了光伏可接入容量和并网位置之间的解析式，为光伏消纳能力提供了新的评估方案。文献^[61]分析几种光伏典型接入情况下，满足电压偏差和电压波动等要求下光伏允许接入的容量范围。

光伏消纳能力评估中的不确定性解析法有多种，较为常见的有概率方法和鲁棒优化方法等。对于概率方法，文献^[62]提出条件风险的随机优化方法，采用蒙特卡罗模拟

将条件风险函数进行离散化，解决了直接计算困难的问题。针对配电网安全运行指标的风险水平，文献^[63]通过概率近似法进行分析，对稀疏网络进行精简，减少计算时间。文献^[64]采用两阶段线性变换的方法，解决优化模型求解的困难。但光伏和负荷具有连续的时序性，概率方法采用的离散的数据无法完全拟合，使评估结果有一定误差。为此，文献^[65]在光伏消纳能力评估过程中引入鲁棒优化方法，随机概率分布的变量不会影响评估结果，通过参数调整控制进而评估保守性和鲁棒性，使得结果更加准确。文献^[66]建立了两阶段鲁棒优化模型，在不确定性评估过程中仍能保持足够的鲁棒性和保守性。文献^[67]将强对偶关系应用到鲁棒优化模型上，将模型转换为双线性矩阵不等式，进而采用优化算法求解，增强了计算的准确度。

1.2.3 低压配电网优化算法研究现状

解决低压配电网光伏消纳能力评估问题首先要解决低压配电网网络建模问题，对于三相平衡配电网，可以忽略中性线的影响将线路简化为单线图，然后通过控制有载调压变压器^[68]、限制光伏并网的发电功率^[69]、利用光伏无功功率^[70]、综合优化电网有功-无功^[71]等方式提升配电网光伏消纳能力。也可以建立三相三线制的对称模型建模，有学者^[72, 73]基于混合整数二阶锥规划以网损最小为目标建立最优潮流模型，针对三相平衡配电网的合理建模和模型求解，通过控制无功补偿装置和储能装置等设备合理消纳光伏；文献^[74, 75]利用二阶锥松弛技术，对三相配电网的无功优化模型进行优化，提高求解效率；文献^[76]建立了三相电压优化模型，基于电压灵敏度矩阵修正节点电压，根据半正定规划法求解基于三相潮流的混合整数二次规划模型。然而低压配电网普遍存在三相不对称，对于三相不对称线路，文献^[77]以负序电压和网损最小为目标建立低压配电网的三相最优潮流模型，利用分支定界法求解该混合整数规划模型，解决低压配电网不对称接入光伏后产生的三相不平衡问题；文献^[78]提出一种低压配电网三相不平衡电压的自适应补偿方案，在仿真软件进行三相建模，分别控制逆变器输出电流实现低压配电网的三相不平衡治理。

但是，目前国外低压配电网通常采用三相三线制的接线方式，而国内采用的则是三相四线制，这两种接线方式无论是在搭建模型还是潮流计算等方面存在很大差异^[79]，在三相不平衡时中性线流过零序电流，使得三相三线制模型不能准确计算三相不平衡情况下的最优潮流，相比于三相四线制线路模型，在求解难度和求解误差上三相三线

制都得到了极大的简化，总的来说，三相三线制模型仅在三相对称条件下可以计算最优潮流，而三相四线制线路模型无论是针对平衡配电网还是不平衡配电网，都可以较为准确的计算。

实际上，最优潮流问题是配电网中常见的一类优化问题^[80]，在解析法中得到了很好的应用，研究配电网最优潮流对于光伏消纳能力评估具有重要意义。目前，对配电网最优潮流问题的探讨主要集中在建立模型和求解方法两个方面，这同样也是目前研究中关键点和难点。在建立模型方面，最优潮流问题目的在于找出电网可控运行参数的最优运行状态（如光伏接入位置和容量），使得配电网整体运行状态达到最佳，在光伏消纳能力评估中可理解为光伏最大可接入容量等目标函数达到最大。文献^[81]以网络损耗和弃光费用最小为目标，同时考虑网络侧和用户侧约束，建立二次规划模型，并通过割平面一致性求解最优潮流模型；文献^[82]以电网运行成本最低为目标，考虑配电网功率平衡等约束建立最优潮流模型，求解电压稳定裕度指标；文献^[83]通过优化电压稳定性指标获取最低发电机发电成本，运用原一对偶内点法求解最优潮流模型。在求解方法上，依据配电网所建立的最优潮流模型大多涉及潮流约束，而这类约束条件是非凸非线性的，因此通过求解非线性优化问题来求解最优潮流问题，这类问题在求解速度和求解结果往往是矛盾的，如何得到最优潮流模型的最优解同时又不牺牲求解速度是研究的关键。一种方法是考虑线性规划模型^[84]，这类模型简单直观且已有大量发展较为成熟的人工智能算法可以对其直接求解，如遗传算法^[85]和粒子群算法^[86]等，但是该方法逐步寻优浪费了大量的时间，且容易陷入到局部最优的“陷阱”；另有学者首先建立非线性规划模型，通过合理的变换使模型中的非线性约束线性化，如采用二阶锥松弛技术对最优潮流模型进行优化转换^[72, 74, 82, 87]，利用二阶锥松弛技术适当松弛非线性的潮流不等式，使其求解可行域适当放大但又不影响模型最优解，将原非凸非线性的最优潮流模型转变成为易于求解的混合整数二阶锥规划问题，既保持了松弛结果的准确性，又容易获得全局最优解。

1.3 当前研究中存在的不足

以上研究中总结了目前光伏消纳能力的方法，但仍然存在以下不足：

(1) 从理论角度讲，当前研究中针对分布式光伏并网多集中在三相平衡的中压配电网，且大多都没有考虑到潮流约束，使得求得的光伏消纳能力评估结果偏乐观，

比如某时刻配电网光伏全部消纳，但是节点电压、支路电流等越限，使得评估的光伏消纳容量大于实际可消纳容量，尚缺乏针对三相不平衡的低压配电网消纳能力评估方法。从实际工程出发，目前也尚未推出官方认定的全面、明确、可操作的分布式光伏消纳能力评估指标体系及评估方法，这使得电网企业很难从电能质量、安全性、经济性和环保性的角度整体的对分布式光伏并网进行全面评估。

(2) 从数学建模来说，现有评估模型研究重点多集中在时序出力模型、概率分布模型和负荷匹配性模型等光伏和负荷的时序性上进行模拟，并没有关注我国实际低压配电网的结构以及光伏接入对配电网带来的三相不平衡影响。也就是说，当配电网处于三相平衡状态下，线路结构、变压器、电容电抗器、光伏以及负荷可以等效为单相模型计算。事实上，目前国内的低压配电网采用三相四线制线路，线路参数不对称，且负荷单相接入配电网造成三相不平衡，高比例分布式光伏的不对称接入使得低压配电网三相不平衡现象更为严重，中性线流过不平衡电流，若仍用三相三线制中压配电网模型计算并不准确，会与实际结果相差较大，当前研究中尚缺乏针对实际的三相四线制低压配电网线路建立的评估模型。

(3) 从求解算法来说，有学者利用遗传算法、蚁群算法等人工智能算法求解优化模型，但是人工智能算法求解效率较低且不容易得到的全局最优解，而随着低压配电网规模的不断增大，模型求解难度也越来越大，人工智能算法劣势会愈来愈明显；另有学者直接采用 CPLEX 等成熟的商业软件算法包直接求解，这类软件求解速度快，但是对目标函数要求苛刻，需要将模型优化以满足其特定的程序接口，模型的合理变换是一个难点。当前研究中没有明确标准的涉及到非线性模型求解算法和求解效率方面的研究，鲜有可以兼顾求解高效性和结果可靠性的模型求解算法。

1.4 本文的主要工作

综上所述，需要建立一种适应于低压配电网模型的光伏消纳能力评估方法，既能保证模型的精确性，又能保证高效快速准确的求解。结合当前研究存在的问题和工程实际，本文从指标体系、建模分析、优化求解等方面层层递进，对低压配电网中接入分布式光伏的消纳能力评估问题进行研究。本文的主要工作如下：

(1) 针对当前低压配电网光伏消纳能力评估考虑不充分问题，本文提出一种适用于低压配电网的光伏消纳能力评估体系。综合考虑电能质量，电网运行安全、环保

程度和经济性因素，多角度选取指标，形成一个层次性的低压配电网分布式光伏消纳能力评估指标体系，利用主成分分析法和层次分析法，对各项指标进行组合赋权，得到综合结果，通过不断试验进一步得到方案的优化，评估低压配电网的光伏消纳能力。

(2) 当前研究中缺乏针对实际的三相四线制低压配电网线路进行光伏消纳能力评估问题,本文提出一种低压配电网光伏消纳能力评估方法。首先针对低压配电网结构进行潮流计算推导,当三相完全对称时,将中性线阻抗设置为无限大,使三相四线制模型转化为三相三线制模型或者单线图模型以进行简化计算;当三相不对称时,中性线流过不平衡电流,此时潮流计算要同时考虑变量的大小和方向,采用复数形式表示变量的大小和方向,将传统的针对单条线路的节点导纳矩阵改写成适用于三相四线制线路的节点导纳矩阵以计算各节点电压值,进而推导基于三相四线制低压配电网的潮流计算方法。在此基础上,以光伏消纳量最大为目标函数,结合典型日内的光伏和负荷的时序变化关系,考虑节点电压、支路电流、三相不平衡度等多个指标建立最优潮流模型,综合评价典型场景下各项指标优劣,进而评估光伏消纳能力。

(3) 针对现有研究对最优潮流模型求解缓慢和结果不准确等问题, 提出基于评估模型的低压配电网最优潮流模型求解方法。对于三相完全对称模型, 通过二阶锥松弛技术将模型中含非线性不等式的潮流方程进行凸化松弛, 使原始优化模型转化为二阶锥规划模型易于求解; 对于三相不对称模型, 将模型中的复数变量和矩阵进行拆分计算, 使含有相角的复数变量全部变换成为实数形式, 将非凸非线性化约束条件进行变换使模型凸化, 从而使目标函数和约束条件全部转化为凸函数, 既能保证解的准确性还可以提高求解效率。

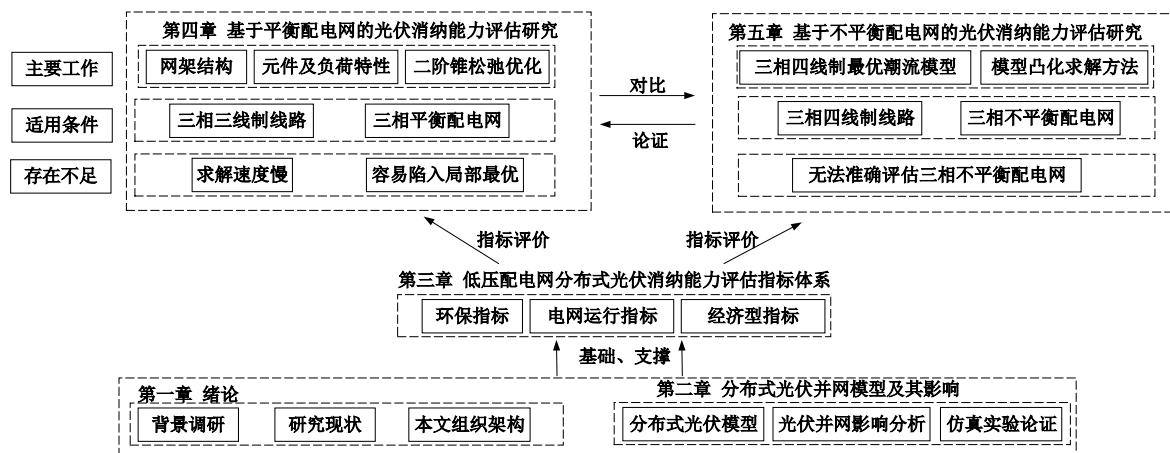


图 1.4 技术路线图

本文技术路线图如图 1.4 所示。

第一章介绍了分布式光伏发电背景，总结分布式光伏并网、光伏消纳能力评估方法以及优化算法的国内外现状及不足。第二章介绍了分布式光伏并网模型，从原理上分析了低压配电网接入分布式光伏后的影响，通过仿真建模量化分析结果。第一章、第二章内容作为论文理论基础对后续章节起到指导作用。

第三章提出了低压配电网光伏消纳能力评估指标，考虑针对低压配电网特点的分布式光伏发电并网标准，以电网运行指标、综合环保指标、综合经济性指标为基础，通过采用主成分分析法和层析分析法相结合的组合赋权方法计算指标权重，为后续章节对光伏接入方案进行评估提供依据。

第四章将第三章的评估指标作为评价标准，针对三相平衡的低压配电网，以光伏消纳量最大为目标函数，同时考虑光伏和负荷的多时段耦合关系和潮流约束建立模型，由于含有非线性二次方程与大量控制变量，采用二阶锥松弛将模型中涉及到非线性不等式的潮流方程进行凸化松弛易于求解，从而评价典型场景下不同光伏接入方案的优劣。

第五章针对三相不平衡的低压配电网进行建模分析，以光伏消纳量最大为目标函数，综合考虑中性线约束和三相不平衡度约束建立三相四线制线路模型，将潮流约束中电压、电流等复数变量等拆分为实部和虚部形式，同时将节点导纳矩阵扩展到三相四线制线路中，以实数矩阵的形式建立优化模型，通过合理的公式变换将凹函数约束凸化处理，最后选取典型光伏接入场景进行计算，分别计算第四章与第五章求解方法得到的结果并进行对比，论证所提模型的正确性和求解的有效性。

第六章总结和展望，概括论文研究内容，并对不足和未来研究方向提出思考。

2 分布式光伏并网模型及其影响

2.1 引言

低压配电网通常为单向供电线路，当光伏接入低压配电网，则会出现双向供电情况，导致潮流反向。大量光伏接入会影响低压配电网的运行参数，如节点电压、网络损耗等，同时由于光伏通常不对称接入低压配电网，会使配电网的三相不对称情况更加严重。本章以低压配电网为例，介绍了光伏接入后对其各项运行参数的影响。首先介绍了光伏发电系统的设备组成和影响光伏出力的外部条件，然后介绍了不同的接入场景下光伏对配电网电压及网损的影响；通过分析分布式光伏接入低压配电网后的网架结构，对低压配电网电压、三相不平衡程度等指标进行计算，分为光伏单点接入和多点分散接入分析各节点电压，合理评估满足电能质量要求的光伏消纳能力；最后通过仿真量化评估光伏对低压配电网各项指标产生的影响。

2.2 分布式光伏发电原理

2.2.1 光伏出力特性

如图 2.1 所示，光伏发电系统由多个设备构成，太阳光照射在太阳能光伏电池板上，通过 DC/DC 装置将一部分电能通过蓄电池储存起来，另一部分传送给逆变器转化为交流供应电网和交流负荷，通过控制器来调整逆变器和蓄电池的工作状态^[88]。

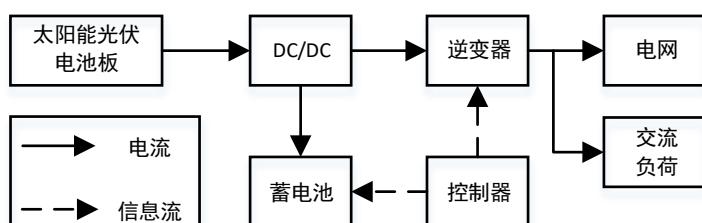


图 2.1 光伏发电系统

光伏发电系统的关键在于太阳能电池组。目前主流使用的太阳能电池为晶体硅电池。蓄电池可以存储电池板生成的电能，并输送到用户侧。此外蓄电池还可作为备用电源，起到调节电网功率平衡的作用，增强运行的稳定性。控制器可以智能调节蓄电池充电放电时长，防止过充过放，保障光伏发电系统的安全性。同时，它还起到一定的温度调节作用改善瞬时气温变化过大对系统所造成的波动，减缓设备老化。逆变器

可以进行直流和交流的转换，并网逆变器可以将光伏发电系统产生的电能并入电网，实现“余电上网”。

2.2.2 光伏发电影响因素

与传统能源发电相比，光伏电源存在供电不连续且不稳定的缺点。光伏功率的输出受到外界环境因素的影响，如光照强度、温度、天气等。

(1) 光照强度

光照强度对光伏发电功率产生直接影响。光伏电池输出的电能随着光照强度的增强而增多。根据对光伏电池板的研究显示，光伏电池板的输出功率如下式^[89]:

$$P_{PV} = \eta A I_s [1 - 0.005(T_c - T_{ref})] \quad (2-1)$$

式中： η 代表电池板对光能的转化效率； A 代表电池板的表面积； T_c 代表外界的温度； T_{ref} 表示参考温度； I_s 代表光照强度。

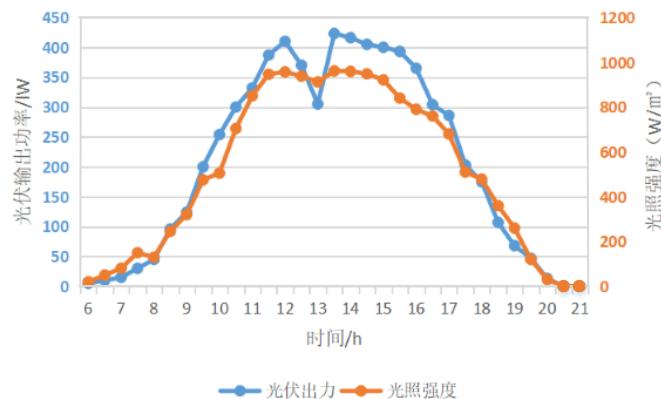


图 2.2 光伏出力与光照强度的关系

通过图 2.2 可以得出光伏发电板的输出电量和光强趋势呈高度相似，两者之间基本可看作具有正相关性。

(2) 温度

由式 (2-1) 可以看出，光伏出力同时受到环境温度的影响。温度与光伏发电量的关系见图 2.3。通过比较可看出光伏出力与光伏电池板的温度呈高度正相关。

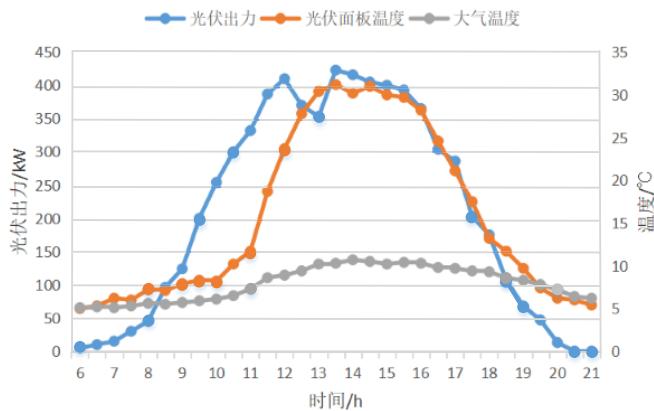


图 2.3 光伏出力与温度的关系

(3) 其他因素

由于光照强度和温度随着天气变化而变化，因而晴天、阴天、雨天等不同天气对光伏出力也会造成影响。即使在同样的天气情况下，不同的季节的太阳对地距离不同，随着太阳照射角度变化，光伏电池板吸收的光能也发生变化，夏天的光照强度最高，其次是春秋季节，冬天最弱^[90]。地理位置不同光能的转化效率也不同。光伏功率的输出水平随天气情况不同而不同，晴天光伏电板的输出功率远远高于阴雨天，雨天光伏功率的输出极低^[91]。结合春、夏、秋、冬和晴天、阴天、雨天，对季节因素和天气因素进行排列组合，可以得到一共十二种天气季节情况^[92]。以春天的晴天作为基准，对这十二种情况制定相应的光伏输出功率-24 小时标幺值曲线如图 2.4 所示。从图中可以得出，不同季节天气的光伏发电曲线在一天中的走向是类似的，而受到季节和天气的影响是区别很大的，早晨 5 点左右，太阳升起，开始出现光照，随着太阳高度的逐渐升高光伏的输出功率不断升高，约在 12 点达到最大输出功率，当太阳开始下落直到晚上 19 点左右彻底天黑，光伏发电功率不断减少至零，每日的光伏功率-时间曲线可看作一条抛物线。

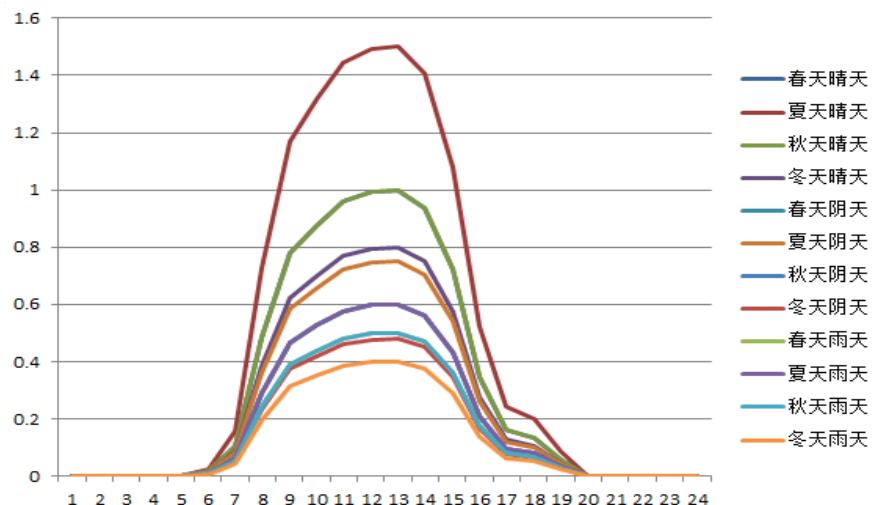


图 2.4 12 种季节天气下光伏输出功率 24 小时曲线

除此之外，环境湿度和风速也对光伏出力产生一定影响。风速较大光伏电池面板散热较快，从而导致温度下降。同时，不同的湿度条件下，热传导效应不同，太阳能面板的散热不同。总体来说，以上因素通过影响太阳能电池板的散热效应对光伏出力产生影响。

2.3 分布式光伏并网方式

分布式光伏以图 2.5 所示接入低压配电网，这也是低压配电网通常采用的接线方式，由一个变压器为电源中心延伸出多级分支线路，为多个台区提供电源。当分布式光伏接入低压配电网，会影响配电网原本的运行情况，本节以某一地区光伏接入电网为例对光伏接入后的网损和电压影响进行分析。

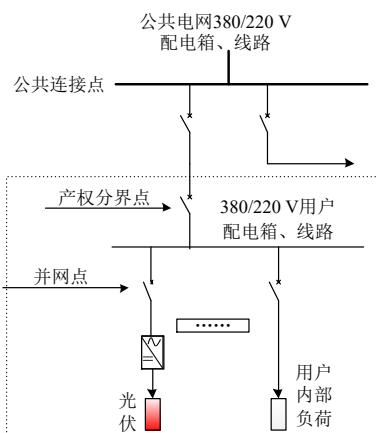


图 2.5 380/220V 配电网接入分布式光伏

低压配电网相较于中高压电网存在电网结构薄弱的固有缺点，且低压配电网的线路输送容量较小，不利于转供负荷，本身的用户用电负荷量较小。正午时分，光伏发

电正好处于尖峰期，而此时的用户用电量处于相对低谷，设备容易出现过载，严重时可能发生烧毁的危险。如下图 2.6 所示，光伏接入后，台区电压日浮动较大，单相最高偏移至额定电压的 1.3 倍，末端电压高至 285V，严重影响电网的安全稳定运行。

日间光伏出力输出功率，大量光伏功率无法就地消纳，出现功率倒送，末端电压高于首端电压；夜间光伏接入功率为零，潮流正常流动，随潮流流动电压下降，出现越限。

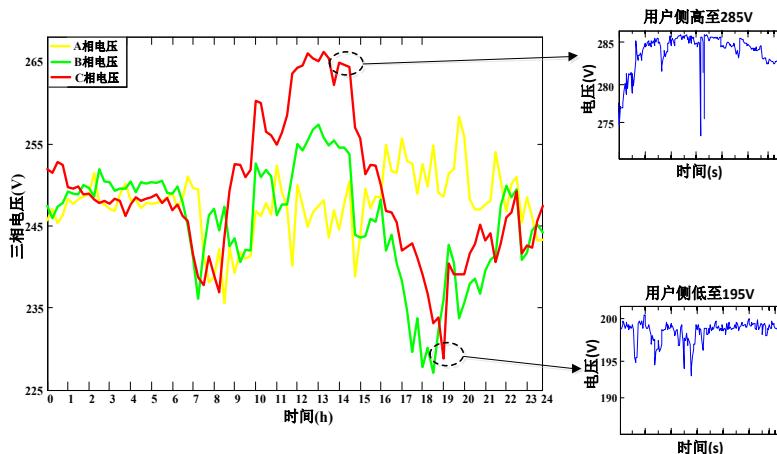


图 2.6 分布式光伏对电压的影响

如下图 2.7 所示，光伏接入低压配电网前地区网络损耗为 2%-3%，当光伏接入后平均网络损耗接近 10%，网损增加严重影响了电网的经济运行。同时，光伏出力与居民负荷的源荷不匹配情况，使得台区内日间与夜间功率双向流动，加剧了配电网三相不平衡问题。

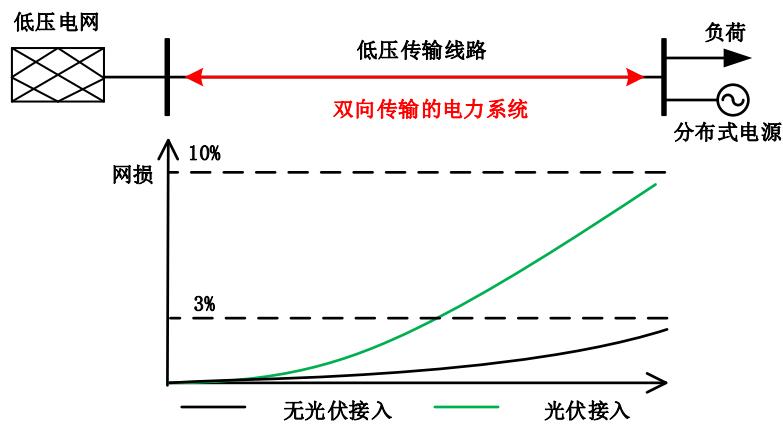


图 2.7 分布式光伏接入对网损影响

如下图 2.8 所示，为三种典型的光伏接入配电网后的网络架构等效图，从首端引出三条馈线为 A、B、C 三相线路，光伏分别接入不同的馈线和分支线路，基本可分为 3 种接入模式：第一种是负荷和光伏分布不均，将户用光伏在 A、B、C 三相线路

中末端接入,如场景1台区供电半径过长,存在双向电压越限问题,白天电压越上限,傍晚电压越下限。同时由于线路长,阻抗高,线路损耗严重;第二种是负荷基本均匀分布,户用光伏均匀接入三相线路末端,高渗透率光伏的源荷不匹配特性依然会导致电压双向越限和网损问题,如场景2;第三种是台区内存在村集体光伏电站,光伏输出功率相比户用光伏高出很多,村集体光伏集中接入在C相末端,如场景3所示,导致三相接入的光伏容量相差很大,三相不平衡现象严重。这三种光伏接入模式都会出现潮流倒送,引起电压双向越限和线路损耗等问题,当某相光伏接入容量过高还会引起严重的三相不平衡。

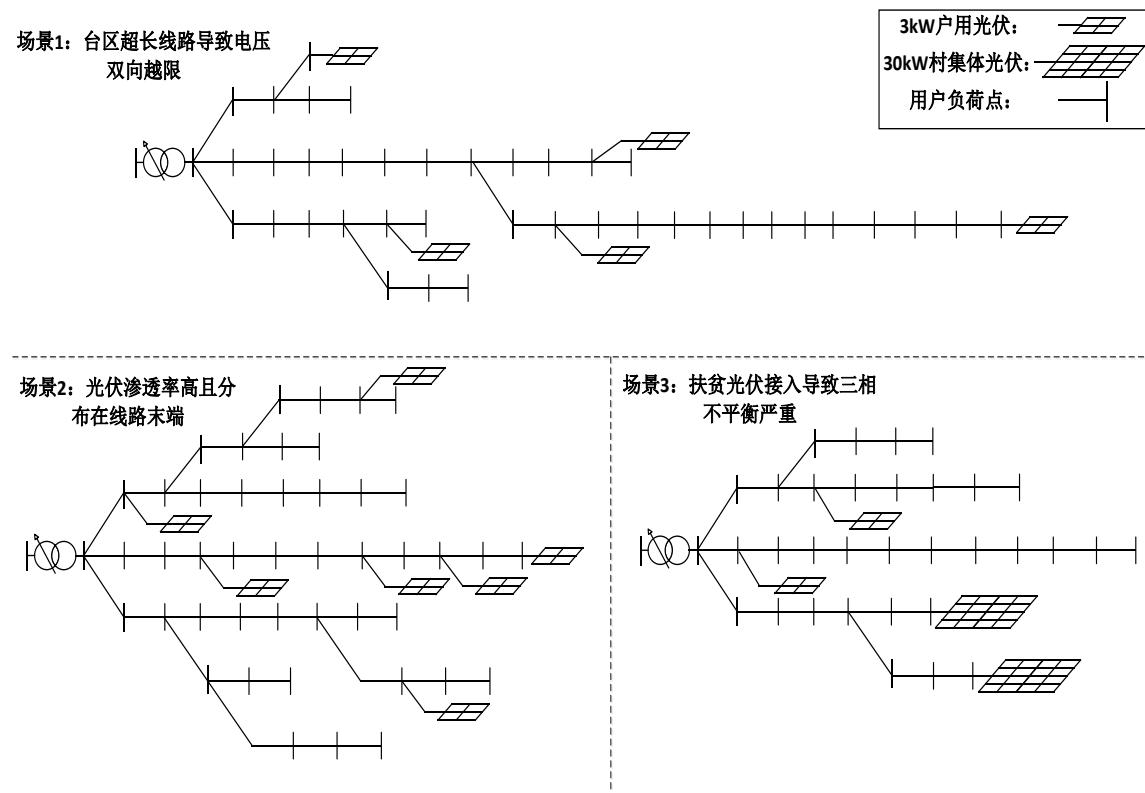


图 2.8 三种典型地区光伏接入模式图

2.4 分布式光伏发电对低压配电网的影响

2.4.1 电压偏差的影响

(1) 电压正偏差

图 2.9 为含分布式光伏的配电网模型图。

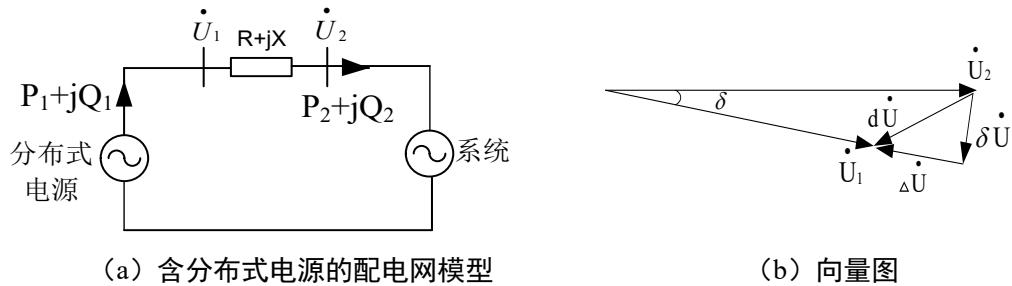


图 2.9 含光伏的配电网模型向量图

$P_1 + jQ_1$ 代表光伏出力功率; $P_2 + jQ_2$ 代表线路始端功率; $R + jX$ 代表线路阻抗; \dot{U}_1 代表光伏接入点电压; \dot{U}_2 代表线路始端电压。

计算可得到分布式光伏接入后的电压偏差, 如式 (2-2) 所示。

$$d\dot{U} = -\left(\frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2}\right) \quad (2-2)$$

根据式 (2-2) 可得, 电压偏差与线路阻抗、光伏并网功率以及电压有关。由于逆变器的功率因数通常接近于 1, 无功功率远远小于有功功率, 为了简化计算可以近似忽略无功功率 Q_2 。

如式 (2-3) 为简化后的线路电压偏差。

$$d\dot{U}_1 \approx -\left(\frac{P_2 R}{U_2} + j \frac{P_2 X}{U_2}\right) \quad (2-3)$$

根据式 (2-3) 可得, 低压配电网的线路电压偏差受到有功功率的影响较大。根据低压配电网的线路参数特性, 电阻与电抗的比值较高。阻抗比 R/X 达到 2~3, 因而并网点电压 \dot{U}_1 与线路始端电压 \dot{U}_2 间夹角极小, 电压降落的纵分量比横分量高出很多。

根据式 (2-3) 分析可得, 电压降落 $d\dot{U}_1$ 为负值, 线路始端电压 \dot{U}_2 上升。

(2) 电压负偏差

光伏接入会提高配电网末端电压。若光伏未接入低压配电网, 配电网电压随着线路阻抗和负载消耗从始端到末端电压不断降低。如图 2.10 为低压配电网的等效模型。

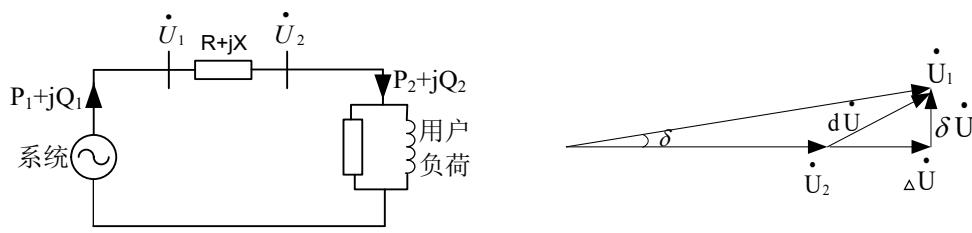


图 2.10 含用户的低压配电网模型向量图

图 2.10 (a) 中 $P_1 + jQ_1$ 代表系统电源产生的功率; $P_2 + jQ_2$ 代表线路首端功率; $R + jX$ 代表线路阻抗; \dot{U}_1 代表线路始端电压; \dot{U}_2 代表负荷点电压。

如式 (2-4) 为无光伏接入时线路阻抗上的压降。

$$d\dot{U} = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \quad (2-4)$$

线路始端电压 \dot{U}_1 与负荷点电压 \dot{U}_2 间夹角极小, 近似可忽略不计, 电压降落的纵分量比横分量高出很多, 因而电压降落可以简化表示为式 (2-5)。

$$dU \approx \Delta U = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \quad (2-5)$$

因此, 低压配电网的线路压降与光伏输入功率、负载量、和线路参数均相关。

2.4.2 三相不平衡的影响

低压配电网本身线路就存在参数不对称情况, 且大量负荷并不是三相平衡接入, 而是单相接入配电网的, 光伏的接入会对低压配电网三相不平衡现象造成更为严重的影响。由于配电网 a 、 b 、 c 三相间存在耦合关系, 电流的正、负、零序分量通常通过对称分量法解耦三相电流值 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 计算得到。

$$\begin{cases} I_1 = \frac{1}{3} |\dot{I}_a + \alpha \dot{I}_b + \alpha^2 \dot{I}_c| \\ I_2 = \frac{1}{3} |\dot{I}_a + \alpha^2 \dot{I}_b + \alpha \dot{I}_c| \\ I_0 = \frac{1}{3} |\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c| \end{cases} \quad (2-6)$$

式中: I_1 代表电流的正序分量; I_2 代表电流的负序分量; I_0 代表电流的零序分量; $\alpha = 1\angle 120^\circ$ 。

电流的负序不平衡率 δ_{I_2} 的计算公式为:

$$\delta_{I_2} = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% \quad (2-7)$$

电流的零序不平衡率 δ_{I_0} 为:

$$\delta_{I_0} = \frac{I_0}{I_1} \times 100\% \quad (2-8)$$

图 2.11 为低压配电网的正序等效模型, 其中 \dot{U}_s 代表电源输出的正序电压, \dot{U}_1 配电网线路末端的正序电压, \dot{I}_1 代表正序电流, $R + jX$ 代表正序等效阻抗, $P + jQ$ 代

表负荷正序功率。

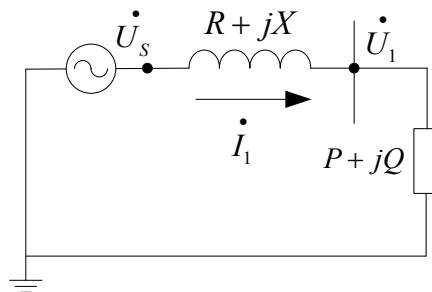


图 2.11 低压配电网正序模型

配电网用电负荷的正序功率为 $\dot{S} = P + jQ = \dot{U}_1 (\dot{I}_1)^*$, 通过计算可得正序电压压降 $\Delta\dot{U}_1$:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_1 &= \dot{I}_1(R + jX) \\ &= \left(\frac{\dot{S}}{\dot{U}_1}\right)^*(R + jX) = \frac{P - jQ}{(\dot{U}_1)^*}(R + jX) \\ &= \frac{P(R + jX)}{(\dot{U}_1)^*} + \frac{Q(X - jR)}{(\dot{U}_1)^*}\end{aligned}\quad (2-9)$$

线路的有功压降和无功压降分别为:

$$\Delta\dot{U}_P = \frac{P(R + jX)}{(\dot{U}_1)^*} \quad (2-10)$$

$$\Delta\dot{U}_Q = \frac{Q(X - jR)}{(\dot{U}_1)^*} \quad (2-11)$$

对于低压配电网系统馈线末端, 阻抗 R/X 比较大, 呈电阻特性, 夜间为用电量大, 此时潮流从电源侧流向负荷侧, 线路压降为正值, 电压沿馈线逐渐降低; 白天光伏输出高时, 可能出现潮流反向流动, 此时线路压降为负值, 电压沿馈线逐渐增大。因而电压双边越限问题同时存在。

在现实用电情况中往往更关注电压幅值的变化, $\Delta U = |\dot{U}_s| - |\dot{U}_1|$ 。

节点 1 的电压为 $\dot{U}_1 = \dot{U}_s - \Delta\dot{U}_P - \Delta\dot{U}_Q$, 因此节点 1 的绝对压降可计算表示为:

$$\Delta U = |\dot{U}_s| - |\dot{U}_1| = |\dot{U}_s| - |\dot{U}_s - \Delta\dot{U}_P - \Delta\dot{U}_Q|;$$

可以看出, 正序压降受等效阻抗和正序功率影响, 正序功率和等效正序阻抗越大, 正序压降越大。

图 2.12 为线路负序模型, \dot{I}_2 表示负序电流, \dot{U}_2 表示馈线尾端的负序电压, $R_2 + jX_2$ 表示负序阻抗。

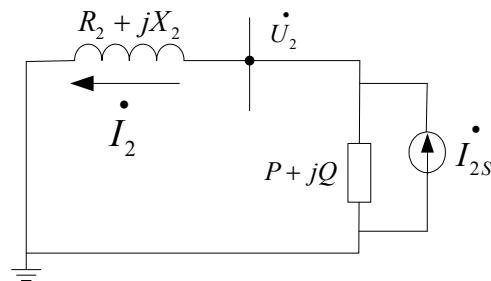


图 2.12 低压配电网负序模型

计算可得，负序电压 \dot{U}_2 为：

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2(R_2 + jX_2) \quad (2-12)$$

分析可得负序电压由负序电流、线路阻抗决定，三相不平衡情况越严重，负序电流值越大，阻抗越大，引起的负序电压越大。

低压配电网通常为三相四线制，零序电流流过中性线与各个相线形成闭合回路，中性线通过的零序电流是相线的三倍，零序电流通过零序阻抗产生零序电压。

如下图 2.13， Z_{L0} 、 Z_N 、 Z 为线路、中性线以及负载的零序阻抗； X_0 指变压器零序阻抗。 \dot{I}_0 表示线路中的零序电流。

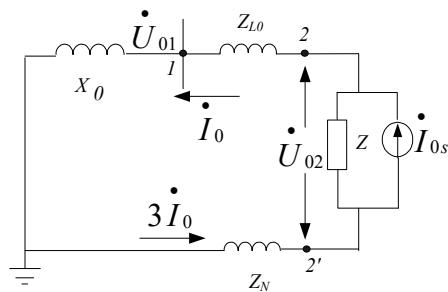


图 2.13 低压配电网零序模型

线路首末两端的零序电压分别为：

$$\dot{U}_{01} = \dot{I}_0 X_0 \quad (2-13)$$

$$\dot{U}_{02} = \dot{I}_0(X_0 + Z_{L0} + 3Z_N) \quad (2-14)$$

计算可得，线路的零序压降为：

$$\Delta U_0 = |\dot{U}_{01}| - |\dot{U}_{02}| \quad (2-15)$$

分析可得中性线的零序电压由零序电流和零序阻抗决定，零序电流越大，首末两端的零序电压偏差越大，会引起线路低电压现象加剧。

2.4.3 光伏集中接入的影响

在 q 节点接入光伏的线路等效模型如图 2.14，假设线路的总节点个数为 n ，每个

节点的供电负荷用 $P_n + jQ_n$ ($n = 1, 2, \dots, n$) 表示， U_0 为配电线路首节点电压，每个节点的节点电压为 U_n ($n = 1, 2, \dots, n$)，在 q 节点接入容量为 P_{PV} 的光伏设备，则：

$$R_n + jX_n = (r + jx)l_n \quad (2-16)$$

式中： l_n 代表相邻两节点间的线路长度， r 、 x 为电阻和电抗的基准值。

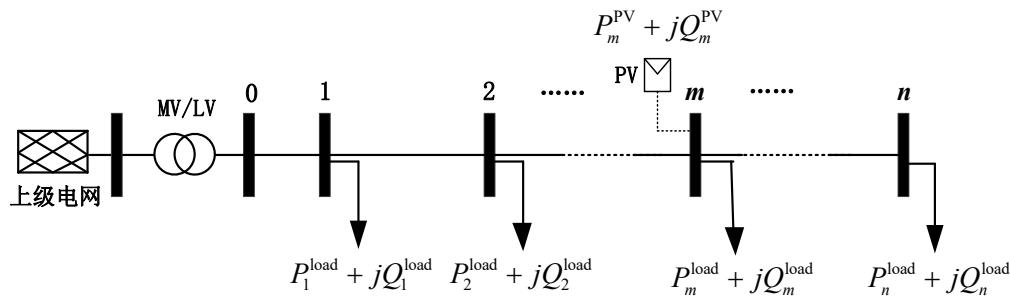


图 2.14 光伏接入后的配电网线路模型

(1) 未接入光伏时

以线路始端流向负荷方向为正，同时忽略其网络损耗，两节点间的电压降落可以表示为

$$\Delta U_m = U_m - U_{m-1} = -\frac{\sum_{n=m}^N P_n R_m + \sum_{n=m}^N Q_n X_m}{U_{m-1}} = -\frac{\sum_{n=m}^N P_n r l_m + \sum_{n=m}^N Q_n x l_m}{U_{m-1}} \quad (2-17)$$

由于负荷吸收的功率 (P_n 、 Q_n) 均为正值，因此 $\Delta U_m < 0$ ， $U_m < U_{m-1}$ ，电压从线路始端至末端逐渐降低。

用户 m 节点的电压 U_m 可以表示为

$$U_m = U_0 + \sum_{i=1}^m \Delta U_i = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{n=i}^N P_n r l_i + \sum_{n=i}^N Q_n x l_i}{U_{i-1}} \quad (2-18)$$

(2) 接入光伏后

分布式光伏设备的接入容量及位置均会对电压造成影响。

1) 用户节点 m 点在光伏接入节点 q 前 ($0 < m < q$)， m 节点电压为：

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{(\sum_{n=i}^N P_n - P_{PV}) r l_i + \sum_{n=i}^N Q_n x l_i}{U_{i-1}} \quad (2-19)$$

由于功率因数接近 1，有功功率远大于无功功率，R/X 比较大， m 点电压可简化计算如下式。可以看出，光伏接入后配电网会对电压有一定抬升作用。

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{(\sum_{n=i}^N P_n - P_{PV})rl_i}{U_{i-1}} > U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{n=i}^N P_n rl_i}{U_{i-1}} \quad (2-20)$$

相邻两节点之间的电压差为：

$$U_m - U_{m-1} = - \frac{(\sum_{n=m}^N P_n - P_{PV})rl_m}{U_{m-1}} \quad (2-21)$$

分析可得，光伏接入配电网会出现以下情况：

- a) $P_{PV} < \sum_{n=m}^N P_n$ ，当 P_{PV} 小于节点 m 后的负荷总和， $U_m - U_{m-1} < 0$ ，此时电压下降；
- b) $P_{PV} > \sum_{n=m}^N P_n$ ，当 P_{PV} 大于节点 m 后的负荷总和， $U_m - U_{m-1} > 0$ ，此时电压增加。
- c) $P_{PV} = \sum_{n=m}^N P_n$ ，当 P_{PV} 与节点 m 后的负荷总和相等， $U_m - U_{m-1} = 0$ ，两节点电压相等。

2) 用户节点 m 点在光伏接入节点 q 后 ($q < m < n$)，节点电压逐渐降低：

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^q \frac{(\sum_{n=i}^N P_n - P_{PV})rl_i}{U_{i-1}} - \sum_{i=q+1}^m \frac{\sum_{n=i}^N P_n rl_i}{U_{i-1}} \quad (2-22)$$

$$U_m - U_{m-1} = \sum_{i=q+1}^{m-1} \frac{\sum_{n=k}^N P_n rl_i}{U_{i-1}} - \sum_{i=q+1}^m \frac{\sum_{n=i}^N P_n rl_i}{U_{i-1}} = - \frac{\sum_{n=m}^N P_n rl_m}{U_{m-1}} < 0 \quad (2-23)$$

综上可得，光伏接入配电网时，线路上各节点电压有以下三种情况，并随光伏出力增加依次出现：

- a) 从始端至末端，节点电压逐步减小；
 - b) 电压从始端到光伏接入点先降再升，从光伏接入点 q 到线路末端电压降低；
 - c) 光伏接入节点 q 电压最高，从首节点至线路末端电压先升再降。
- b、c 两种情况时的光伏接入处节点电压高于相邻两侧节点电压，其电压为：

$$U_p = U_0 - \sum_{k=1}^p \frac{(\sum_{n=k}^N P_n - P_{PV})rl_k}{U_{k-1}} \quad (2-24)$$

2.4.4 光伏分散分布的影响

图 2.15 为分布式光伏分散接入系统的情况。

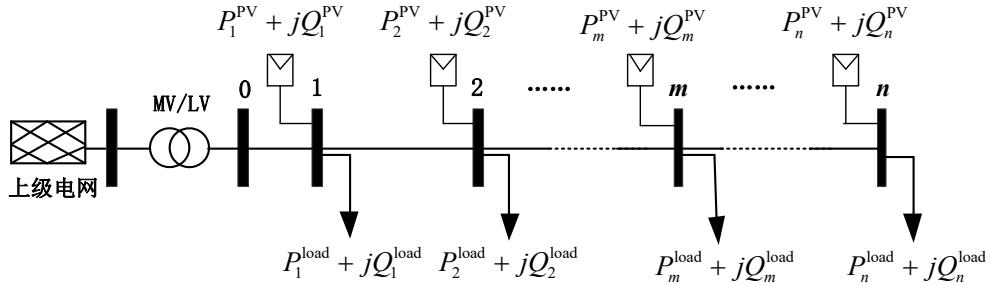


图 2.15 多个光伏分布的配电网模型

m 点电压近似忽略无功影响可表示为

$$U_m = U_0 - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{n=i}^N (P_n - P_{PV,n}) r l_i}{U_{i-1}} \quad (2-25)$$

$$U_m - U_{m-1} = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{\sum_{n=i}^N (P_n - P_{PV,n}) r l_i}{U_{i-1}} - \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{n=i}^N (P_n - P_{PV,n}) r l_i}{U_{i-1}} = - \frac{\sum_{n=m}^N (P_n - P_{PV,n}) r l_m}{U_{m-1}} \quad (2-26)$$

式中: 节点 n 的光伏功率为 $P_{PV,n}$ ($n=1, 2, \dots, N$) , 当某节点无光伏电源接入时, $P_{PV,n}=0$ 。

分析可得, 分散接入光伏电源的电压变化规律如下:

A) $\sum_{n=m}^N P_{PV,n} < \sum_{n=m}^N P_n$, 当 m 节点后的光伏出力总和小于负荷总和时, $U_m - U_{m-1} < 0$,

此时电压下降。

B) $\sum_{n=m}^N P_{PV,n} > \sum_{n=m}^N P_n$, 当 m 节点后的光伏出力总和大于负荷总和时, $U_m - U_{m-1} > 0$,

此时电压增加。

C) $\sum_{n=m}^N P_{PV,n} = \sum_{n=m}^N P_n$, 当 m 节点后的光伏出力总和与负荷总和相等时, $U_m - U_{m-1} = 0$,

两节点电压相等。

2.5 算例分析

2.5.1 仿真背景

以低压线路接入光伏后的阻抗等效线路如图 2.16 作为算例, U_A 、 U_B 、 U_C 表示变压器高压侧的三相电压, Z_{ai} 、 Z_{bi} 、 Z_{ci} 、 Z_{ni} ($i=1, 2, 3, 4$) 表示 a、b、c 相和中性线的等效阻抗, Z_{sa} 、 Z_{sb} 、 Z_{sc} 表示变压器一次侧线路阻抗。设定低压线路

包含 5 个节点，其中光伏系统和用户负荷在此 5 个节点上均匀分布。始端电压设置 0.4kV，设定单个光伏逆变器额定安装容量是 3kW。

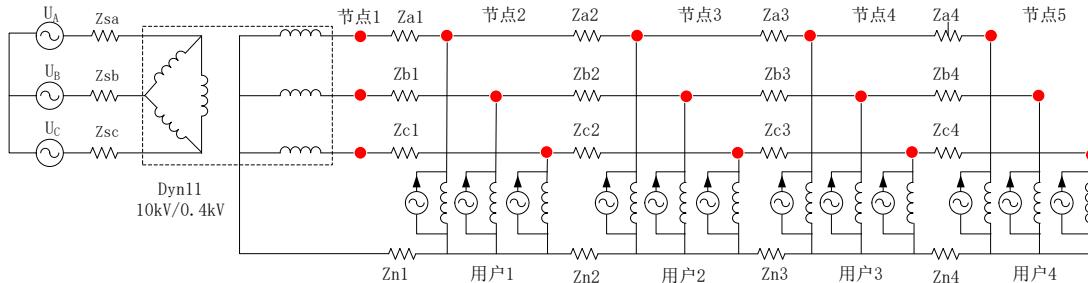


图 2.16 低压线路仿真模型

2.5.2 电压偏差的影响结果

设定在低压线路上接入光伏电源的单个容量为 3kW，接入 6 种数量的光伏电源，分别设置为 4、8、12、16、20、24，设定 0.95 为线路功率因数，线路的负载率设定为 13.68%。进行仿真模拟，得到以下 6 种光伏电源接入数量的结果，不同光伏接入数量下的节点电压见图 2.17。

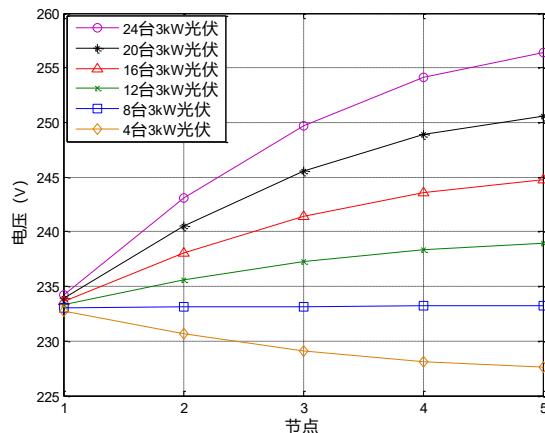


图 2.17 不同光伏接入数量下各节点电压图

依照以上仿真结果，可以分析得出：

a) 在光伏比负荷大的情况下，电压沿馈线逐渐升高，功率会出现反向倒送的情况。此时接入越多的光伏设备，会导致线路首末两端电压偏差情况越大，线路末端的电压越上限严重，在此算例中，当接入大于 8 台 3kW 光伏设备时，末节点的过电压情况明显加重。

b) 在线路中接入的光伏电源适量的情况下，可以有效提高线路各节点电压，改

善欠电压情况。

若将光伏设备集中接入，分别接入在节点 2~5，进行仿真模拟，可得到节点电压见图 2.18。

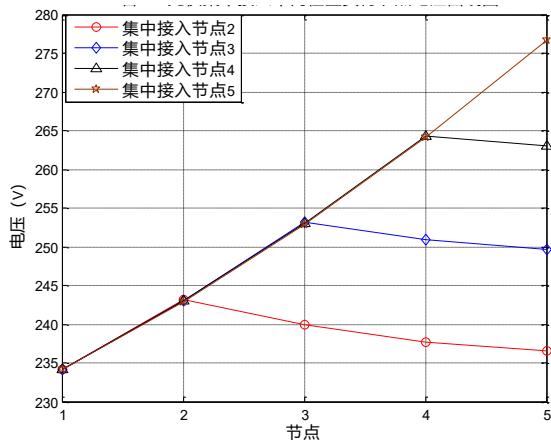


图 2.18 24 台 3kW 光伏集中接入不同位置的节点电压

依照以上仿真结果分析得出：在光伏集中接入情况下，接入点越接近线路后段，节点过电压情况越严重，因此可以得出光伏接入位置对电压情况有直接影响。

2.5.3 三相不平衡的影响结果

假设线路三相的参数对称，且三相接入的负荷也对称，此时在 A、C 两相均接入八台光伏逆变器，每台额定功率为 3kW，同时调整 B 相光伏电源个数，可得线路首端的零序和负序电压见图 2.19。

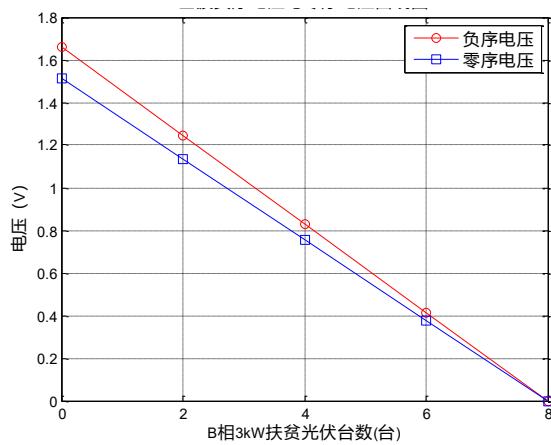


图 2.19 零序与负序电压结果

依照以上仿真结果，可以分析得出，若在 B 相接入光伏电源的台数增多，线路首端节点的零序和负序电压会减小，进而可以改善三相不平衡，反之会加重三相不平衡，因此可以得出当配电网中光伏电源的接入情况不对称，或者其中一相的光伏电源

的运行状态出现变化时，会导致配电网的电压发生三相不平衡情况。

同时得到低压线路首端的电流曲线见图 2.20。

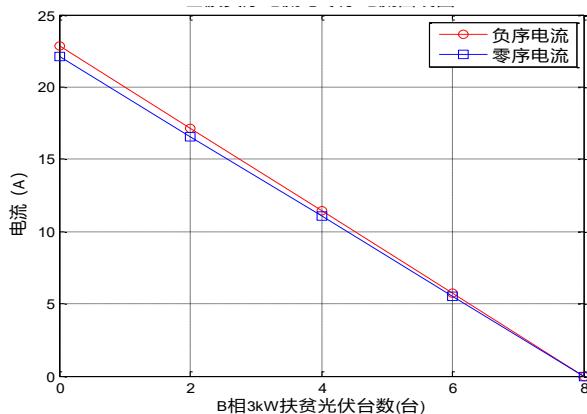


图 2.20 零序与负序电流结果

依照以上仿真结果分析得出，若在 B 相接入光伏电源的台数增多，线路首端的三相电流的不平衡度得到改善，反之三相不平衡度会造成恶化，若光伏接入量减为零，此时的三相不平衡情况最严重。

2.6 本章小结

本章对光伏设备的并网结构进行介绍，同时对光伏接入低压配电网后对于电压和潮流的影响进行分析，得出以下结论：

(1) 低压配电网通常为辐射状接线模式，正常运行条件下线路首端为电源点，潮流从首端向末端单相流动，而光伏电源的接入在线路中增加了新的电源点，可能会使潮流出现双向流动情况，造成电压越限，若光伏电源的接入位置及接入数量不对称，还会使低压配电网的三相不平衡情况加剧，本章从机理上分析了光伏电源的接入对配电网电压和潮流的影响，通过 MATLAB 进行算例仿真验证。

(2) 配电网电压受到光伏设备接入的影响大小与光伏设备的接入方式、接入位置和接入数量均相关。光伏分散接入配电网的情况下，当 3kW 的光伏接入 4 台时，低压配电网电压沿馈线从始端向末端逐渐降低，电压偏差由首节点的 5.79% 降低到末节点的 3.45%；若线路中接入的光伏电源适量，对线路各节点压降有一定改善作用，如光伏设备接入 8 台时，光伏的注入功率与负荷消耗的功率基本持平，完成就地消纳，电压偏差由首节点的 5.92% 变为末节点的 6.03%，可以有效提高电压，改善欠电压情况；当光伏接入数量继续增大，达到 24 台时，电压偏差由首节点的 6.46% 提高到末

节点的 16.56%，电压抬升效果明显加重，末端电压严重越限。当光伏集中接入线路首端时，末节点电压偏差仅为 7.54%，当光伏集中接入线路末端时，末节点电压偏差提升到 25.77%，由此看出光伏电源接入的位置越靠近配电网线路末端，或光伏电源接入数量越大，电压的抬升现象更明显。因此，光伏电源的接入数量需要设定一定的范围，过大或过小都会对配电网安全运行造成影响，可依据实际网络情况和光伏接入数量选择最优方案，使配电网保持最优安全稳定运行状态。

3 低压配电网分布式光伏消纳能力评估指标体系

3.1 引言

在低压配电网分布式光伏消纳能力评估体系的构建时需要结合电能质量、环保性和经济性三个方面进行考虑，本章提出了电压偏差、电压不合格率、三相不平衡度、环境改善程度和设备投资回报率等多个评价指标，采用主成分分析法和层析分析法实现各指标的最优组合赋权，对低压配电网分布式光伏消纳能力进行全面的评估。根据低压配电网的实际运行情况，结合一年中春夏秋冬四个季节和阴天、晴天、雨天三种天气分 12 种情况计算天气概率。由于分布式光伏接入的位置也会对配电网的潮流造成不同的影响，设定多种光伏接入方案，考虑分布式光伏的并网标准，通过 MATLAB 仿真得到评估结果，分析分布式光伏接入模式的优劣。

3.2 指标的选取及其计算

在进行分布式光伏消纳能力评估体系的建立时，主要从三个角度考虑指标的选取，分别为电网运行指标、环保性指标和经济性指标，通过考虑电网运行安全电能质量、环保性和经济性整体全面的对分布式光伏接入低压配电网的消纳能力进行评估，综合多个方面让用户在安装分布式光伏设备时能够进行全面细致的评估。

电网运行指标主要有 5 个，电压偏差、电压最大偏移率、电压不合格率、功率因数和三相不平衡度。环保指标主要考虑光伏接入后替代化石能源的程度，设定了环境改善程度的指标。经济性指标在考虑设备投入资金、光伏年发电量、配电网年负荷损耗，整体设定了设备投资回报率的指标。以上 3 个方面 7 个指标构成低压配电网分布式光伏消纳能力评估层次体系的评估指标。

低压配电网分布式光伏消纳能力指标体系图如图 3.1 所示。

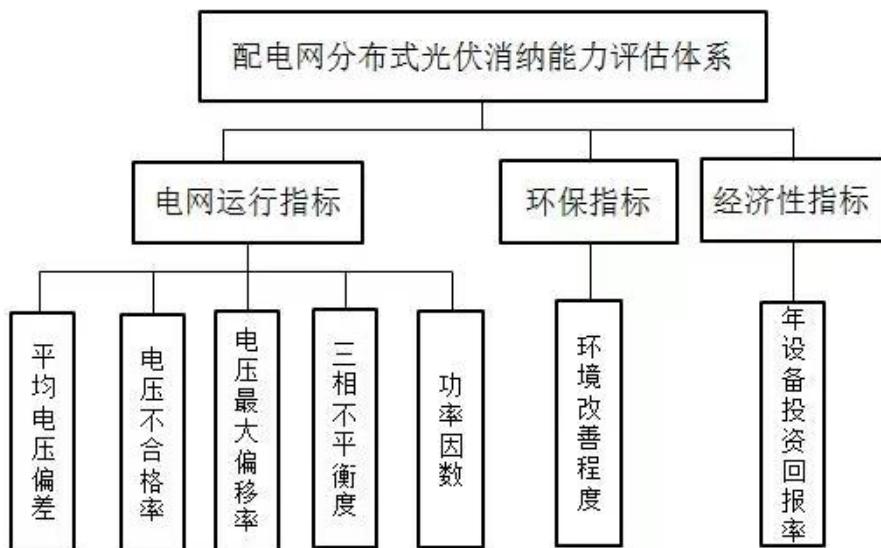


图 3.1 低压配电网分布式光伏消纳能力指标体系

3.2.1 电网运行指标

在分布式光伏接入配电网时，首先要考虑的因素就是电网运行指标，配电网的各个运行参数决定了配电网的安全性和传递给用户的电能质量的可靠性，这一方面的指标在评估中有着非常重要的地位^[93]。电网的运行指标有很多，结合分布式光伏的并网标准，选取 5 个电网运行指标作为评估指标，分别为电压偏差 a_1 、电压最大偏移率 a_2 、电压不合格率 a_3 、三相不平衡度 a_4 、功率因数 a_5 ，下面对这 5 个指标逐一进行详细介绍。

(1) 电压偏差 a_1

电压偏差是对于电能质量进行评估的最为主要的评估指标之一。低压配电网主要以居民用电负荷为主，容易出现源荷不匹配的问题，电压越限的风险也大大增加。白天光伏并网功率高，而此时居民的负荷水平较低；晚间是居民负荷高峰，而此时光伏发电功率接近于零。白天在太阳光照充足时会产生大量的功率，而此时负荷较低则产生功率剩余，导致过电压的问题；而在晚间，负荷处于高峰期，光伏功率为零无法改善低压配电网所存在的固有的电压下降问题。因而，配电网电压越上下限的问题在分布式光伏高比例并网后会变得更加严重。

用户负荷发生变化时，电压会产生一定的偏差，如在夏季的晴天，天气炎热，居民使用空调的情况明显增多，电压明显下降，而春秋季节，空调使用率明显下降，电

压又会明显回升。在低压配电网中，电压偏差是一个需要重点关注的指标^[94]，电压越限无论过高或是过低都会对用户用电造成影响，对配电网的安全运行也会带来很大的风险。

电压偏差率 a_1 的计算公式如下：

$$a_1 = \frac{|\Delta U|}{U_{\text{标}}} \times 100\% \quad (3-1)$$

式中： a_1 表示电压偏差率； ΔU 为实际电压与标称电压 $U_{\text{标}}$ 的差值。

(2) 电压最大偏移率 a_2

随着电压偏差的出现，随之考虑的一个指标即为电压的最大偏移率。如上文提到的在夏季的晴天，空调的大量接入会使电压下降明显，可能存在电压越限的情况，而另一方面，当光照强度增强，光伏设备的发电功率也会明显增加，会使电压向上偏移。当出现光伏发电功率很高而负荷很低或是光伏发电功率很低而负荷很高的情况时，都有很大可能出现电压越限的情况，造成配电网运行的危险。这时单纯的电压偏差指标和求取平均值的方法已经不是非常适用，无法考虑到电压偏移越限的极端情况。因此采用电压最大偏移率这一指标，以满足极端情况下的评估计算。

电压最大偏移率 a_2 的计算公式如下：

$$a_2 = \max \left(\frac{|\Delta U|}{U_{\text{标}}} \right) \times 100\% \quad (3-2)$$

式中： a_2 为电压最大偏移率； ΔU 为实际电压与标称电压的差值； $U_{\text{标}}$ 为系统的标称电压。通过 \max 公式求出电压偏差的最大值即为电压最大偏移率。

(3) 电压不合格率 a_3

当计算出电压偏差的情况下，计算出配电网在装设不同光伏条件下电压偏移越限的频率也显得十分重要，这对进行配电网光伏方案的选择具有很大的实用意义。电压偏差和电压最大偏移率只能求出电压偏差的连续变化规律和电压偏差的极端情况，对于电压偏差存在的时间和频率并不能进行明确的分析。当长期出现电压不合格的现象，这两个指标不能满足评估的需要，而设定电压不合格率这一指标后，当一个光伏方案的电压不合格率很高时，可以换用其他电压不合格率较低的方案，避免电压的越限的频率过高。因此采用电压不合格率这一指标，以满足考量电压越限频率的需要。

电压不合格率 a_3 的计算公式如下：

$$a_3 = \frac{\text{电压不合格时间点数}}{24} \times 100\% \quad (3-3)$$

式中： a_3 为电压不合格率。

电压不合格率的基本数据为电压偏差。在计算一个整点的潮流计算结果时，若出现一个及以上的节点电压不合格，则该时间点即为一个电压不合格时间点，通过计算 24 个整点的潮流求取一天中电压不合格的时间点数。

(4) 三相不平衡度 a_4

配电网通常是使用三相电压进行供电，在每一相接入的负荷和光伏都可能存在一定的差别，这在很大程度上会造成三相不平衡的问题，这一点在低压配电网尤为突出，低压配电网多为个人用户，家庭装设的户用光伏设备往往使用单相方式接入配电网，若某一项光伏接入过多，或另一相光伏接入过少，都会造成配电网电压三相不平衡的问题，对配电网的安全运行造成了威胁。当三相不平衡的情况出现时，负序电压、零序电压也相继出现，主要通过计算负序电压的程度来进行三相不平衡度的计算。因此采用三相不平衡度这一指标，以满足考量配电网三相不平衡情况的需要，特别是对于低压配电网。

三相不平衡度 a_4 的计算公式如下：

$$a_4 = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (3-4)$$

式中： a_4 为三相不平衡度； U_2 为节点负序电压； U_1 节点正序电压。

(5) 功率因数 a_5

在电网运行指标中，功率因数也是一个关键的指标，这对配电网运行的安全性和经济性都会有一定的影响。功率因数越低，随之网损也会升高，电网企业对不同的功率因数制定了不同的用电电价，功率因数越低，电价越高，这也间接说明了功率因数在配电网运行中的重要性，光伏的接入会对配电网的功率因素造成影响。当光伏接入容量上升时，功率因数可能成为约束光伏容量的关键因素。因此采用功率因数这一指标，以更加全面的进行分布式光伏消纳能力的评估。

功率因数 a_5 的计算公式如下：

$$a_5 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3-5)$$

式中： a_5 为功率因数； P 为配电网节点有功； Q 为配电网节点无功。

针对分布式光伏接入配电网造成的影响，按照国家及电网标准和导则对配电网分布式光伏消纳能力进行研究，做到评估的结果能够适应国家及电网企业发布的标准。对不同的指标选取合适的基准值。结合配电网的特点和光伏接入对各项数据产生的影响，采用 5 个电网运行指标作为并网标准约束条件，包括电压偏差、电压最大偏移程度、功率因数、三相不平衡度和电压不合格率。

3.2.2 环保指标

电网的安全性和电能质量的可靠性是对配电网的基本要求，在化石能源的消耗造成生态失衡和环境污染严重的问题的现在，对于环保的重视程度在逐步提高，因而在构建分布式光伏消纳能力指标体系时也考虑到了环保指标 B ，设定了一个能够体现光伏的接入对环境影响程度的指标：环境改善程度 b 。

太阳能发电有很多优点，除了资源量充足取之不尽用之不竭之外，另一个重要的优点也是光伏发电大力推广的重要原因，那就光伏发电清洁环保，直接利用太阳能就能够发出电量，而不会产生污染气体，对环境造成污染，煤炭等化石能源燃烧发电会产生大量的污染的气体，对环境的影响恶劣，且很难控制逆转，对于水力发电，则会出现大坝截流在一定程度上会影响生态平衡。而太阳能发电，清洁环保，对环境和生态不会产生任何负面影响，只需要太阳光照射，即能产生能量，无尾气处理的后顾之忧，对绿色发展、可持续发展都有着非常正面的影响。因此需要选取环境改善程度这个环保指标。

环境改善程度指标 b 的计算，需要求出配电网分布式光伏设备安装后的年发电量和配电网一年中输入的总发电量，以得到清洁环保的光伏发电量在总体发电量中的比例，即为清洁能源太阳能对环境保护的改善程度。

环境改善程度 b 的计算公式如下：

$$b = \frac{\text{年光伏发电总量}}{\text{年用电总量}} \quad (3-6)$$

计算出一年中光伏发电总量占年用电总量的比重，即为光伏这一清洁能源接入电网对于环境改善的程度。

在计算的时候，均需考虑到 12 种天气的影响，对不同的季节天气选用不同的曲线进行计算，求出准确的发电总量，得到准确的评估结果。

3.2.3 经济型指标

电网的安全运行和电能质量是配电网运行的基础，环境保护也是发展的必要选项，但是配电网的经济运行也决不可忽视。在满足电网安全运行、电能质量可靠、环境保护程度加强的同时，所有人都希望能够将得到完美结果的方案的成本降到最低。电网企业将配电网的电网运行指标看做关键，国家希望环境保护一定要做好，对于用户来说，成本低而收益好即为用户侧考虑的重点，如何在平衡电网运行指标、环保指标和经济指标中做到完美也是需要考虑的重点。因此选取了一个经济性指标。

国家正大力推广绿色可持续发展，电网公司也响应号召，大力推进清洁能源的使用，而光伏发电由于如今技术还并不是非常成熟，加之分布式发电的分散量小，发电的成本也较高，远高于火电水电，甚至也难以与风电相比。除此之外，光伏发电的设备的初期安装成本也非常高，一次性投入 3-5 万元而收益却缓慢却不明显，对用户的吸引力不够明显^[95]。因此，为了让用户侧安装光伏设备的比例升高，鼓励用户和企业安装光伏发电设备，国家对安装光伏设备的用户采取了补贴的政策，实现光伏扶贫项目^[96]。

综合光伏发电的上网电价和光伏发电度电补贴，即为光伏发电每度电的收益，同时需要考虑到配电网的网络损耗和光伏设备投入的初期成本，形成了一个整体的经济性指标 C ，即年设备投资回报率 c 。由于初期投入的成本很高，以设备投资回报率为经济性指标比较切合实际，较为合理。对于电网公司和个人用户，这都是一个考量的重要因素。

年设备投资回报率 c 的计算公式如下：

$$c = \frac{\text{年光伏发电收益-网损损失}}{\text{总设备投入}} \quad (3-7)$$

3.3 指标评估方法

本章将介绍对于分布式光伏消纳能力评估指标的评估方法，由于存在多个指标，不同的指标往往单位不同，无法依照单一指标评估对于计算得到的评估结果直接进行优劣评价的方法。若要进行多评估指标的评估，需要对不同的指标进行无量纲处理，

对不同的指标各自确定一个基准值，进一步进行标准化处理，使各个指标可以在同一层面进行加权计算。

构建低压配电网分布式光伏消纳能力评估体系共选取 7 个指标，其中 5 个为电网运行指标，1 个环保指标，1 个为经济指标。其中电网运行指标为连续性指标，每时每刻都会发生变化，因而选取了每天 24 个整点的数据进行计算得到了一个综合值最为评估数据。而经济指标和环保指标均按照一年为单位进行计算，通过计算出一年的总量来得到评估结果。下面不同指标的评估方法进行详细介绍。

由于考虑一年的 4 个季节和 3 种天气，组合可得到 12 种情况，分别对于每一种情况都应设定光伏的数据和负荷的数据。由于不同情况光伏和负荷数据不同，潮流计算所得到的结果也不同，因而需要结合一年中 12 种情况的分布概率，整合一年的数据得到一个最终的结果。将 12 种情况的概率用矩阵 T 表示。

$$T = [t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}], \quad \sum_{i=1}^{12} t_i = 1 (i \in Z, 1 \leq i \leq 12) \quad (3-8)$$

式中： $t_1 \sim t_4$ 分别为春夏秋冬的晴天的概率； $t_5 \sim t_8$ 分别为春夏秋冬的阴天的概率； $t_9 \sim t_{12}$ 分别为春夏秋冬的雨天的概率。

本章以某地区 2021 年的天气为基本算例，得到了一年中各天气天数，从春天晴天到冬天雨天的天数分别为 19、16、7、34、33、47、45、55、21、39、24、25，折合为概率为

$$T = \begin{bmatrix} 0.0521, 0.0438, 0.0192, 0.0932, 0.0904, 0.1288, \\ 0.1233, 0.1507, 0.0575, 0.1068, 0.0658, 0.0685 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

电网运行指标时刻在变化，由于考虑了 12 个情况的 24 个整点，因而需要将各个指标诸多的数据分别整合成一个综合的数据进行评估。

计算电压偏差的公式为式 (3-1)，然而这一公式只能计算出一个时间点的电压偏差，无法考虑到以上多种情况。因此在考虑电压偏差这一重要指标时，考虑 12 种情况，在具体计算时，计算公式如下：

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} a_{ij} \times t_i}{7\%} \times 100\% (i, j \in Z, 1 \leq i \leq 12, 1 \leq j \leq 24) \quad (3-10)$$

式中： a_{ij} 为电压偏差在 i 情况下 j 时间点节点的平均电压偏差； t_i 为 i 天气情况的概率。

电压最大偏移率的公式为式(3-2),然而这一公式只能计算出一个时间点所有节点中电压的最大偏移率,无法考虑到以上多种情况。在考虑电压最大偏移率这一指标时,根据查阅分布式光伏接入标准得知,在低压配电网(380V)三相供电电压偏差临界值为标称电压的±7%,由于电压最大偏移率是对数据中的极端数据进行计算,因而在这一指标的基准值设定时,考虑上述临界值的两倍即14%作为电压偏差指标计算的基准值。

考虑12种情况,在具体计算时,计算公式如下:

$$a_2 = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} a_{2ij} \times t_i}{14\%} \times 100\% \quad (3-11)$$

式中: a_{2ij} 为在*i*情况下*j*时间点节点中电压的最大偏移率; t_i 为*i*天气情况的概率。

电压不合格率*a₃*的计算公式为式(3-3),然而这一公式只能计算出一天中电压的不合格率,无法考虑到12种情况。在计算一个整点的潮流计算结果时,若出现一个及以上的节点电压不合格,则该时间点即为一个电压不合格时间点,通过计算24个整点的潮流求取一天中电压不合格的时间点数。在电压不合格率的计算中以24个时间点数作为基准。

电压不合格率的基本数据为电压偏差。在考虑电压偏差时,根据分布式光伏接入标准查阅得知,在低压配电网(380V)三相供电电压偏差临界值为标称电压的±7%,选取7%将作为电压不合格率指标计算时考虑的临界值。

考虑12种情况,在具体计算时,计算公式如下:

$$a_3 = \frac{\sum_{i=1}^{12} a_{3i} \times t_i}{24} \times 100\% \quad (3-12)$$

式中: a_{3i} 为在*i*情况下一天的电压不合格时间点数; t_i 为*i*天气情况的概率。

三相不平衡度*a₄*的计算公式为式(3-4),然而这一公式只能计算出一个时间点的三相不平衡度,无法考虑到以上多种情况。在考虑三相不平衡这一问题时,采用了电压三相不平衡度这一指标,根据分布式光伏接入标准查阅得知,在配电网中,负序电压的不平衡度不应超过2%,选取2%将作为三相不平衡度指标计算的基准值。

考虑12种情况,在具体计算时,计算公式如下:

$$a_4 = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} a_{4ij} \times t_i}{2\%} \times 100\% \quad (i, j \in Z, 1 \leq i \leq 12, 1 \leq j \leq 24) \quad (3-13)$$

式中： a_{4ij} 为在 i 情况下 j 时间点的平均电压三相不平衡度； t_i 为 i 天气情况的概率。

功率因数 a_5 的计算公式为式 (3-5)，然而这一公式只能计算出一个时间点的功率因数，无法考虑到以上多种情况。在考虑功率因数这一指标时，根据分布式光伏接入标准得知光伏发电系统功率因数应在超前 0.95.滞后 0.95 范围内连续可调，越接近 0.95 功率因数越好。选取 0.95 将作为电压偏差指标计算的基准值。

考虑 12 种情况，在具体计算时，计算公式如下：

$$a_5 = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} a_{5ij} \times t_i}{0.95} \times 100\% \quad (i, j \in Z, 1 \leq i \leq 12, 1 \leq j \leq 24) \quad (3-14)$$

式中： a_{5ij} 为在 i 情况下 j 时间点系统首节点的功率因数； t_i 为 i 天气情况的概率。

环境改善程度在考虑到 12 个天气在具体计算时，计算公式为：

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} P_{ij\text{光伏}} \times t_i}{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} P_{ij\text{负荷}} \times t_i} \times 100\% \quad (i, j \in Z, 1 \leq i \leq 12, 1 \leq j \leq 24) \quad (3-15)$$

式中： $P_{ij\text{光伏}}$ 为光伏在 i 情况下 j 时间点的系统光伏输入容量； $P_{ij\text{负荷}}$ 为系统在 i 情况下 j 时间点的总负荷量； t_i 为 i 天气情况的概率。

通过式 (3-15)，可以得到分子为综合一年的天气情况得到的光伏输入容量，分母为综合一年的天气情况得到的系统负荷量，其比值即为一年中光伏在负荷中的占比。即为太阳能这一清洁能源对在所发电的能源中的比重，也可以认为是利用太阳能替代了一定比重的化石能源，即可表示为对环境的改善程度。

本章选取的经济指标是年设备投资回报率，以某地区为例，选取某地区的光伏上网电价和政府电价补贴，设备投入金额。根据资料查阅，某地区的光伏上网电价为 0.75 元每度，政府电价补贴为 0.37 元每度。在低压配电网的设备投入金额为 10 元每瓦作为基准^[97]。

在具体计算时，计算公式为：

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{12} \left[\sum_{j=1}^{24} (P_{ij\text{光伏}} - P_{ij\text{网损}}) \times t_i \right] \times (0.75+0.37)}{P_{\text{光伏总装机容量}}} \times 100\% \quad (3-16)$$

$(i, j \in Z, 1 \leq i \leq 12, 1 \leq j \leq 24)$

式中： $P_{ij\text{光伏}}$ 为光伏在 i 情况下 j 时间点的系统光伏输入量； $P_{ij\text{网损}}$ 为系统在 i 情况下 j 时间点的系统总网损； t_i 为 i 天气情况的概率； $P_{\text{光伏总装机容量}}$ 为系统中光伏总装机容量。

通过式 (3-16)，可以得到分子为综合一年的天气情况得到的光伏总收益，分母为光伏设备的初期投入，其比值即为一年的设备投资回报率。

综上，电网的 5 个运行指标、1 个环保指标和 1 个经济指标均考虑一年的 12 种天气情况，依照其概率得到了最终的评估数据，其数值均为在 0-1 之间的无量纲数值。

由于本章构建的分布式光伏消纳能力评估指标体系有两个层次，因而需要进行两次的加权。在第一次加权时，将 5 个电网运行指标进行加权，得到电网运行指标。在第二次加权时，将电网运行指标 A ，环保指标 B 和经济性指标 C 进行加权，得到最终的评估结果。由于电网运行指标的计算结果越小方案越好，环保指标和经济性指标的计算结果越大方案越好，为保证评估结果的一致性，将电网运行指标取负值，通过这样的计算方式，3 个指标均为计算结果越大，方案越好，可以实现方案优选的目的。通过对不同的方案进行评估，分析分布式光伏接入模式的优劣。

3.4 分布式光伏消纳能力综合评估方法

以上 7 个指标均可用来进行分布式光伏消纳能力评估，而它们各自却只能表现分布式光伏接入后对电网某一个方面的数据的影响，而无法做到综合全面的评估。因而为了得到综合全面的配电网分布式光伏消纳能力评估结果，采用对于上述 7 个指标加权求和得到综合结果的方法，对每一个指标都设定了一个权重因子，由于指标层次不单一，设定分布式光伏消纳能力评估体系时需要设立两层权重体系。

权重体系是在指标体系的基础上确定的，权重体系依托指标体系。指标权重的设定，需要考虑到不同指标的重要程度，同时也要考虑到不同指标对结果的影响程度，指标权重的设定将直接影响评估结果的准确与否。在权重选取时，可以采取一定的方法，当前权重的计算方法有很多种，依照对原始数据的获得途径可以分为三类，主观赋权法依据人的观点，进行指标权重的设定，客观赋权法根据指标的历史数据对权重

进行计算，组合赋权法即将两者结合起来。

3.4.1 主观赋权法

主观赋权法是由决策者通过长期的经验依照主观意愿来确定指标的权重，体现出不同指标在决策者心中的重要程度。主要使用的主观赋权法有层次分析法、专家打分法（德尔菲法）、简单排序法、倍数环比法、主次指标排队分类法等等。主观赋权法最大的优点在于决策者可以根据当前实际需要的决策问题和其自身的知识经验人为的进行各指标重要程度排序，既然得到合理的权重。不至于出现客观赋权法常常会导致的指标权重与其实际的重要程度不相符的情况。但一旦决策时只考虑人的意念，而不考虑历史数据的规律，往往会导致评估结果有较强的主观随意性，客观性差，当指标较多时，也会一定程度的增加决策者的负担，在实际使用时存在一定的局限性。

专家打分法是通过匿名的方式发放调查问卷得到相关专家对指标的意见，进而对问卷结果进行处理归纳，综合多位专家的经验，通过专家的多次意见反馈调整后，对难以进行数据分析的指标做出合理计算，对各个指标权重进行较为客观的分析的主观赋权法^[98]。

美国的运筹学家 T. L. Satty 在 20 世纪 70 年代创立了层次分析法。层次分析法是结合定性与定量分析的多目标决策方法，将问题层次化，再利用人的经验判断将各个指标进行量化排序，最终得到指标层次排序，确定权重。如图 3.2 为层次分析法的计算流程^[99]。

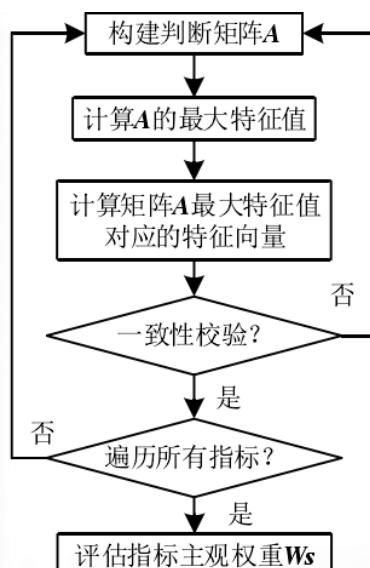


图 3.2 层次分析法计算流程

但通过层次分析法进行权重计算时需要对判断矩阵进行一致性检验，对于指标多、层次复杂的问题可能会出现判断矩阵无法通过一致性检验的情况，从而导致无法决策。若被比较的指标个数为 n ，在判断矩阵的建立时需要进行 $n(n-2)/2$ 次判断。因而，有些专家提出了改进的层次分析法，通过标度来构造判断矩阵，不管标度采用什么数值，建立的判断矩阵都是一致的，不需要进行一致性检验，更加便于使用。

3.4.2 客观赋权法

客观赋权法的原始数据根据各指标的实际历史数据产生，因此权重的客观性强，利用了各指标在整体中的变化程度，在处理数据的过程考虑各指标间的相互联系，方法具有一定的数学理论依据，根据其的联系程度来决定指标权重。

如果某一个指标在所有方案中都没有区别，则表示该指标对方案的评估排序起不到作用；反之，则表明这种指标对方案的评估起着重要的作用，应给定较大的权重。综上，各指标的权重应依据该指标对于各方案的指标数据的差异的大小来决定，差异大的权重越大，反之则越小。这种赋权方法往往依赖于实际已有的数据，没有考虑决策者的主观意向，数据较多，计算方法比较复杂。

常用的客观赋权法有熵值法、主成分分析法、多目标规划法等等。

主成分分析法^[100]是一种常用的客观赋权法，应用较为广泛，通过利用较少的几个综合指标表示原始数据中大部分信息，将多个彼此相关的指标用少数几个彼此独立的综合指标表示。通过数学变换，计算出能体现原始数据中指标关联关系的少数几个新变量，即得到的几个综合性指标。这种方法采用多方面指标数据将复杂指标数据综合为几个主成分，将问题变得简单化，使结果更加客观准确。

3.4.3 组合赋权法

对主客观权重进行组合赋权的常用方法有以下两种，分别为“乘法”集成法和“加法”集成法。前者的组合本质上是运用乘法合成的归一化处理，当指标数较多、权重分配比较均匀时，可使用该方法。后者本质上是对计算出的主客观权重进行了线性加权，能够依照决策者对不同赋权方法的重视程度进行组合权重的计算，因而考虑选用后者作为组合赋权方法^[101]。

“加法”集成法的计算式如下：

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (3-17)$$

$$q_m = r_{m1} \cdot w_1 + r_{m2} \cdot w_2 + \dots + r_{mn} \cdot w_n \quad (3-18)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3-19)$$

式中：m 为指标个数；n 为赋权方法个数； r_{mn} 为第 n 种赋权方法中第 m 个指标的权重； w_n 为第 n 种赋权方法的重要程度； q_m 为第 m 个指标的组合权重。

3.4.4 权重分配方法

在权重的分配上采用了主成分分析法和层次分析法对各指标进行赋权，利用主成分分析法可以考虑分析出各个指标之间的内在关系。同时也考虑到主观因素的影响，将两者进行结合。

将 12 种情况下 5 个指标电压偏差、电压最大偏移率、电压不合格率、三相不平衡度、功率因数的数据作为初始数据矩阵，进行计算，得到低压配电网各指标权重总体如下表 3.1。

表 3.1 低压配电网运行指标权重

电网运行指标	主观权重	主成分分析法权重	组合权重
电压偏差 a_1	0.3	0.2563	0.2782
电压最大偏移率 a_2	0.2	0.1757	0.1878
三相不平衡度 a_3	0.2	0.2507	0.2254
电压不合格率 a_4	0.25	0.2356	0.2428
功率因数 a_5	0.05	0.0817	0.0908

在对电网运行指标 A，环保指标 B 和经济性指标 C 进行赋权时利用了层次分析法。首先需要构建了判断矩阵，在对上述三个指标进行排序时：将电网运行指标作为配电网安全运行、居民放心用电最关键的因素，因而电网运行指标 A 最为重要，排首位；其次，环境保护的重要性也是我们不断研究新能源清洁能源发电分布式光伏发电的意义所在，因而环保指标 B 也非常 important，排第二；最后，在考虑电网运行指标和环保指标的基础上，力求良好的经济效益是国家发展的关键也是企业和用户在安装分布式光伏时考虑的重要因素，因而经济性指标 C 也很重要，略次与环保指标，排第三。在标

度对比时，电网运行指标 A 较环保指标 B 重要程度为 2.4，较经济性指标 C 重要程度为 2.8，环保指标 B 较经济性指标 C 重要程度为 1.1。

判断矩阵如下：

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 2.4 & 2.8 \\ 1/2.4 & 1 & 1.1 \\ 1/2.8 & 1/1.1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-20)$$

分布式光伏消纳能力综合指标权重如表 3.2 所示。

表 3.2 分布式光伏消纳能力综合指标权重

综合指标	权重
电网运行指标 A	0.5641
环保指标 B	0.2305
经济性指标 C	0.2054

3.5 本章小结

本章从电能质量、安全性、经济性、环保性的角度对分布式光伏并网进行全面评估，形成一个层次性的评估指标体系，展开了以下研究：

(1) 在进行分布式光伏消纳能力评估体系的建立时，主要考虑了三个角度的指标，分别为电网运行指标、环保指标和经济性指标，综合多个方面让用户在安装分布式光伏设备时能够进行全面细致的评估。其中电网运行指标主要有 5 个，电压偏差、电压最大偏移率、电压不合格率、功率因数和三相不平衡度。环保指标主要考虑光伏接入后替代化石能源的程度，设定了一个环境改善程度的指标。经济性指标为设备投资回报率。

(2) 指标权重的设定将直接影响评估结果的准确与否。本章在权重选取时，以层次分析法和主成分分析法作为分布式光伏消纳能力指标体系的权重分配方法。通过主观赋权和主成分分析法进行组合赋权的方法得到了电网 5 个运行指标的最终权重，利用层次分析法得到了电网运行指标、环保指标、经济性指标的权重，对配电网分布式光伏消纳能力进行科学严谨的评估。

4 基于平衡配电网的光伏消纳能力评估研究

4.1 引言

分布式光伏接入低压配电网后的消纳能力评估的本质上可理解为：在给定的消纳能力评估指标下，从配电网运行控制角度出发，以低压配电网已有的控制元件为基础，以满足节点电压、支路电流等运行约束为前提，求得低压配电网能够消纳的光伏最大装机容量，核心在于如何针对低压配电网建立合理的优化模型。当配电网中线路的三相参数对称，且配电网中的负荷和光伏均为三相对称接入，此时配电网为三相平衡配电网，采用三相三线制接线，不需要中性线。对三相对称的配电网建模可按照三相三线制进行建模，或者简化按照单线图进行建模计算。本章仅针对三相对称的低压配电网建立三相对称模型，以第三章提出的评估指标为评价标准建立低压配电网光伏消纳能力评估模型，但是所建立的模型含有非线性的潮流等式，目前研究中针对这类模型尚缺乏有效的求解方式，本节将该非凸非线性规划模型进行二阶锥松弛凸化，在 MATLAB 仿真平台上通过 YALMIP 调用 CPLEX 求解器有效求解二阶锥模型。

4.2 低压配电网网架特征

我国的低压配电网主要采取辐射状接线，从首端变压器引出多条馈线，每条馈线上有接着多条分馈线连接多个用户为其供电。一个中压配电网通常可以为多个低压配电网供电。首端变压器作为公共节点，将上级中压配电网传输过来的电能传送到各条馈线为负荷供电。低压配电网线路的接线方式通常为三相四线制。功率通常从首端变压器节点向各条馈线单向传输，确保偏远负荷的供电需求，保障配电网运行的安全可靠性和故障处置效率。低压配电网往往采取闭环结构开环的模式运行，因而每条馈线均装有联络开关和分段开关，正常运行状态下联络开关断开，分段开关合上，配电网以辐射状结构运行。

低压配电网相较于高压输电网络有其独特的特点：1、元件参数。低压配电网导线载流量相对较小，同时电阻大于电抗。而且我国的低压配电网线路无法消除不对称电容电流，因而导致线路自身参数就存在不对称现象。2、电压等级。低压配电网电压较低，其供电范围通常也较小。3、负荷特性。由于不同用户对供电要求不同，低压配电网同时存在三相负荷和单相负荷，对于电网输送的电能质量有着不同的重要程

度要求，这也造成了低压配电网存在三相不平衡的情况。

4.3 低压配电网基础模型

4.3.1 低压配电网线路模型

我国的低压配电网通常为三相四线制接线，其线路模型包含导线的自阻抗和三相与中性线的互阻抗。由于配电线路本身存在不对称性，加上负荷在 a 、 b 、 c 三相间的不对称接入，导致流经各相的支路电流和各节点电压值可能存在差异。

为方便建立低压配电网模型，对网络拓扑结构的各要素进行定义。首先， a 、 b 、 c 三相及中性线 n 的四个电气节点组成一条母线，配电线路上的各分支节点均定义为母线，每条母线包括四个电气节点，各条母线之间连接 a 、 b 、 c 三相线路和中性线，共同组成低压配电网的网络拓扑结构。

低压配电网线路模型可分为三种。

(1) 精确模型

精确模型可表示为三相四线制 π 形等效电路，如图 4.1 所示。

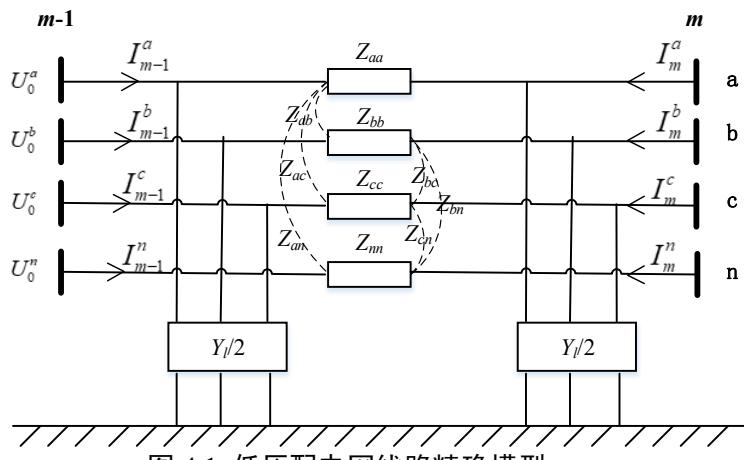


图 4.1 低压配电网线路精确模型

Z_m 、 Y_m 分别表示线路的串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵，在三相四线制线路中其维度为 4×4 。

$$Z_m = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

式中：对角元 Z_{xx} 代表 a 、 b 、 c 三相及中性线的自阻抗；非对角元 Z_{xy} ($x \neq y$) 代表三相

与中性线之间的互阻抗。

三相四线制线路的并联对地导纳矩阵为 $Y_m/2$:

$$\frac{1}{2} Y_m = \begin{bmatrix} y_{aa} & y_{ab} & y_{ac} & y_{an} \\ y_{ba} & y_{bb} & y_{bc} & y_{bn} \\ y_{ca} & y_{cb} & y_{cc} & y_{cn} \\ y_{na} & y_{nb} & y_{nc} & y_{nn} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

式中: y_{aa} 、 y_{bb} 、 y_{cc} 、 y_{nn} 表示三相及中性线的自导纳; y_{ab} 、 y_{ba} 、 y_{ac} 、 y_{ca} 、 y_{bc} 、 y_{cb} 表示 a 相、 b 相、 c 相之间的互导纳; y_{an} 、 y_{na} 、 y_{bn} 、 y_{nb} 、 y_{cn} 、 y_{nc} 表示各相与中性线间的互导纳。

精确模型的网络拓扑结构可通过节点导纳矩阵 Y 表示:

$$Y = \begin{bmatrix} Z_m^{-1} + \frac{1}{2} Y_m & -Z_m^{-1} \\ -Z_m^{-1} & Z_m^{-1} + \frac{1}{2} Y_m \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

节点导纳矩阵的对角元为母线节点的自导纳, 表示该母线节点与相连所有分支路的导纳之和, 非对角元为母线节点的互导纳, 表示连接两母线的支路导纳的负数。从而可以推导出任意复杂的多母线低压配电网的节点导纳矩阵。

(2) 修正模型

若忽略低压配电网线路中的并联对地导纳, 得到其修正模型, 如图 4.2 所示。修正模型往往对于线路不长的配电网更为适用, 对电缆线路或长线路的建模时通常不使用, 一般为了简化计算会采用这种模型。

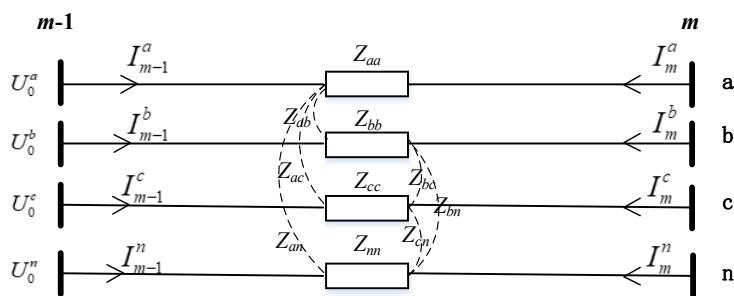


图 4.2 配电线路的修正模型

舍去式 (4-3) 中的并联对地导纳 $Y_m/2$, 即可得到修正模型的节点导纳矩阵。

(3) 简化模型

对于三相对称的低压配电网，可使用简化模型。可用线路的序阻抗参数表示，得到序阻抗矩阵

$$Z_m^{seq} = \begin{bmatrix} Z_0 & & \\ & Z_1 & \\ & & Z_2 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

进而得到

$$Z'_m = H Z_m^{seq} H^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2Z_1 + Z_0 & Z_0 - Z_1 & Z_0 - Z_1 \\ Z_0 - Z_1 & 2Z_1 + Z_0 & Z_0 - Z_1 \\ Z_0 - Z_1 & Z_0 - Z_1 & 2Z_1 + Z_0 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

其中：

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

$$H^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

式中： $a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

将式 (4-3) 中的 Z_l 用 Z'_l 替换，同时舍去 $Y_l/2$ ，即可推导节点导纳矩阵。

4.3.2 负荷接入模型

如图 4.3 在 c 相与中性线 n 间接入光伏、负荷及储能设备，形成回路。此时节点注入电流可表示为：

$$I_{inj} = \frac{S_{inj}}{U_i} = \left(\frac{(P_{PV} + P_{ESS} - P_{LOAD}) + j(Q_{PV} - Q_{LOAD})}{U_i} \right)^* \quad (4-8)$$

式中： S_{inj} 表示节点注入功率； U_i 表示节点电压值； P_{PV} 、 Q_{PV} 分别表示光伏在同一时间断面同一节点上输入的有功和无功功率； P_{LOAD} 、 Q_{LOAD} 分别表示负荷在同一时间断面同一节点上输入的有功和无功功率； P_{ESS} 表示储能在同一时间断面同一节点上输入的有功功率，其大小和方向由储能接入状态决定。

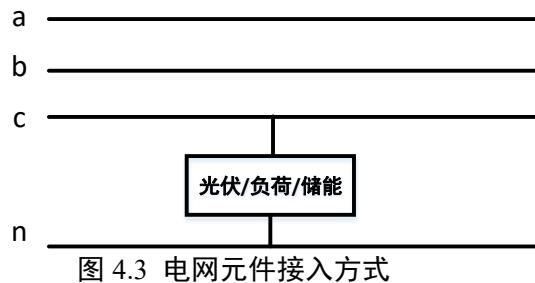


图 4.3 电网元件接入方式

4.3.3 储能元件模型

白天的光伏发电量较大，电网容易出现过电压，此时储能元件可吸收有功功率并将其进行储存，当晚上负荷较大导致电网欠电压时，储能元件将白天吸收的有功功率发出，使得电网有功功率得到充分利用。

通过储能原件可以实现有功功率的存储与利用，进而改善电压，其原理示意图如图 4.4。通过设定 $V^{\min\text{-UV}}$, $V^{\text{th-UV}}$, V_N , $V^{\text{th-OV}}$, $V^{\max\text{-OV}}$ 的数值可以控制储能设备的充放电作用，进而通过有功功率改善电网电压。由于储能元件本身存在容量限制，同时实际运行过程中的充放电效率也存在约束，以 P_{\max}^{dis} 作为储能元件的最大放电功率， P_{\max}^{ch} 为储能元件的最大充电功率，可以得到：

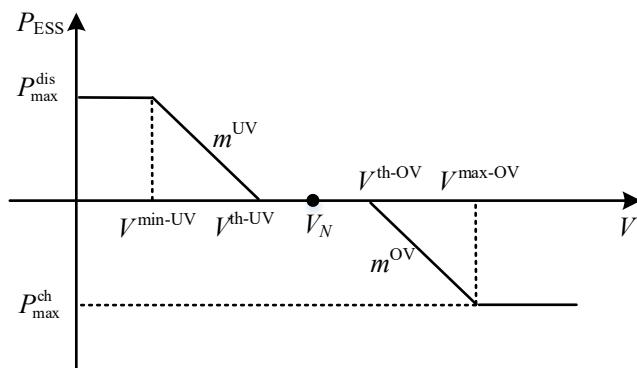


图 4.4 有功-电压协调作用机理

如图 4.4 中所示，当配电网安全运行并网点电压不越限时，即位于 $[V^{\text{th-UV}}, V^{\text{th-OV}}]$ 内时，储能元件不发生动作，此时不进行充放电；当配电网不符合安全运行要求，并网点电压越限，出现高于 $V^{\text{th-OV}}$ 或低于 $V^{\text{th-UV}}$ 的情况时，储能元件动作，高于 $V^{\text{th-OV}}$ 时，储能元件开始充电，低于 $V^{\text{th-UV}}$ 时储能元件开始放电，且充、放电动作无法同时进行；如果并网点电压值越限程度过高，超过国标规定的上下限，当超过上限 $V^{\max\text{-OV}}$ 时，储能元件以最大充电功率 P_{\max}^{ch} 吸收功率，当低于下限 $V^{\min\text{-UV}}$ 时，以最大放电功率 P_{\max}^{dis}

发出功率。

当光伏并网点的电压低于电网安全运行限额，此时 $V^{\min\text{-UV}} \leq V < V^{\text{th-UV}}$ ，储能设备按照设定的 m^{UV} 开始发出有功功率，通过放电来提升电网电压，以保证电网安全运行， m^{UV} 为：

$$m^{\text{UV}} = \frac{P_{\max}^{\text{dis}}}{V^{\min\text{-UV}} - V^{\text{th-UV}}} \quad (4-9)$$

当光伏并网点的电压高于电网安全运行限额，此时 $V^{\text{th-OV}} < V \leq V^{\max\text{-OV}}$ ，储能设备按照设定的 m^{OV} 开始吸收有功功率，通过充电来降低电网电压，以保证设备安全运行， m^{OV} 为：

$$m^{\text{OV}} = \frac{P_{\max}^{\text{ch}}}{V^{\max\text{-OV}} - V^{\text{th-OV}}} \quad (4-10)$$

因而，利用储能设备的有功-电压原理可表示为：

$$P_{\text{ESS}} = \begin{cases} P_{\max}^{\text{dis}}, & V < V^{\min\text{-UV}} \\ m^{\text{UV}}(V - V^{\text{th-UV}}), & V^{\min\text{-UV}} \leq V < V^{\text{th-UV}} \\ 0, & V^{\text{th-UV}} \leq V \leq V^{\text{th-OV}} \\ m^{\text{OV}}(V - V^{\text{th-OV}}), & V^{\max\text{-OV}} < V \leq V^{\text{th-OV}} \\ P_{\max}^{\text{ch}}, & V > V^{\max\text{-OV}} \end{cases} \quad (4-11)$$

天气晴朗时，分布式光伏的输出功率较大，往往会出现过电压情况，此时多余的发电功率可以通过储能设备进行吸收，当傍晚电网负荷电量需求大出现欠电压时，储能设备可释放有功进行弥补，改善欠电压情况。储能设备的充放电能力通过储能设备的荷电状态（SOC）来衡量^[72]：

$$SOC_{\text{ESS}}(t + \Delta t) = SOC_{\text{ESS}}(t) - \frac{P_{\text{ch}}(t)\eta_{\text{ch}}\Delta t}{E_N} + \frac{P_{\text{dis}}(t)\Delta t}{\eta_{\text{dis}}E_N} \quad (4-12)$$

式中： $SOC_{\text{ESS},i}(t)$ 指在时间 t 的储能设备 SOC； $P_{\text{ch}}(t)$ 、 $P_{\text{dis}}(t)$ 指储能设备在 t 时刻的充、放电功率； η_{ch} 、 η_{dis} 指接入点的充、放电效率； $SOC_{\text{ESS}}(t + \Delta t)$ 代表在经过 Δt 间隔后的 SOC； E_N 是储能元件的额定容量。

4.3.4 光伏逆变器模型

光伏逆变器有一定的无功裕度，其输出功率存在一定限制。

$$Q_{PV} = \sqrt{(S_{PV})^2 - (P_{PV})^2} \quad (4-13)$$

式中: Q_{PV} 代表光伏逆变器输出的无功功率; P_{PV} 代表有功功率; S_{PV} 代表额定容量。

通过光伏逆变器具有的无功调节功能可以对低压配电网的电压进行电压-无功下垂控制, 可以有效改善电压越限问题, 原理如图 4.5, S_{PV1} 、 S_{PV2} 表示不同的逆变器的额定容量; θ_{\min} 、 θ_{\max} 表示逆变器功率因数角限值。逆变器的最大可调节有功功率 P_{PV1}^{rated} 、 P_{PV2}^{rated} 是定值, 可以通过式 (4-13) 得到光伏逆变器的无功裕度 $\pm Q_{PV1}^{\max}$ 、 $\pm Q_{PV2}^{\max}$ 。

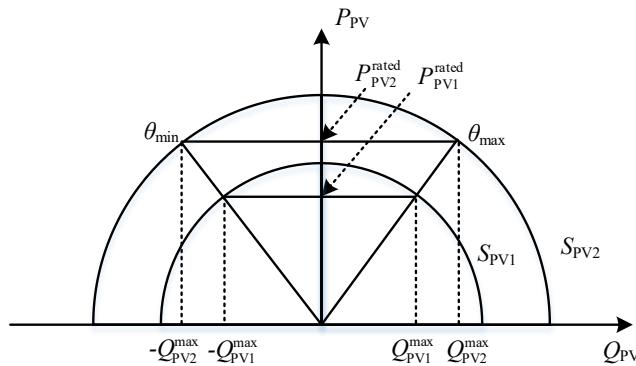


图 4.5 光伏逆变器 P-Q 运行极限图

由于逆变器具有多象限运行的特点, 可通过调节光伏逆变器设备的 $V^{\text{th-OV}}$ 、 $V^{\text{th-UV}}$ 的数值控制无功功率的吸收和发出。光伏逆变器的电压-无功下垂曲线如图 4.6。当接入点电压超过电网安全运行最大值 $V^{\text{th-OV}}$ 时, 逆变器以 $-Q_{PV}^{\max}$ 吸收无功, 当其低于电网安全运行下限 $V^{\text{th-UV}}$ 时, 以 Q_{PV}^{\max} 或发出。

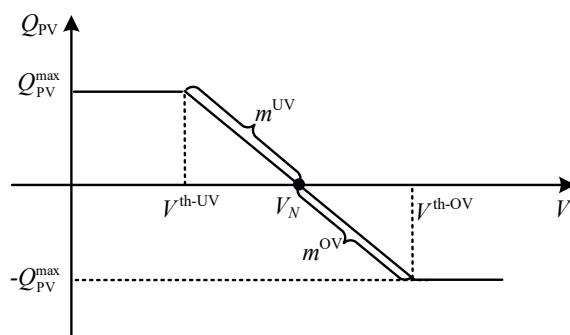


图 4.6 电压-无功下垂曲线

当 $V_N \leq V \leq V^{\text{th-OV}}$ 时, 逆变器吸收无功, m^{OV} 表达式为:

$$m^{OV} = \frac{Q_{PV}^{\max}}{V^{\text{th-OV}} - V_N} \quad (4-14)$$

当 $V^{\text{th-UV}} \leq V \leq V_N$ 时, 逆变器发出无功, m^{UV} 表达式为:

$$m^{UV} = \frac{Q_{PV}^{\max}}{V^{\text{th-UV}} - V_N} \quad (4-15)$$

因此，光伏逆变器设备的电压和无功的关系可表示为：

$$Q_{PV} = \begin{cases} -Q_{PV}^{\max}, & V^{\text{th-OV}} \leq V \\ -m^{\text{OV}}(V - V_N), & V_N \leq V < V^{\text{th-OV}} \\ +m^{\text{UV}}(V - V_N), & V^{\text{th-UV}} \leq V < V_N \\ +Q_{PV}^{\max}, & V < V^{\text{th-OV}} \end{cases} \quad (4-16)$$

4.4 三相平衡配电网的光伏消纳能力评估模型

4.4.1 目标函数

本章将目标函数设定为光伏消纳容量最大，由于光伏向低压配电网输入功率会影响配电网的网络损耗，当高比例光伏接入时随着接入容量的不断增大，会使配电网网损增加，从而降低配电网对光伏的实际消纳能力，因而实际光伏消纳容量最大需要考虑光伏发电量减去有功网损的差值最大，在设定目标函数时需要综合考虑配电网的光伏发电量最大和有功网损最小。

(1) 光伏发电量最大

配电网光伏消纳能力与光伏发电量大小密切相关，因此，以低压配电网光伏发电量最大作为目标，可表示为：

$$\max f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{PV}} P_{PV,i}(t) \cdot t \quad (4-17)$$

式中： $P_{PV,i}(t)$ 表示第 i 个光伏元件在 t 时段的有功功率； N_{PV} 代表光伏元件个数； T 表示时段的总个数。光伏发电量越大，则目标函数越大。

(2) 网络损耗最小

$$\min f_2 = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j \in c(i)} (I_{ij}(t))^2 r_{ij} t \quad (4-18)$$

式中： $c(i)$ 代表与 i 节点相接的所有节点的集合； N 是节点的总个数； r_{ij} 表示 ij 支路间的电阻； I_{ij} 表示 ij 支路间的电流。

(3) 光伏消纳容量最大

由于光伏发电量与网络损耗的差值最大时光伏消纳容量最大，因而多目标模型的目标函数可表示为：

$$\max F = \omega_1 f_1' - \omega_2 f_2' = \omega_1 \frac{f_1}{F_1} - \omega_2 \frac{f_2}{F_2} \quad (4-19)$$

式中： F 为以光伏消纳容量最大的总目标函数； f_1' 、 f_2' 分别对应两目标函数 f_1 、 f_2 标

么化结果，目的是为了使不同目标函数在同一数量级计算； F_1 和 F_2 分别表示两目标函数的基准值，以此对各目标函数做归一化； ω_1 、 ω_2 表示光伏发电量以及网络损耗的权重系数， $\omega_1+\omega_2=1$ ， $\omega_1\geq 0$ 、 $\omega_2\geq 0$ 。

4.4.2 约束条件

(1) 线路潮流约束

对于电网中的节点 j ，存在

$$\begin{cases} \sum_{i \in u(j)} \left[P_{ij}(t) - r_{ij} \frac{(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2}{(U_i(t))^2} \right] = \sum_{k \in v(j)} P_{jk}(t) - P_i(t) \\ \sum_{i \in u(j)} \left[Q_{ij}(t) - x_{ij} \frac{(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2}{(U_i(t))^2} \right] = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk}(t) - Q_i(t) \\ P_j(t) = P_{j,PV}(t) + P_{j,dis}(t) - P_{j,ch}(t) - P_{j,load}(t) \\ Q_j(t) = Q_{j,PV}(t) - Q_{j,SC}(t) - Q_{j,load}(t) \end{cases} \quad (4-20)$$

对于电网中节点 i 、 j 之间的线路，存在

$$(U_j(t))^2 = (U_i(t))^2 - 2(r_{ij}P_{ij}(t) + x_{ij}Q_{ij}(t)) + [(r_{ij})^2 + (x_{ij})^2] \frac{(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2}{(U_{ij}(t))^2} \quad (4-21)$$

式中： $u(j)$ 、 $v(j)$ 代表所有与 j 相连的前、后节点的集合； P_{ij} 、 Q_{ij} 为 ij 线路的有功以及无功功率； U_j 为 j 节点的电压； $P_{j,PV}$ 、 $P_{j,ch}$ 、 $P_{j,dis}$ 、 $P_{j,load}$ 代表光伏发出的有功功率、储能设备充、放电功率以及负荷吸收的有功功率； $Q_{j,PV}$ 、 $Q_{j,SC}$ 、 $Q_{j,load}$ 代表光伏发出的无功功率、并联电容器的补偿无功以及负荷吸收的无功功率； r_{ij} 、 x_{ij} 表示电阻值和电抗值； P_j^t 、 Q_j^t 代表 j 节点的净注入功率。

(2) 节点电压约束

$$V_i^{\min} \leq V_i(t) \leq V_i^{\max} \quad (4-22)$$

式中： V_i^{\max} 、 V_i^{\min} 表示电压 V_i 在配电网安全运行范围内的上、下限。

(3) PV 无功出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,PV}(t) \leq P_{i,PV}^{\max} \\ P_{i,PV}^2(t) + Q_{i,PV}^2(t) = S_{i,PV}^2(t) \end{cases} \quad (4-23)$$

式中： $P_{i,PV}$ 、 $Q_{i,PV}$ 代表光伏设备的有功和无功出力； $P_{i,PV}^{\max}$ 代表光伏设备的有功最大

值； $S_{i,PV}$ 表示光伏逆变器额定容量。

(4) 储能装置 ESS 运行约束

1) 电量约束

$$\begin{cases} E_{i,ESS}(t) + P_{i,ch}(t)\eta_{ch}\Delta t - \frac{P_{i,dis}(t)}{\eta_{dis}}\Delta t = E_{i,ESS}(t+1), t=1,2\cdots,T-1 \\ E_{i,ESS}(t) + P_{i,ch}(t)\eta_{ch}\Delta t - \frac{P_{i,dis}(t)}{\eta_{dis}}\Delta t = E_{i,ESS}(1), t=T \\ E_{i,ESS}(T+1) = E_{i,ESS}(1) \end{cases} \quad (4-24)$$

式中： $E_{i,ESS}$ 代表 i 节点的储能元件在 t 时刻储存的能量； $P_{i,ch}$ 和 $P_{i,dis}$ 代表储能元件的充电和放电功率； η_{ch} 和 η_{dis} 代表储能元件的充电效率和放电效率； Δt 代表时间间隔。

2) 充放电状态约束

$$D_{i,ch}(t) + D_{i,dis}(t) \leq 1 \quad (4-25)$$

式中： $D_{i,ch}$ 、 $D_{i,dis}$ 表示储能设备的充、放电状态，其值为“0”或“1”，任一时刻储能元件只能存在充电、放电和不工作三种状态中一种状态。

3) 功率约束

$$\begin{cases} P_{i,ch}^{\min} D_{i,ch}(t) \leq P_{i,ch}^t(t) \leq P_{i,ch}^{\max} D_{i,ch}(t) \\ P_{i,dis}^{\min} D_{i,dis}(t) \leq P_{i,dis}^t(t) \leq P_{i,dis}^{\max} D_{i,dis}(t) \end{cases} \quad (4-26)$$

式中： $P_{i,ch}^{\min}$ 、 $P_{i,ch}^{\max}$ 代表储能元件的充电功率的上、下限； $P_{i,dis}^{\min}$ 、 $P_{i,dis}^{\max}$ 代表储能元件的放电功率的上、下限。

(5) 并联电容器约束

由于并联电容器（SC）作为电子器件，其使用寿命受多种因素影响，因而并联电容器动作次数存在限制，且运行过程中需要成组投切，SC 的运行约束条件如下：

$$\begin{cases} Q_{i,SC}(t) = N_{i,SC}(t)Q'_{i,SC} \\ N_{i,SC}(t) \leq N_{SC}^{\max} \\ \sum_{t=1}^{T-1} B_{i,SC}(t) = B_{SC}^{\lim} \\ B_{i,SC}(t) \in \{0,1\} \end{cases} \quad (4-27)$$

式中： $Q_{i,SC}$ 代表 SC 的补偿无功； $N_{i,SC}$ 代表并联电容器组的个数； $Q'_{i,SC}$ 表示单个电容器组的补偿无功； N_{SC}^{\max} 代表并联电容器设备投切个数上限； B_{SC}^{\lim} 代表 SC 动作的次

数限制； $B_{i,SC}$ 的值是 0 或 1。

(6) 有载调压变压器约束

$$\begin{cases} \sigma_{i,1}(t) \geq \sigma_{i,2}(t) \geq \sigma_{i,SR}(t) \\ \delta_i^{IN}(t) + \delta_i^{DE}(t) \leq 1 \\ \sum_s \sigma_{i,s}(t) - \sum_s \sigma_{i,s}(t-1) \geq \delta_i^{IN}(t) - \delta_i^{DE}(t) SR \\ \sum_s \sigma_{i,s}(t) - \sum_s \sigma_{i,s}(t-1) \leq \delta_i^{IN}(t) SR_i - \delta_i^{DE}(t) \\ \sum_{t \in T} (\delta_i^{IN}(t) + \delta_i^{DE}(t)) \leq N^{\max} \end{cases} \quad (4-28)$$

式中： δ_i^{IN} 、 δ_i^{DE} 代表有载调压变压器调节档位使其增大或减小的符号，取值“0”或“1”； SR_i 代表档位的可调节范围； $\sum_s \sigma_{i,s}(t)$ 代表档位为 s 的变比符号，取值“0”或“1”； N^{\max} 指一个周期内有载调压变压器档位最大的可调节次数。

(7) 变压器容量约束

对于变压器所供的低压台区范围内，除了需要满足各条线路不过载、各节点电压不越限等约束外，还应满足变压器低压出口线路功率不能超过配电变压器的额定容量。

$$S_{L1}^\varphi(t) \leq S_T^{\max} \quad (4-29)$$

式中： $S_{L1}^\varphi(t)$ 表示线路首端各相线路的实际功率； S_T^{\max} 表示变压器额定容量。

4.5 基于评估模型二阶锥松弛求解方法

二阶锥规划问题 (SOC)^[102] 源起于十七世纪的 Fermat-Weber 问题，很多求解困难的问题都可以转化成二阶锥规划问题来进行建模求解，其中较为常见的比如凸二次规划、线性规划。二阶锥规划是凸规划中的典型代表，广泛运用于电力系统的研究。

二阶锥规划问题的标准模型见下式：

$$\min_{x_i} \left\{ c^T x \mid Ax = b, x_i \in K, i = 1, 2, \dots, N \right\} \quad (4-30)$$

式中： x 代表实数变量，维度为 N ； A 代表维度为 $M \times N$ 的实数常量； b 、 c 代表实数常量，维度为 N ； K 代表二阶锥，其求解方法见式 (4-31) 及 (4-32) 所示。

二阶锥如下式：

$$K = \left\{ x_i \in R_N \mid y^2 \geq \sum_{i=1}^N x_i^2, y \geq 0 \right\} \quad (4-31)$$

旋转二阶锥如下式：

$$K = \left\{ x_i \in R_N \mid yz \geq \sum_{i=1}^N x_i^2; y, z \geq 0 \right\} \quad (4-32)$$

在二阶锥规划问题中，模型的目标函数和约束条件均要为线性表示，二阶锥 K 内包含变量的解空间，因而 SOCP 问题又称线性锥优化问题，本质上属于凸规划领域。通过二阶锥方法进行求解有诸多优点，其模型计算耗时短，且求得的结果是全局最优解。

将本文设定的模型进行二阶锥变形^[74]：

$$(I_{ij}(t))^2 = \frac{(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2}{(U_i(t))^2} \quad (4-33)$$

令 $\tilde{I}_{ij}(t) = (I_{ij}(t))^2$, $U_{ij}(t) = (U_i(t))^2$, 并用 $U_{ij}(t)$ 和 $\tilde{I}_{ij}(t)$ 替换电压和电流的平方，可以得到：

$$f_2 = \min \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j \in c(i)} \tilde{I}_{ij}(t) r_{ij} \Delta t \quad (4-34)$$

$$\begin{cases} \sum_{i \in u(j)} [P_{ij}(t) - r_{ij} \tilde{I}_{ij}(t)] = \sum_{k \in v(j)} P_{jk}(t) - P_i(t) \\ \sum_{i \in u(j)} [Q_{ij}(t) - x_{ij} \tilde{I}_{ij}(t)] = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk}(t) - Q_i(t) \\ P_j(t) = P_{j,PV}(t) + P_{j,dis}(t) - P_{j,ch}(t) - P_{j,load}(t) \\ Q_j(t) = Q_{j,PV}(t) - Q_{j,SC}(t) - Q_{j,load}(t) \end{cases} \quad (4-35)$$

$$U_j(t) = U_i(t) - 2(r_{ij} P_{ij}(t) + x_{ij} Q_{ij}(t)) + \tilde{I}_{ij}(t) [(r_{ij})^2 + (x_{ij})^2] \quad (4-36)$$

$$(\tilde{I}_{ij}(t))^2 = \frac{(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2}{(U_i(t))^2} \quad (4-37)$$

将式 (4-37) 作一步松弛

$$\tilde{I}_{ij}(t) \geq \frac{(P_{ij}(t))^2 + (Q_{ij}(t))^2}{U_i(t)} \quad (4-38)$$

继续等价，将式 (4-38) 化为标准的二阶锥：

$$\begin{array}{c} 2P_{ij}(t) \\ 2Q_{ij}(t) \\ \tilde{I}_{ij}(t) - U_i(t) \end{array} \leq \tilde{I}_{ij}(t) + U_i(t) \quad (4-39)$$

4.6 算例分析

4.6.1 算例背景

如图 4.7 为 21 节点低压配电网结构图，以此作为算例进行仿真，设定额定电压为 0.38kV，线路参数为 $Z_{ii}=0.650 + j0.412 \Omega/km$ 。

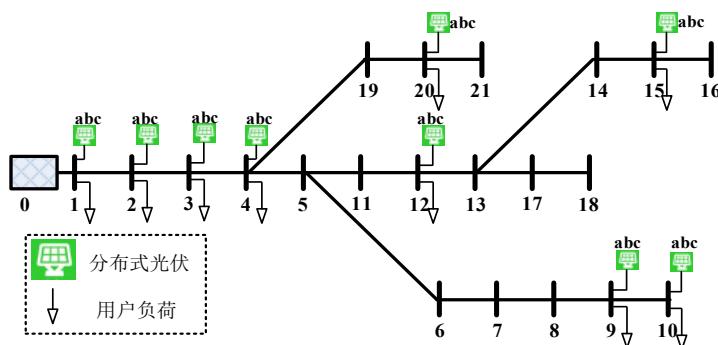


图 4.7 21 节点低压配电网

低压 21 节点系统各节点负荷光伏可用数据如图 4.8 所示，通常低压配电网供电半径较小，外界条件整体相似，因此可看作光伏和负荷曲线在各节点大致相同。

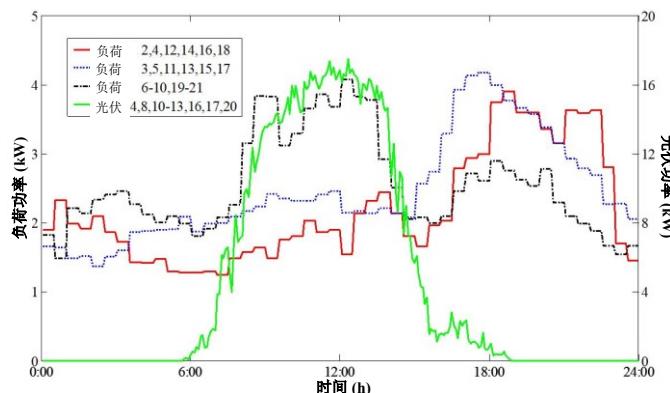


图 4.8 21 节点低压配电网各节点负荷光伏可用数据

光伏接入方案大体上可分为两种：集中接入和分散接入。配电网中的每个节点都可以接入光伏，为了便于定性分析，选取以下几类节点接入光伏：线路首端、线路中端、线路末端、支路连接节点、线路末端。选取的 9 个接入方案如表 4.1 所示。

表 4.1 低压配电网光伏接入方案

接入方式	插入位置	接入节点
集中接入	线路首端	1
	支路连接节点	4
	线路中端	9
	线路末端	15

表 4.1 低压配电网光伏接入方案（续）

接入方式	插入位置	接入节点
分散接入	线路首端	1 2 3
	线路前端及连接节点	1 3 4
	线路前中后	1 10 15
	支路连接节点	3 4 12
	线路末端	9 15 20

4.6.2 光伏消纳能力评估结果

低压配电网各个光伏接入方案的评估结果数据如表 4.2 所示。其中光伏安装的基本功率为：分散接入时，每个节点接入额定容量 1.5kW 的光伏，3 个节点共 4.5kW，再乘以光伏系数，得到光伏总接入量；集中接入时，一个节点接入额定容量 4.5kW 的光伏，再乘以光伏系数，得到光伏总接入量。光伏接入系数分为 4 档：即光伏系数为 6 时为低档，系数为 12 时为中档，系数为 18 时为高档，系数为 24 时为超高档。

本章设定了等差的 4 级光伏接入容量，当光伏接入容量为低档时，渗透率约为 30%，分散接入各条线路的末端综合评估结果最优。在光伏接入容量为中档情况下，最优方案出现在集中接入线路中前段的支路连接节点处，低压配电网光伏渗透率为 69.98%。当光伏接入容量为高档时，最优方案出现在分散接入在线路前端及支路连接节点处，低压配电网光伏渗透率为 112.5%。当光伏接入容量为超高档时，最优方案进一步向线路前端转移，低压配电网光伏渗透率为 140.8%。

表 4.2 低压 21 节点配电网光伏接入方案计算结果

光伏系数	接入方式	接入位置	电网指标	环保指标	经济指标	综合评估
6 (低)	集中接入	1	-0.3403	0.2966	0.1039	-0.1022
		4	-0.3131	0.3002	0.1092	-0.0850
		9	-0.3134	0.2984	0.1064	-0.0862
		15	-0.3089	0.2976	0.1054	-0.0840
12 (中)	分散接入	1 2 3	-0.3291	0.2988	0.1071	-0.0948
		1 3 4	-0.3231	0.2997	0.1084	-0.0909
		1 10 15	-0.3177	0.2998	0.1085	-0.0878
		3 4 12	-0.3119	0.3003	0.1095	-0.0843
18 (高)		9 15 20	-0.3102	0.3004	0.1094	-0.0833

表 4.2 低压 21 节点配电网光伏接入方案计算结果 (续)

光伏系数	接入方式	接入位置	电网指标	环保指标	经济指标	综合评估
集中接入	12 (中)	1	-0.3533	0.6976	0.1191	-0.0141
		4	-0.3183	0.6998	0.1199	0.0064
		9	-0.3294	0.6802	0.1137	-0.0057
		15	-0.3403	0.6734	0.1115	-0.0138
分散接入	12 (中)	1 2 3	-0.3326	0.7045	0.1213	-0.0003
		1 3 4	-0.3256	0.7056	0.1216	0.0039
		1 10 15	-0.3218	0.7019	0.1205	0.0050
	18 (高)	3 4 12	-0.3190	0.7008	0.1202	0.0063
		9 15 20	-0.3213	0.6970	0.1189	0.0039
集中接入	18 (高)	1	-0.3550	1.1205	0.1232	0.0833
		4	-0.3515	1.1021	0.1200	0.0804
		9	-0.3692	1.0481	0.1112	0.0562
		15	-0.3871	1.0415	0.1082	0.0439
分散接入	18 (高)	1 2 3	-0.3327	1.1276	0.1243	0.0978
		1 3 4	-0.3306	1.1251	0.1239	0.0983
		1 10 15	-0.3488	1.1123	0.1218	0.0846
	24(超高)	3 4 12	-0.3598	1.1037	0.1203	0.0762
		9 15 20	-0.3704	1.0914	0.1181	0.0669
集中接入	24(超高)	1	-0.3504	1.4066	0.1244	0.1521
		4	-0.3964	1.3739	0.1180	0.1173
		9	-0.4583	1.3016	0.1070	0.0635
		15	-0.4761	1.2865	0.1054	0.0496
分散接入	24(超高)	1 2 3	-0.3394	1.4081	0.1248	0.1588
		1 3 4	-0.3558	1.4033	0.1237	0.1482
		1 10 15	-0.3885	1.3879	0.1208	0.1256
	24(超高)	3 4 12	-0.4055	1.3754	0.1182	0.1126
		9 15 20	-0.4231	1.3602	0.1153	0.0985

由表 4.2 的数据进行分析，可得到以下几点结论：

- 1) 在分布式光伏渗透率在 1 以下时，在配电网末端接入分布式光伏设备各项指标结果较为优秀。而当渗透率大于 1 并不断上升时，最优方案不断向配电网中前端转移。

- 2) 总体来说, 光伏设备分散接入的各项指标较集中接入更优。
- 3) 总体来说, 对于分布式光伏的渗透率情况, 分布式光伏设备接在配电网末端低于接在配电网中前段, 此现象随着配电网光伏接入容量的升高愈发明显, 如图 4.9。

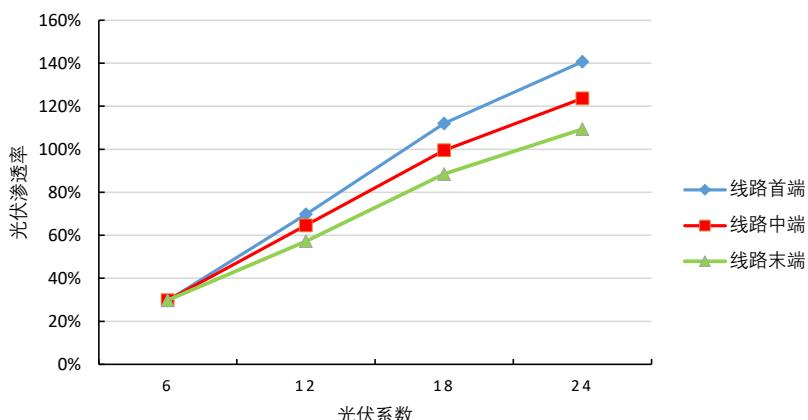


图 4.9 不同光伏接入容量下的低压配电网各方案的渗透率

- 4) 随着光伏接入容量的提高, 最优方案的投资回报率也呈不断升高, 但总体来说升高幅度并不明显, 且升高趋势逐渐变缓, 如图 4.10 所示。

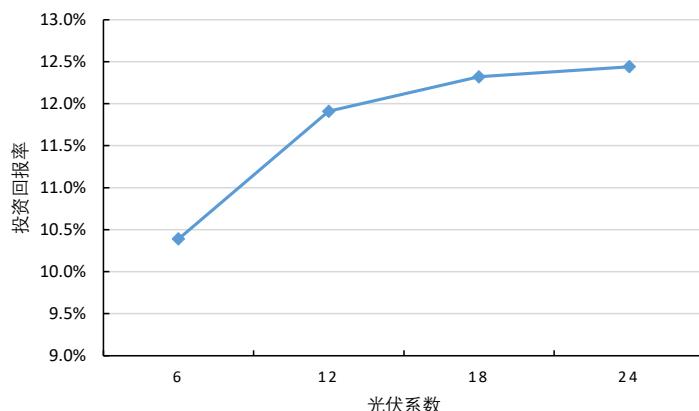


图 4.10 不同光伏接入容量下低压配电网的设备投资回报率

4.7 本章小结

本章基于对称的三相三线制低压配电网进行光伏消纳能力评估, 通过 MATLAB 进行仿真模拟得出:

(1) 本章对低压配电网的网架结构和其接入储能设备、逆变器元件的特点进行分析, 建立了低压配电网的网络和元件的三相模型, 为进行准确的光伏消纳能力评估打下坚实的基础。

(2) 建立在考虑电网已有元件的基础上, 将目标函数设定为实际光伏消纳容量最大, 即光伏发电量减去有功网损的差值最大, 得到低压配电网光伏消纳能力评估模

型，采用二阶锥松弛技术将模型中非线性的二次方程转化成为凸约束条件进行松弛求解，从而将原模型转化为可以求解的凸规划模型，降低求解难度。

(3) 将模型拓展到全年分情况在不同位置接入不同容量的分布式光伏，设定多个方案，得到评估结果，验证分析所提指标及评估方法得出结论。在分布式光伏渗透率小于 100% 时，在配电网末端接入分布式光伏设备各项指标结果较为优秀。而当渗透率高于 100% 并不断上升时，最优方案不断向配电网中前端转移。总体来说，光伏设备分散接入的各项指标较集中接入更好。对于分布式光伏的渗透率情况，分布式光伏设备接在配电网末端低于接在配电网中前段，此现象随着配电网光伏接入容量的升高愈发明显。随着光伏接入容量的提高，最优方案的投资回报率也呈不断升高，但总体升高幅度并不明显，且升高趋势逐渐变缓。

5 基于不平衡配电网的光伏消纳能力评估研究

5.1 引言

第四章所建立模型可以有效评估三相平衡状态下的低压配电网光伏消纳能力，但是当配电网三相不平衡时，中性线流过不平衡电流，此时该模型不能准确评估三相不平衡度等指标。实际上，三相四线制网络在我国低压配电网广泛应用，与中压配电网相比，网架拓扑、线路及设备型号、光伏和负荷性质等存在很大差异，例如低压配电网自身参数的不对称、负荷和光伏的单相接入而非三相对称接入，这就导致了低压配电网普遍存在不平衡问题，因此针对三相对称模型的建模方法不能简单适用到三相不对称模型中，除了考虑各相线和中性线的潮流外，还需考虑他们之间的耦合关系。因此，低压配电网在建模时必须同时考虑潮流的大小和方向，进而得到中性线功率流动。本章首先推导了三相四线制低压配电网潮流计算方法，在此基础上建模评估光伏消纳能力。

5.2 三相四线制低压配电网潮流推导

5.2.1 理论基础

三相四线制低压配电网的网络拓扑图如图 5.1，共 m 段母线，包括 a 相、 b 相、 c 相和中性线 n ，三相供电线路与中性线 n 之间构成一个完整的回路，进而将功率输送至用户侧。

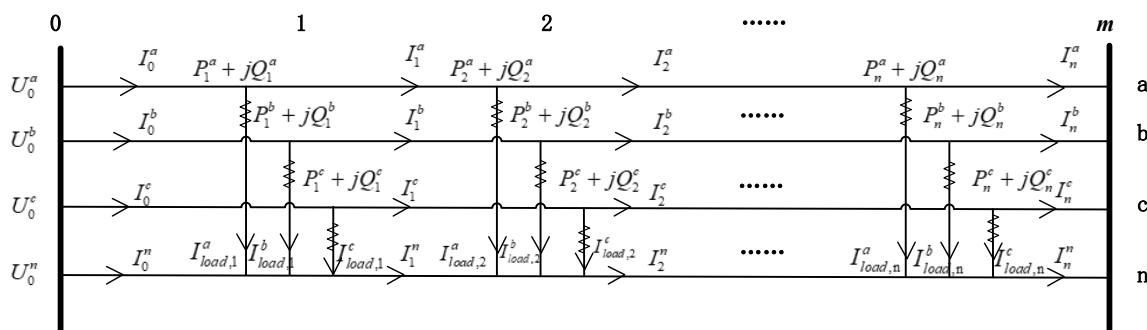


图 5.1 三相四线制低压配电网网络

采用前推回代法推导系统潮流，各节点接入的光伏和负荷采用恒功率模型为已知量，线路始端电压为已知量，通过式（5-1）求得母线 m 上三相分别流经负荷的电流值：

$$\begin{cases} I_{load,m}^a = \frac{P_m^a + jQ_m^a}{U_m^a} \\ I_{load,m}^b = \frac{P_m^b + jQ_m^b}{U_m^b} \\ I_{load,m}^c = \frac{P_m^c + jQ_m^c}{U_m^c} \end{cases} \quad (5-1)$$

式中： P_m^a 、 P_m^b 、 P_m^c 表示母线 m 上 a 、 b 、 c 三相的负荷有功功率， U_m^a 、 U_m^b 、 U_m^c 表示母线 m 上三相节点电压值， Q_m^a 、 Q_m^b 、 Q_m^c 表示母线 m 上 a 、 b 、 c 三相的负荷无功功率， $I_{load,m}^a$ 、 $I_{load,m}^b$ 、 $I_{load,m}^c$ 分别表示母线 m 上 a 、 b 、 c 三相的负荷电流。

在线路末端根据 KCL 计算中性线的电流值 I_n^n ，如式 (5-2) 所示：

$$I_A^n + I_B^n + I_C^n + I_n^n = 0 \quad (5-2)$$

然后，从线路末端向前推导计算求得始端的三相电流值，如式 (5-3) 所示：

$$\begin{cases} I_0^a = \sum_{i=1}^n (I_i^a + I_{load,i}^a) \\ I_0^b = \sum_{i=1}^n (I_i^b + I_{load,i}^b) \\ I_0^c = \sum_{i=1}^n (I_i^c + I_{load,i}^c) \end{cases} \quad (5-3)$$

式中： I_0^a 、 I_0^b 、 I_0^c 分别表示线路始端的各相电流值， I_i^a 、 I_i^b 、 I_i^c 分别表示线路 i 的各相电流值。因此，中性线 n 的电流值可由 KCL 定律得到：

$$I_{i-1}^n = I_i^n - (I_{load,i}^a + I_{load,i}^b + I_{load,i}^c) \quad (5-4)$$

式中： I_{i-1}^n 表示由线路 i 向前推导的相邻线路的中性线电流； I_i^n 表示已知线路 i 的 n 相电流。

得到首节点电流后，从线路首端依次向线路末端回带计算，进而求得线路末端节点电压，如式 (5-5) 所示：

$$\begin{cases} U_n^a = U_0^a - \sum_{i=1}^n \Delta U_i^a \\ U_n^b = U_0^b - \sum_{i=1}^n \Delta U_i^b \\ U_n^c = U_0^c - \sum_{i=1}^n \Delta U_i^c \\ U_n^n = U_0^n - \sum_{i=1}^n \Delta U_i^n \end{cases} \quad (5-5)$$

式中： U_0^a 、 U_0^b 、 U_0^c 、 U_0^n 表示各相线和中性线的线路首端节点电压； U_i^a 、 U_i^b 、 U_i^c 、 U_i^n 表示各相线路和中性线的线路末端节点电压； ΔU_i^a 、 ΔU_i^b 、 ΔU_i^c 、 ΔU_i^n 分别表示各相线和中性线的各个节点的电压降，由式（5-6）可求得。

$$\begin{cases} \Delta U_i^a = I_i^a \cdot Z_i^a \\ \Delta U_i^b = I_i^b \cdot Z_i^b \\ \Delta U_i^c = I_i^c \cdot Z_i^c \\ \Delta U_i^n = I_i^n \cdot Z_i^n \end{cases} \quad (5-6)$$

式中： Z_i^a 、 Z_i^b 、 Z_i^c 、 Z_i^n 表示各相和中性线所对应的线路阻抗； I_i^a 、 I_i^b 、 I_i^c 、 I_i^n 表示线路 i 上各相线和中性线的电流值。

通过以上计算，完成了一整套前推回代潮流计算过程。采用式（5-7）进行电压修正，使得母线三相对地电压调整为以中性线为参考的电压：

$$\begin{cases} U_i^a = U_i^a - U_i^n \\ U_i^b = U_i^b - U_i^n \\ U_i^c = U_i^c - U_i^n \end{cases} \quad (5-7)$$

最后计算迭代过程中各节点最近两次的电压之差是否满足收敛条件从而判定收敛性。如果误差小与给定精度，则迭代停止；否则，继续迭代。流程图如图 5.2 所示。

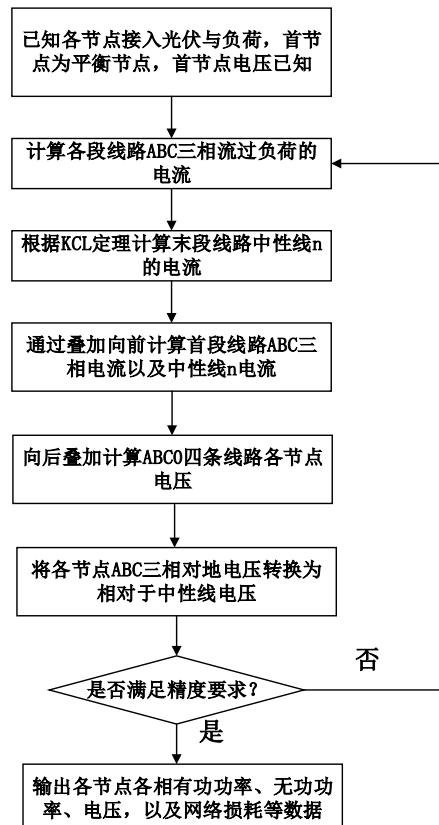


图 5.2 三相四线制前推回代潮流计算流程图

5.2.2 潮流方程的矩阵表示

取两母线 ($m-1$)、 m 的低压配电网三相四线制网络结构如图 5.3 所示，以母线 m 的中性线节点为参考节点。模型由两条母线构成，每条母线均包含四个节点，分别表示每条母线上的三条相线 a 、 b 、 c 和中性线 n 的节点。各相均有线路自身阻抗，不同相间存在互阻抗，在闭合回路间连接光伏和负荷。

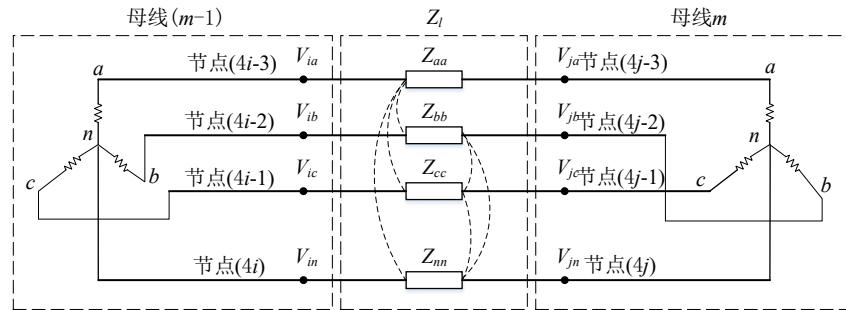


图 5.3 三相四线制网络结构图

因此，两母线 ($m-1$) 和 m 间的三相四线制线路的耦合关系可用串联阻抗矩阵 $Z_{l,m}$ 表示：

$$Z_{l,m} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

式中： Z_{gg} 表示矩阵的对角元素，其值取自线路自阻抗； Z_{gh} 表示矩阵的非对角元素 ($g \neq h$)，代表各相线路之间的互阻抗。

因此，可以写出三相四线制低压配电网的节点导纳矩阵：

$$Y_l = \begin{bmatrix} \sum_{k \in c(1)} Z_{1,k}^{-1} & \cdots & -Z_{1,x}^{-1} & \cdots & -Z_{1,m}^{-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ -Z_{x,1}^{-1} & \cdots & \sum_{k \in c(x)} Z_{x,k}^{-1} & \cdots & -Z_{x,m}^{-1} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ -Z_{m,1}^{-1} & \cdots & -Z_{m,x}^{-1} & \cdots & \sum_{k \in c(m)} Z_{m,k}^{-1} \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

式中： $Z_{x,m}^{-1}$ 代表两母线之间的串联阻抗矩阵的逆矩阵； $\sum_{k \in c(m)} Z_{m,k}^{-1}$ 代表 $c(m)$ 集合内所有串联阻抗矩阵的逆矩阵的和； $c(m)$ 代表与母线 m 直接相连的所有母线。

进而得到包含所有节点的节点导纳矩阵 $[Y]$ ：

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{l11} & Y_{l12} & \cdots & Y_{l1i} & \cdots & Y_{l1N} \\ Y_{l21} & Y_{l22} & \cdots & Y_{l2i} & \cdots & Y_{l2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{li1} & Y_{li2} & \cdots & Y_{lii} & \cdots & Y_{liN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{IN1} & Y_{IN2} & \cdots & Y_{INi} & \cdots & Y_{INN} \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

式中: N 代表节点总数。

节点电压方程可以表示节点注入电流和各节点电压的关系。对于节点数为 N 的低压配电网，可以先写出各段母线的自导纳矩阵以及互导纳矩阵，与此同时求得各节点的电流方程。将三相四线制网络的节点电压、注入电流和节点导纳分别表示成矩阵形式，则节点电压方程可以表示为：

$$[Y] \cdot [V(t)] = [I_{inj}(t)] \quad (5-11)$$

式中: $[I_{inj}(t)]$ 代表各个节点在 t 时间的注入电流矩阵; $[V(t)]$ 代表各个节点在 t 时的节点电压组成的矩阵。

将矩阵方程各元素展开为

$$\begin{bmatrix} Y_{l11} & Y_{l12} & \cdots & Y_{l1i} & \cdots & Y_{l1N} \\ Y_{l21} & Y_{l22} & \cdots & Y_{l2i} & \cdots & Y_{l2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{li1} & Y_{li2} & \cdots & Y_{lii} & \cdots & Y_{liN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{IN1} & Y_{IN2} & \cdots & Y_{INi} & \cdots & Y_{INN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

当各节点注入电流为已知量，可将式 (5-11) 变换求得各节点电压：

$$[V(t)] = [Y]^{-1} [I_{inj}(t)] \quad (5-13)$$

(1) 节点电流值

流入各节点电流的矩阵表示为：

$$\begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \\ I_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{S_{ja}}{V_{ja} - V_{jn}} \right)^* \\ \left(\frac{S_{jb}}{V_{jb} - V_{jn}} \right)^* \\ \left(\frac{S_{jc}}{V_{jc} - V_{jn}} \right)^* \\ - \left(\left(\frac{S_{ja}}{V_{ja} - V_{jn}} \right)^* + \left(\frac{S_{jb}}{V_{jb} - V_{jn}} \right)^* + \left(\frac{S_{jc}}{V_{jc} - V_{jn}} \right)^* \right) \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

式中: V_{ja} 、 V_{jb} 、 V_{jc} 、 V_{jn} 分别表示 j 节点的各相电压; S_{ja} 、 S_{jb} 、 S_{jc} 分别表示 j 节点的各相视在功率; I_{ja} 、 I_{jb} 、 I_{jc} 、 I_{jn} 分别表示 j 节点各相上的注入电流。

(2) 回代电流

从线路末端到线路首端，依次推导各条线路的电流：

$$I_{ij} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{ij}^a \\ \dot{I}_{ij}^b \\ \dot{I}_{ij}^c \\ \dot{I}_{ij}^n \end{bmatrix} = \sum_{k \in M} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ij}^a \\ \dot{I}_{ij}^b \\ \dot{I}_{ij}^c \\ \dot{I}_{ij}^n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{I}_j^a \\ \dot{I}_j^b \\ \dot{I}_j^c \\ \dot{I}_j^n \end{bmatrix} \quad (5-15)$$

式中： $\dot{I}_j^a \dot{I}_j^b \dot{I}_j^c \dot{I}_j^n$ 表示三相及中性线的注入电流值； M 表示与 j 节点直接相连的所有支路（不包含 ij 支路）的集合； $\dot{I}_{ij}^a \dot{I}_{ij}^b \dot{I}_{ij}^c \dot{I}_{ij}^n$ 表示 ij 支路的电流。

(3) 前推电压

在推导得到首端线路的电流后，然后由线路首端向线路末端继续推导得到线路各个节点电压：

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_i^a \\ \dot{V}_i^b \\ \dot{V}_i^c \\ \dot{V}_i^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_j^a \\ \dot{V}_j^b \\ \dot{V}_j^c \\ \dot{V}_j^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{I}_{ij}^a \\ \dot{I}_{ij}^b \\ \dot{I}_{ij}^c \\ \dot{I}_{ij}^n \end{bmatrix} Z_{l,m} \quad (5-16)$$

(4) 停止迭代条件

对比各个节点迭代最后一轮计算得到的电压幅值，若小于允许误差值则停止迭代：

$$\max \left(\left\| \dot{V}_{i\xi}^{(k+1)} - \dot{V}_{i\xi}^{(k)} \right\| \right) < \varepsilon \quad (5-17)$$

5.3 不平衡低压配电网的光伏消纳能力评估模型

5.3.1 目标函数

本章将目标函数设定为光伏消纳容量最大，由于光伏向低压配电网输入功率会影响配电网的网络损耗，当高比例光伏接入时随着接入容量的不断增大，会使配电网网损增加，从而降低配电网对光伏的实际消纳能力，因而实际光伏消纳容量最大需要考虑光伏发电量减去有功网损的差值最大，在设定目标函数时需要综合考虑配电网的光伏发电量最大和有功网损最小。

(1) 光伏发电量最大

配电网光伏消纳能力与光伏发电量大小密切相关，因此，以低压配电网光伏发电量最大作为目标，可表示为：

$$\max f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{PV}} P_{PV,i}(t) \cdot t \quad (5-18)$$

式中： $P_{PV,i}$ 表示节点 i 接入的光伏有功功率； N_{PV} 代表光伏元件总数； T 表示时段的总数。

(2) 网络损耗最小

在配电网中接入分布式光伏增加了新的电源点，从而导致低压配电网由原先的单电源辐射状变为包含多个电源的环网，增加了潮流大小和方向的不确定性，导致有功损耗大量攀升。因此，以低压配电网三相线路和中性线的损耗之和最小为目标：

$$P_{loss}(t) = [I_l^*(t) \odot I_l(t)]^T \cdot [R] = \begin{bmatrix} I_1^{abcn}(t) \\ \vdots \\ I_L^{abcn}(t) \end{bmatrix}^* \odot \begin{bmatrix} I_1^{abcn}(t) \\ \vdots \\ I_L^{abcn}(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1^{abcn} \\ \vdots \\ R_L^{abcn} \end{bmatrix} \quad (5-19)$$

式中： $[I_l(t)]$ 代表低压配电网在 t 时所有支路的电流所组成的矩阵； R 代表各条线路的电阻值； R_L^{abcn} 代表含有线路 L 上三相 abc 与中性线 n 电阻值的矩阵，其大小为 4×1 ； $[I_L^{abcn}(t)]$ 代表在 t 时的含有线路 L 上三相 abc 与中性线 n 电流所构成的矩阵，大小为 4×1 ； \odot 表征哈达玛积运算符号，即矩阵与矩阵相对应元素的乘积。

$$I_l(t) = [M] \cdot [V(t)] \quad (5-20)$$

式中：采用矩阵 $[M]$ 表征各支路与节点关系，矩阵 $[M]$ 可利用节点导纳矩阵 $[Y]$ 推导得到：

$$\begin{cases} M_{k,i} = Y_{ij} \\ M_{k,j} = -Y_{ij} \end{cases} \quad (5-21)$$

式中： i 表示支路 k 的前一节点； j 表示支路 k 的后一节点； k 表示两节点 i, j 之间的支路。

因此，总网损目标函数可表示为：

$$\begin{aligned} \min f_2 &= \sum_{t=1}^T P_{loss}(t) \cdot t = \sum_{t=1}^T [I_l(t)]^* \odot [I_l(t)]^T \cdot [R] \cdot t \\ &= \sum_{t=1}^T [M[Y]^{-1} I_{inj}(t)]^* \odot [M[Y]^{-1} I_{inj}(t)]^T \cdot [R] \cdot t \end{aligned} \quad (5-22)$$

(3) 光伏消纳容量最大

光伏发电量与网络损耗的差值最大时光伏消纳容量最大，通过加权平均将两个目标函数整合为一个目标函数求解：

$$\max F = \omega_1 f'_1 - \omega_2 f'_2 = \omega_1 \frac{f_1}{F_1} - \omega_2 \frac{f_2}{F_2} \quad (5-23)$$

式中： F 为以光伏消纳容量最大的总目标函数； f'_1 、 f'_2 分别对应两目标函数 f_1 、 f_2 标么化结果，目的是为了使不同目标函数在同一数量级计算； F_1 和 F_2 分别表示两目标函数的基准值，以此对各目标函数做归一化； ω_1 、 ω_2 表示光伏发电量以及网络损耗的权重系数， $\omega_1 + \omega_2 = 1$ ， $\omega_1 \geq 0$ 、 $\omega_2 \geq 0$ 。

5.3.2 约束条件

(1) 线路载流量约束

$$|I_l(t)| \leq I_L^{\max} \quad (5-24)$$

式中： $I_l(t)$ 代表在 t 时流过线路 l 的线路电流，该值不能超过线路允许的最大载流量； I_L^{\max} 代表线路允许的最大载流量。

(2) 节点电压约束

依照国家有关规定，各节点的电压偏移量应处于一个合理的安全范围，保证电网和设备的稳定和安全：

$$V_i^{\min} \leq |V_i(t)| \leq V_i^{\max} \quad (5-25)$$

式中： $|V_i(t)|$ 代表 t 时 i 节点的电压幅值； V_i^{\max} 为节点电压上限； V_i^{\min} 代表节点电压下限。

(3) 中性线电压偏移约束

$$|v_{i,neu}(t)| \leq V_{neu}^{\max}, i \in N \quad (5-26)$$

式中： $|v_{i,neu}(t)|$ 代表 t 时中性线上的电压； V_{neu}^{\max} 代表中性线的电压上限。

(4) 光伏容量约束

光伏逆变器容量和功率应满足：

$$P_{abc}^2(t) + Q_{abc}^2(t) \leq S_{abc}^2 \quad (5-27)$$

式中： S_{abc} 为光伏额定容量； $P_{abc}(t)$ 为接入 a 、 b 、 c 三相的光伏实际有功出力； $Q_{abc}(t)$ 为接入 a 、 b 、 c 三相的光伏吸收或发出的无功。

(5) 三相不平衡约束

三相不平衡度可以衡量低压配电网的三相不平衡程度，通常通过计算电压的负序分量与正序分量之比来表示：

$$VUF_{bus}(t) = \frac{|V_{neg,bus}(t)|}{|V_{pos,bus}(t)|} = \frac{|V_{a,bus}(t) + \alpha^2 V_{b,bus}(t) + \alpha V_{c,bus}(t)|}{|V_{a,bus}(t) + \alpha V_{b,bus}(t) + \alpha^2 V_{c,bus}(t)|} \quad (5-28)$$

式中： $V_{a,bus}(t)$ 、 $V_{b,bus}(t)$ 、 $V_{c,bus}(t)$ 代表各相的节点电压； $V_{pos,bus}(t)$ 代表母线的正序电压； $V_{neg,bus}(t)$ 代表母线的负序电压； $\alpha = 1\angle 120^\circ$ 。

三相不平衡度应满足：

$$VUF_{bus}(t) \leq VUF^{\max} \quad (5-29)$$

式中： VUF^{\max} 代表三相不平衡度的上限。

(6) 储能元件约束

储能 SOC 在 t 时刻的约束可表示为：

$$SOC_{ESS}^{\min} \leq SOC_{ESS,i}(t) \leq SOC_{ESS}^{\max} \quad (5-30)$$

式中： SOC_{ESS}^{\max} 、 SOC_{ESS}^{\min} 代表储能 SOC 的上限和下限，分别取值 80%、20%。

(7) 变压器容量约束

对于变压器所供的低压台区范围内，除了需要满足各条线路不过载、各节点电压不越限等约束外，还应满足变压器低压出口线路功率不能超过配电变压器的额定容量。

$$S_{L1}^{abc}(t) \leq S_T^{\max} \quad (5-31)$$

式中： $S_{L1}^{abc}(t)$ 表示线路首端各相线路的实际功率； S_T^{\max} 表示变压器额定容量。

5.4 最优潮流模型的凸化求解方法

由于电压、电流均含有大小和方向，因此电压、电流均采用复数变量表示，同时导致了最优潮流模型中存在非凸约束，故该问题是一个典型的非凸规划问题，求解困难。针对此问题，将复数变量的实部和虚部分开表示，将式 (5-13) 中的复数展开：

$$[V(t)] = [V_{re}(t) + jV_{im}(t)] = [\operatorname{Re}(Y) + \operatorname{Im}(Y)]^{-1} \cdot [I_{inj,re}(t) + jI_{inj,im}(t)] \quad (5-32)$$

因此，节点电压矩阵可以拆分为：

$$[V_{re}(t)] = [\operatorname{Re}(Y)]^{-1} \cdot [I_{inj,re}(t)] - [\operatorname{Im}(Y)]^{-1} \cdot [I_{inj,im}(t)] \quad (5-33)$$

$$[V_{im}(t)] = [\operatorname{Im}(Y)]^{-1} \cdot [I_{inj,re}(t)] + [\operatorname{Re}(Y)]^{-1} \cdot [I_{inj,im}(t)] \quad (5-34)$$

(1) 电压上限约束

由于电压以复数形式表示，实际上该约束条件可以计算复数电压的模长，其值小于电压上限：

$$v_{i,re}^2(t) + v_{i,im}^2(t) \leq (V_i^{\max})^2 \quad (5-35)$$

式中： $v_{i,re}(t)$ 为各节点 i 电压的横分量； $v_{i,im}(t)$ 为各节点电压的纵分量； V_i^{\max} 代表各节点电压的上限。

(2) 电压下限约束

该约束不等式具有非凸性，这也造成了整体模型的非凸性，因此需要将该约束条件进行凸化，从而保证解的全局最优性：

$$-K_{1a}[v_{i,re}(t)] - K_{2a}[v_{i,im}(t)] \leq -V_i^{\min}, i \in a \quad (5-36)$$

$$-K_{1b}[v_{i,re}(t)] - K_{2b}[v_{i,im}(t)] \leq -V_i^{\min}, i \in b \quad (5-37)$$

$$-K_{1c}[v_{i,re}(t)] - K_{2c}[v_{i,im}(t)] \leq -V_i^{\min}, i \in c \quad (5-38)$$

式中： K_{1a} 、 K_{2a} 、 K_{1b} 、 K_{2b} 、 K_{1c} 、 K_{2c} 代表各相电压的下限约束系数； V_i^{\min} 代表电压下限。

(3) 三相不平衡度

电压负序分量和正序分量的比值具有非凸性，进而导致整体模型的非凸性，因此需将其合理变换为凸函数。电压的负序分量远小于正序分量，而正序电压值大小约等于该节点的电压幅值，故三相不平衡度可作如下变形：

$$VUF_{bus}(t) = \left| \frac{V_{neg,bus}(t)}{V_{pos,bus}(t)} \right| \cong \left| \frac{V_{a,bus}(t) + \alpha^2 V_{b,bus}(t) + \alpha V_{c,bus}(t)}{V(t)} \right| \quad (5-39)$$

式中： $V(t)$ 为额定电压。

因此，低配电网的三相不平衡度应满足：

$$VUF_{bus}^2(t) \leq (VUF^{\max})^2 \quad (5-40)$$

(4) 中性线电压偏移约束

中性线复数电压的模长应满足：

$$v_{neu,re}^2(t) + v_{neu,im}^2(t) \leq (V_{neu}^{\max})^2, i \in N \quad (5-41)$$

式中： V_{neu}^{\max} 为中性线电压上限。

(5) 线路载流量约束

各条线路的载流量应满足：

$$|I_l(t)| \leq I_L^{\max} \quad (5-42)$$

式中： $I_l(t)$ 表示流过线 l 的电流； I_L^{\max} 表示线路允许的最大载流量。

将复数变量 $I_l(t)$ 作变形

$$I_l(t) = Y_l V_l(t) = Y_l (V(t)_i - V_j(t)) \quad (5-43)$$

式中： i 、 j 分别表示连接线路 l 的首节点和末节点。

其中支路导纳矩阵可表示为：

$$Y_l = G_l + jB_l \quad (5-44)$$

式中： G_l 、 B_l 分别代表支路电导和支路电纳。

接着，将式 (5-42) 不等式左边变形：

$$|I_l(t)| = |Y_l| |V_l(t)| = \sqrt{(G_l^2 + B_l^2)} \cdot \sqrt{(V_{i,re}(t) - V_{j,re}(t))^2 + (V_{i,im}(t) - V_{j,im}(t))^2} \quad (5-45)$$

等式两边同时平方，将方程转化为凸约束表达式：

$$|I_l(t)|^2 \leq (I_L^{\max})^2 \quad (5-46)$$

通过对评估模型进行凸化，原模型的目标函数和约束条件全部转化成易于得到全局最优解的凸规划模型，进而可以在 MATLAB 上通过调用 CPLEX 快速求解。

5.5 算例分析

5.5.1 算例背景

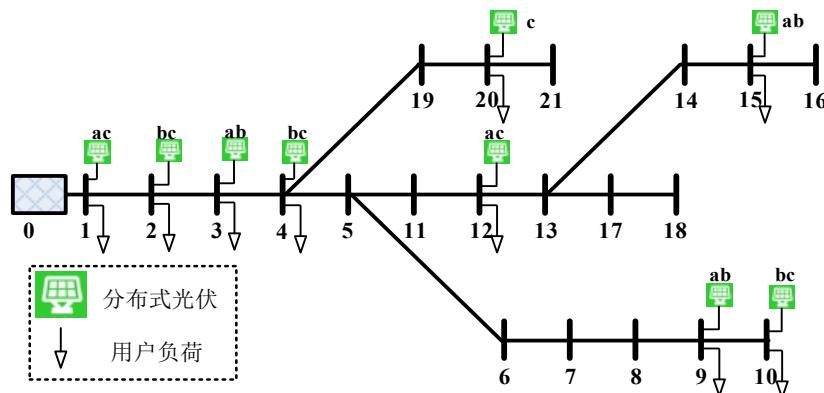


图 5.4 380V 低压配电网馈线

仿真采用 380V 三相四线制结构的低压配电网，如图 5.4 所示，相邻母线间的线路自阻抗取值 $Z_{ii}=0.650+j0.412 \Omega/\text{km}$ ，线路互阻抗取值 $Z_{ij}=(0.01 \times Z_{ii}) \Omega/\text{km}$ ，相邻母线间的线路长度 50m，导线型号 LGJ-50。每个母线的各相线均可相互独立接入光伏，单个光伏额定容量与第四章相同，光伏不对称接入位置和相线如图 5.4 所示，典型日光伏和负荷功率曲线图 5.5 所示。

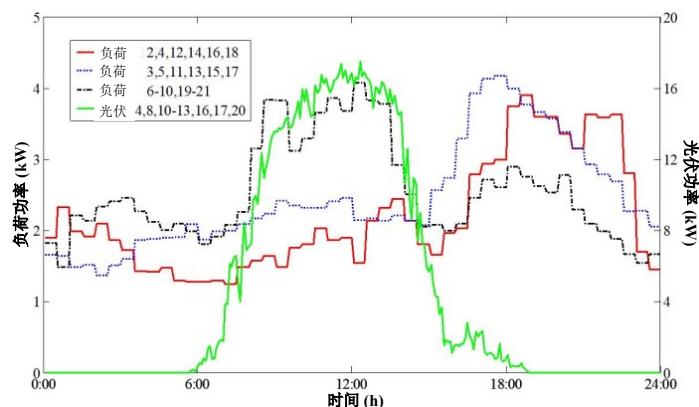


图 5.5 典型日功率曲线

5.5.2 对电网指标的评估结果

低压配电网光伏接入方案计算结果如表 5.1 所示，光伏不平衡接入各个节点每个光伏安装基本功率与第四章数值相同。可以看出：

(1) 由于光伏的不对称接入使低压配电网三相不平衡度严重，与三相完全对称方案相比，三相不平衡度指标相对“恶劣”，电网运行指标也因此受到影响。

(2) 总体规律与三相完全对称方案类似，分散接入指标相比集中接入的指标结果更为优秀，体现为低压配电网消纳光伏的能力更强。

(3) 当光伏渗透率较低时，光伏接入位置越靠近末节点，电网运行指标越好，综合评估结果也越好；当光伏渗透率过高时与此相反，即光伏接入位置越靠近末节点，电网运行指标越差，综合评估结果越差，此时还会出现部分弃光现象。

表 5.1 低压配电网光伏接入方案评估结果

光伏系数	接入方式	接入位置	电网指标	环保指标	经济指标	综合评估
6 (低)	集中接入	1	-0.3961	0.2818	0.0988	-0.1382
		4	-0.3671	0.2852	0.1040	-0.1200
		9	-0.3674	0.2835	0.1013	-0.1211
		15	-0.3591	0.2827	0.1003	-0.1168
分散接入	1 2 3		-0.3805	0.2839	0.1020	-0.1283
	1 3 4		-0.3742	0.2847	0.1032	-0.1243
	1 10 15		-0.3684	0.2848	0.1033	-0.1210
	3 4 12		-0.3624	0.2854	0.1043	-0.1172
	9 15 20		-0.3605	0.2854	0.1042	-0.1162

表 5.1 低压配电网光伏接入方案评估结果 (续)

光伏系数	接入方式	接入位置	电网指标	环保指标	经济指标	综合评估
集中接入	12 (中)	1	-0.4062	0.6665	0.1136	-0.0522
		4	-0.3691	0.6687	0.1143	-0.0306
		9	-0.3808	0.6499	0.1083	-0.0428
		15	-0.3924	0.6433	0.1062	-0.0512
分散接入	18 (高)	1 2 3	-0.3843	0.6732	0.1157	-0.0379
		1 3 4	-0.3768	0.6742	0.1160	-0.0334
		1 10 15	-0.3729	0.6707	0.1149	-0.0321
		3 4 12	-0.3698	0.6697	0.1146	-0.0307
集中接入	24(超高)	9 15 20	-0.3722	0.6660	0.1134	-0.0332
		1	-0.4080	1.0724	0.1175	0.0411
		4	-0.4044	1.0547	0.1144	0.0385
		9	-0.4230	1.0029	0.1059	0.0143
分散接入	12 (中)	15	-0.4421	0.9966	0.1030	0.0015
		1 2 3	-0.3844	1.0792	0.1187	0.0563
		1 3 4	-0.3821	1.0768	0.1183	0.0570
		1 10 15	-0.4014	1.0645	0.1162	0.0428
集中接入	18 (高)	3 4 12	-0.4131	1.0562	0.1147	0.0340
		9 15 20	-0.4243	1.0444	0.1126	0.0245
		1	-0.4031	1.3469	0.1188	0.1075
		4	-0.4519	1.3156	0.1125	0.0714
分散接入	24(超高)	9	-0.5175	1.2461	0.1019	0.0162
		15	-0.5364	1.2317	0.1003	0.0019
		1 2 3	-0.3914	1.3483	0.1191	0.1145
		1 3 4	-0.4089	1.3438	0.1180	0.1033
集中接入	24(超高)	1 10 15	-0.4435	1.3290	0.1152	0.0798
		3 4 12	-0.4616	1.3170	0.1127	0.0663
		9 15 20	-0.4803	1.3024	0.1099	0.0519

总体来说，光伏接入容量低时对电网运行参数的影响较小，电网运行指标更优，但是其环保指标和经济性指标较差，导致其综合评估结果较差。因此，要结合工程实际选择合适的光伏接入容量和接入位置，以满足低压配电网运行要求。综上所述，在

光伏接入时要考虑多方因素，准确评估光伏消纳能力对低压配电网运行以及光伏消纳能力提升的研究起到至关重要的参考作用。

5.5.3 三相平衡状态下的评估结果对比

选取光伏分散接入节点 1、10、15，在 a、b、c 三相均对称接入光伏，每个节点接入额定容量 1.5kW 的光伏，光伏系数 12，以此作为光伏接入方案。

低压配电网此时处于三相平衡状态，三相四线制线路中中性线电流为 0，使用第四章与第五章的求解方法分别进行计算。通过比较两种方法求解结果下的网损和电压等指标，验证不同求解方法的可靠性。

不同求解方法在三相平衡状态下的评估结果对比如表 5.2 所示，三相平衡状态时两种不同方法所得到的求解结果完全相同，说明中性线电流为零，可以理解为将三相四线制线路中性线阻抗设置为无限大与三相三线制线路完全等效，这也进一步验证了本章所提出的基于最优潮流的三相四线制模型评估方法具备可行性。

表 5.2 不同求解方法在三相平衡状态下的评估结果

求解方法	网损(kW·h)	最大电压(V)	最小电压(V)
第四章	42.7	235.4	198.0
第五章	42.7	235.4	198.0

5.5.4 三相不平衡状态下的评估结果对比

选取光伏分散接入节点 1、10、15，接入相线分别为 ac、bc、ab，每个节点接入额定容量 1.5kW 的光伏，光伏系数 12，以此作为光伏接入方案。

低压配电网此时处于三相不平衡状态，同样使用第四章与第五章的求解方法分别进行计算，第四章求解方法计算时线路模型为三相三线制模型没有中性线，而第五章求解方法计算时线路模型为三相四线制模型。通过比较两种方法求解结果下的三相及中性线的网损，验证不同求解方法的准确性。

表 5.3 不同求解方法在三相不平衡状态下的评估结果

求解方法	网损(kW·h)				
	a 相	b 相	c 相	n 相	总损耗
第四章	14.62	17.26	26.18	/	58.06
第五章	17.47	19.59	23.85	2.85	60.92

不同求解方法在三相不平衡状态下的评估结果对比如表 5.3 所示，两者总的网络损耗相差 2.86kW·h，值得注意的是，三相四线制网络模型可以求解中性线的网络损

耗，其值为 $2.85\text{kW}\cdot\text{h}$ ，两种方案的网损差值近似相等。除此之外，两种网络结构下不同方法计算的同一相线的网损相差很大，三相四线制模型的 c 相的网损是 $23.85\text{kW}\cdot\text{h}$ ，而三相三线制模型的 c 相的网损是 $26.18\text{kW}\cdot\text{h}$ ，说明该计算结果错误。综上所述，当低压配电网三相平衡时，中性线不会流过不平衡电流，三相三线制和三相四线制配电网可以看作近似等价；当低压配电网三相电压不平衡时，三相四线制模型中性线会流过不平衡电流，而三相三线制线路没有中性线则会造成计算的不准确。

5.6 本章小结

本章模型有效评估了低压配电网的光伏消纳能力，贴近实际，通过仿真验证方案的准确性和合理性：

(1) 首先推导了三相四线制低压配电网的潮流模型，采用前推回代法进行计算迭代，并将所有节点方程整合成为矩阵形式，使推导和计算过程更为直观清楚。三相四线制低压配电网区别于其他网络，所含有的中性线的使得各节点在计算潮流时较为复杂。当配电网处于三相平衡状态时，三相四线制网络中性线不存在不平衡电流，此时三相四线制网络可以简单等效为三相三线制线路模型；当配电网三相电压不平衡时，三相不平衡电流会流过中性线，此时中性线与其它相线一样也需要计算潮流，这就与三相三线制网络结构有了本质不同，正确推导三相四线制潮流是低压配电网评估优化模型的基础。

(2) 当低压配电网三相平衡时，中性线不会流过不平衡电流，可以理解为将三相四线制线路中性线阻抗设置为无限大与三相三线制线路完全等效，使用第四章与本章的求解方法分别进行计算，所得到的求解结果完全相同，这也进一步验证了本章所提出的基于最优潮流的三相四线制模型评估方法具备可行性。

(3) 本章三相四线制最优潮流算法可以准确计算中性线的电压和电流值，进而求解中性线的网络损耗，其值为 $2.85\text{kW}\cdot\text{h}$ ，该值近似等于三相三线制与三相四线制网络总网损的差额，而三相三线制网络模型并不能计算中性线上的数据。除此之外，三相三线制模型的 c 相的网损是 $26.18\text{kW}\cdot\text{h}$ ，而三相四线制模型的 c 相的网损是 $23.85\text{kW}\cdot\text{h}$ ，说明三相三线制各相的网损计算错误，同理其它各项指标计算结果也不准确。只有准确计算三相不平衡状态下低压配电网的最优潮流，才能更好地解决低压配电网光伏消纳能力评估问题，这也更符合实际低压配电网的属性。

6 结论与展望

6.1 研究结论

随着我国“双碳”战略的推进以及分布式光伏研究的逐步深入，低压配电网中分布式光伏接入比例逐渐提高，给配电网系统潮流特性和电能质量等带来了影响。此外，低压配电网线路的 R/X 比值较大且接线模式特殊，采用三相四线制接线方式，其本身参数就存在不对称情况，而光伏在低压配电网通常为单相接入，若光伏电源的接入位置及接入数量不对称，会使低压配电网的三相不平衡更加明显，而电压等级较高的中压配电网或输电网多采用三相三线制结构没有中性线，现有研究针对光伏消纳能力评估方法多集中在中压配电网，在低压配电网并不适用，低压配电网中中性线的存在会影响其潮流计算结果进而影响到整个模型解的正确性。结合当前研究存在的问题和工程实际，本文从指标体系、建模分析、优化求解等方面层层递进，对低压配电网中接入分布式光伏的消纳能力评估问题进行研究。

(1) 阐述低压配电网接入分布式光伏所带来的潮流和电压问题，理论推导其产生的作用原理，进而分析光伏接入后对配电网电能质量带来的影响。从电压、三相不平衡度等角度得出结论，光伏的接入容量并不是越大越好，当光伏接入容量足够大时，沿辐射网各节点电压逐渐升高，光伏接入点为电压最高点，且出现反向潮流现象。因此选择适合的光伏接入位置和接入容量对低压配电网安全运行起到至关重要的作用。

(2) 建立分布式光伏消纳能力评估体系，考虑三个角度的指标，分别为电网运行指标、环保指标和经济性指标，综合多个方面在给低压用户安装分布式光伏设备时能够进行全面细致的评估。多个指标权重的设定将直接影响评估结果的准确与否，因此本文以层次分析法和主成分分析法作为分布式光伏消纳能力指标体系的权重分配方法。通过主观赋权和主成分分析法赋权结合的方法得到了电网 5 个运行指标的最终权重，利用层次分析法得到了电网运行指标、环保指标、经济性指标的权重，建立科学严谨的指标评估体系。

(3) 针对当前研究缺乏针对低压配电网的光伏消纳能力评估模型，本文提出一种低压配电网光伏消纳能力评估方法。将目标函数设定为实际光伏消纳容量最大，即光伏发电量减去有功网损的差值最大，以电网安全稳定运行和线路潮流平衡为约束，

考虑多项评估指标建立低压配电网光伏消纳能力评估模型。从配电网潮流角度将低压配电网分为三相平衡状态和三相不平衡状态，三相完全对称是当中性线阻抗无限大时的三相四线制线路模型特例，根据两种不同的线路结构分别对模型的潮流方程进行优化。对于三相完全对称模型，将线路简化为单线图模型计算以降低潮流方程的求解难度；对于三相不对称模型，采用复数表示电压和电流的大小和方向，将节点导纳矩阵扩展到三相四线制，以矩阵型式表征各变量之间的关系，从而计算中性线潮流使得评估结果更加准确。

(4) 针对光伏消纳能力评估模型不能兼顾求解的效率和可靠性问题，提出低压配电网光伏消纳能力评估模型快速求解方法。当低压配电网处于三相完全对称状态时，采用二阶锥松弛技术将模型中非线性的二次方程转化成为凸约束条件进行松弛求解，从而将原模型转化为可以求解的凸规划模型，降低求解难度。当低压配电网处于三相不平衡时，将同时含有幅值和相角的节点电压和支路电流变量拆分，将包含复数矩阵的模型全部变为实数型式，再通过对电压约束、网损等非凸函数的凸化处理实现模型整体凸化，使模型能够快速准确求得全局最优解。选取典型光伏接入场景，通过仿真实验对比本文提出的两种求解方法的计算结果，验证了所提方法的可靠性和有效性，为光伏消纳能力评估在低压配电网中的应用奠定了坚实的理论基础。

6.2 研究展望

对于分布式光伏接入低压配电网的消纳能力评估具有重要的现实意义。本文从低压配电网最优潮流建模出发，在提出的消纳能力评估指标下，综合评估低压配电网能够消纳的光伏最大消纳能力，开展了相关的研究工作，对当前低压配电网光伏消纳能力评估的指标、模型和求解方法进行了分析和研究，但该课题依然存在一定的问题亟待解决和突破：本文所建立的含分布式光伏的低压配电网数学模型不是很完备，虽在低压配电网建模有所突破，但仅考虑典型日的光伏和负荷曲线，对初始输入数据未做到随机性和广泛性，除此之外，随着低压配电网的不断发展，影响光伏接入的因素会越来越多，评估指标也会越来越复杂，现有评估指标可能不够完善。因此，应进一步改进数据样本，优化评估指标，使评估结果更具有普遍性和适应性，进一步为实际工程提供理论支持。

虽然目前在低压配电网中接入分布式光伏的消纳问题依然存在很多亟待解决的

问题，但是随着光伏消纳能力评估体系研究的不断推进，可以期待在不久之后，这些困难必将被一一解决，我国将在“双碳”战略的引领推动下，大力发展民生和经济。

参考文献

- [1] 卢斯煜, 周保荣, 饶宏, 等. 高比例光伏发电并网条件下中国远景电源结构探讨[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(S1):39-44.
- [2] Malinowski M, Leon J I, Abu-Rub H. Solar Photovoltaic and Thermal Energy Systems: Current Technology and Future Trends[J]. Proceedings of the IEEE, 2017,105(11):2132-2146.
- [3] Haque M M, Wolfs P. A review of high PV penetrations in LV distribution networks: Present status, impacts and mitigation measures[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,62:1195-1208.
- [4] Mahmud N, Zahedi A. Review of control strategies for voltage regulation of the smart distribution network with high penetration of renewable distributed generation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,64:582-595.
- [5] Eltigani D, Masri S. Challenges of integrating renewable energy sources to smart grids: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015,52:770-780.
- [6] 赵勇强. 新时代的可再生能源发展形势与政策[J]. 能源, 2018(Z1):124-126.
- [7] Ricciardi T R, Petrou K, Franco J F, et al. Defining Customer Export Limits in PV-Rich Low Voltage Networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(1):87-97.
- [8] 李宏仲, 汪瑶, 胡哲晟, 等. 双碳背景下配电网对多元接入体的承载能力评估[J]. 电网技术, 2021:1-12.
- [9] 张文木. 21世纪气候变化与中国国家安全[J]. 太平洋学报, 2016,24(12):51-63.
- [10] 郎咸梅, 隋月. 全球变暖 2℃情景下中国平均气候和极端气候事件变化预估[J]. 科学通报, 2013,58(08):734-742.
- [11] 吴聪, 唐巍, 白牧可, 等. 基于能源路由器的用户侧能源互联网规划[J]. 电力系统自动化, 2017,41(4):20-28.
- [12] Bayer B, Matschoss P, Thomas H, et al. The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids[J]. Renewable Energy, 2018,119:129-141.
- [13] 王晟嫣, 周鹏程, 陈威成. 光伏扶贫地区就地消纳能力评估研究[J]. 山东电力技术, 2020,47(04):1-4.
- [14] Hashemi S, Østergaard J. Methods and strategies for overvoltage prevention in low

- voltage distribution systems with PV[J]. IET Renewable Power Generation, 2017,11(2):205-214.
- [15] Mohammadi P, Mehraeen S. Challenges of PV Integration in Low-Voltage Secondary Networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(1):525-535.
- [16] 蔡永翔, 唐巍, 徐鸥洋, 等. 含高比例户用光伏的低压配电网电压控制研究综述 [J]. 电网技术, 2018(01):220-229.
- [17] 黄伟, 刘斯亮, 翁应祺, 等. 基于光伏并网点电压优化的配电网多时间尺度趋优控制[J]. 电力系统自动化, 2019,43(03):92-107.
- [18] Alinjak T, Pavić I, Stojkov M. Improvement of backward/forward sweep power flow method by using modified breadth - first search strategy[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017,11(1):102-109.
- [19] 唐巍, 李天锐, 张璐, 等. 基于三相四线制最优潮流的低压配电网光伏-储能协同控制[J]. 电力系统自动化, 2020,44(12):31-40.
- [20] 路畅, 郭力, 柴园园, 等. 含高渗透分布式光伏的增量配电网日前优化调度方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(18):90-98.
- [21] 苏赞加. 浅谈国内外分布式光伏发电的发展现状 [J]. 科技致富向导, 2014(20):150-218.
- [22] 郑磊, 陈醒. CNREC:中国可再生能源展望[J]. 国际融资, 2018(12):66-69.
- [23] 刘迎. 国内外分布式光伏发电的发展现状分析[J]. 现代国企研究, 2015(16):117.
- [24] 胡泊, 辛颂旭, 白建华, 等. 我国太阳能发电开发及消纳相关问题研究[J]. 中国电力, 2013,46(01):1-6.
- [25] 李旭光. 微电网的建模、仿真及运行特性分析[D]. 天津大学电力系统及其自动化, 2009.
- [26] 明言. 中国西北地区光伏发电的环境影响评估[J]. 时代金融, 2016(27):26-27.
- [27] 万庆祝, 王鑫. 户用光伏微电网优化运行的研究新进展[J]. 电气工程学报, 2016(11):33-39.
- [28] 朱相丽. 世界光伏发电产业的现状及原材料的发展趋势 [J]. 新材料产业, 2008(11):34-39.
- [29] 丁明, 刘盛. 基于遗传算法的多个光伏电源极限功率计算 [J]. 电网技术, 2013,37(04):922-926.
- [30] 王璟, 蒋小亮, 杨卓, 等. 光伏集中并网电压约束下的准入容量与电压波动的评估方法[J]. 电网技术, 2015,39(09):2450-2457.
- [31] El-Shimy M, Sharaf A, Khairy H, et al. Reduced-order modelling of solar-PV

- generators for small-signal stability assessment of power systems and estimation of maximum penetration levels[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2018,12(8):1838-1847.
- [32] Hoke A, Butler R, Hambrick J, et al. Steady-State Analysis of Maximum Photovoltaic Penetration Levels on Typical Distribution Feeders[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013,4(2):350-357.
- [33] 薛蕾, 井天军, 陈义, 等. 配电网光伏消纳能力定界模拟与消纳方案综合择优[J]. 电网技术, 2020,44(03):907-916.
- [34] 刘纯, 屈姬贤, 石文辉. 基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(10):3134-3144.
- [35] 朱俊澎, 施凯杰, 李强, 等. 考虑输电网潮流约束的时序生产模拟及新能源消纳能力评估[J]. 电网技术, 2021:1-9.
- [36] 田鑫, 张健, 李雪亮, 等. 基于时序运行模拟的山东电网光伏发电消纳能力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(08):34-43.
- [37] 戴慧雯. 高渗透率分布式光伏消纳评估方法研究[D]. 浙江工业大学, 2020.
- [38] 张诗杭. 高渗透率光伏并网消纳能力研究[D]. 华北电力大学, 2021.
- [39] 董昱, 董存, 于若英, 等. 基于线性最优潮流的电力系统新能源承载能力分析[J]. 中国电力, 2021:1-7.
- [40] 董逸超, 王守相, 闫秉科. 配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J]. 电网技术, 2019,43(07):2258-2266.
- [41] 郭彬, 张源渊, 贾俊青, 等. 基于蒙特卡洛的配电网光伏消纳能力评估[J]. 浙江电力, 2021,40(06):8-14.
- [42] 姚宏民, 杜欣慧, 李廷钧, 等. 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. 电网技术, 2019,43(02):462-469.
- [43] 赵波, 韦立坤, 徐志成, 等. 计及储能系统的馈线光伏消纳能力随机场景分析[J]. 电力系统自动化, 2015,39(09):34-40.
- [44] Ding F, Mather B. On Distributed PV Hosting Capacity Estimation, Sensitivity Study, and Improvement[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017,8(3):1010-1020.
- [45] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(06):1578-1587.
- [46] Rylander M, Smith J, Sunderman W. Streamlined Method for Determining Distribution System Hosting Capacity[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016,52(1):105-111.

- [47] Monte Carlo Simulation-Based Probabilistic Assessment of DG Penetration in Medium Voltage Distribution Networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015,64:852-860.
- [48] Torquato R, Salles D, Oriente Pereira C, et al. A Comprehensive Assessment of PV Hosting Capacity on Low-Voltage Distribution Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018,33(2):1002-1012.
- [49] Dubey A, Santoso S. On Estimation and Sensitivity Analysis of Distribution Circuit's Photovoltaic Hosting Capacity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(4):2779-2789.
- [50] Koutroumpezis G N, Safianni A S. Optimum allocation of the maximum possible distributed generation penetration in a distribution network[J]. Electric Power Systems Research, 2010,80(12):1421-1427.
- [51] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J]. 电网技术, 2016,40(08):2273-2280.
- [52] 周良学, 张迪, 黎灿兵, 等. 考虑分布式光伏电源与负荷相关性的接入容量分析[J]. 电力系统自动化, 2017,41(04):56-61.
- [53] 陶琼, 王德顺, 叶季蓄, 等. 考虑储能配置模式的多数据源融合分布式光伏发电并网接纳分析方法[J]. 高电压技术, 2018,44(04):1093-1098.
- [54] 王一波, 许洪华. 基于机会约束规划的并网光伏电站极限容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010,30(22):22-28.
- [55] 蒋平, 严栋, 吴熙. 考虑风光互补的间歇性能源准入功率极限研究[J]. 电网技术, 2013,37(07):1965-1970.
- [56] 孙保功, 叶鹏, 邵广惠, 等. 基于非线性内点方法的风电接入能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2010,30(10):23-28.
- [57] 邢海军, 程浩忠, 曾平良, 等. 基于二阶锥规划的间歇性分布式电源消纳研究[J]. 电力自动化设备, 2016,36(06):74-80.
- [58] 徐岩, 闫少波, 史迪锋. 基于近似线性规划法的弱电网光伏穿透功率极限计算[J]. 电力自动化设备, 2014,34(04):128-132.
- [59] Ayres H M, Freitas W, Almeida M D, et al. Method for determining the maximum allowable penetration level of distributed generation without steady-state voltage violations[J]. Generation Transmission & Distribution Iet, 2010,4(4):495-508.
- [60] 文升, 顾洁, 程浩忠, 等. 分布式电源的准入容量与优化布置的实用方法[J]. 电力自动化设备, 2012,32(10):109-114.

- [61] 刘健, 黄炜. 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下的可接入容量分析[J]. 电网技术, 2015,39(02):299-306.
- [62] 周任军, 黄灵资, 王靓, 等. 基于风险和条件风险方法的光伏电站并网极限容量计算[J]. 电力自动化设备, 2012,32(06):1-5.
- [63] Al-Saadi H, Zivanovic R, Al-Sarawi S F. Probabilistic Hosting Capacity for Active Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017,13(5):2519-2532.
- [64] Abad M S S, Ma J, Zhang D, et al. Probabilistic Assessment of Hosting Capacity in Radial Distribution Systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018,9(4):1935-1947.
- [65] Wang S, Chen S, Ge L, et al. Distributed Generation Hosting Capacity Evaluation for Distribution Systems Considering the Robust Optimal Operation of OLTC and SVC[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016,7(3):1111-1123.
- [66] Chen X, Wu W, Zhang B. Robust Capacity Assessment of Distributed Generation in Unbalanced Distribution Networks Incorporating ANM Techniques[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018,9(2):651-663.
- [67] Chen X, Wu W, Zhang B, et al. Data-Driven DG Capacity Assessment Method for Active Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(5):3946-3957.
- [68] Liu X, Aichhorn A, Liu L, et al. Coordinated Control of Distributed Energy Storage System With Tap Changer Transformers for Voltage Rise Mitigation Under High Photovoltaic Penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012,3(2):897-906.
- [69] Tonkoski R, Lopes L A C, El-Fouly T H M. Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011,2(2):139-147.
- [70] 蔡永翔, 唐巍, 张璐, 等. 基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J]. 电力系统自动化, 2017(13):133-141.
- [71] 吕清洁, 王韶, 刘庭磊. 含分布式发电的配电网有功-无功综合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012,40(10):71-76, 83.
- [72] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功 - 无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(16):2575-2583.
- [73] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于有功 - 无功协调优化的主动配电网过电压预防控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014,38(09):184-191.

- [74] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2014,38(15):58-64.
- [75] 曹益奇, 白晓清, 王婷婷, 等. 考虑及分布式电源随机出力的三相配电网可调鲁棒无功优化[J]. 电网技术, 2018,42(04):1217-1225.
- [76] 董雷, 明捷, 蒲天骄, 等. 主动配电网三相电压优化及校正控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017,37(01):35-40.
- [77] 赵晋泉, 刘绪, 林昌年, 等. 单相光伏大量接入的三相不平衡配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2016,40(13):13-18.
- [78] 王吉彪, 陈启宏, 刘莉, 等. 面向微电网三相电压不平衡补偿的逆变器并网控制[J]. 电力系统自动化, 2017,41(08):38-44.
- [79] 赵晋泉, 范晓龙, 高宗和, 等. 含分布式电源的三相不平衡配电网连续潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2015,39(09):48-53.
- [80] Liu J, Gao H, Zhao M A, et al. Review and prospect of active distribution system planning[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2015,3(4):457-467.
- [81] 戴月, 刘明波, 王志军, 等. 高光伏渗透配电网分散式最优潮流的割平面一致性算法[J]. 电力系统自动化, 2018,42(15):2-10.
- [82] 李海英, 薛琢成, 张巍. 考虑电压稳定的最优潮流二阶锥规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018,30(12):33-39.
- [83] 顾承红, 艾芊. 考虑电压稳定约束的最优潮流[J]. 电网技术, 2006(16):29-34.
- [84] 卢艺, 戴月, 马伟哲, 等. 含分布式电源和储能装置的配电网分散式动态最优潮流[J]. 电网技术, 2019,43(02):434-444.
- [85] Martins V F, Borges C L T. Active Distribution Network Integrated Planning Incorporating Distributed Generation and Load Response Uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011,26(4):2164-2172.
- [86] Niknam T, Narimani M R, Aghaei J, et al. Improved particle swarm optimisation for multi-objective optimal power flow considering the cost, loss, emission and voltage stability index[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2012,6(6):515-527.
- [87] 刘斌, 刘锋, 梅生伟, 等. 基于二阶锥优化的含有载调压变压器主动配电网最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2015,39(19):40-47.
- [88] 杨秀媛, 刘小河, 张芳, 等. 大型太阳能并网发电模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(S1):19-22.
- [89] 罗建春, 鬼勤, 罗洪, 等. 基于 LVQ-GA-BP 神经网络光伏电站出力短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2014,42(13):89-94.

- [90] 杨锡运, 刘欢, 张彬, 等. 组合权重相似日选取方法及光伏输出功率预测[J]. 电力自动化设备, 2014(09):118-122.
- [91] 阮启运, 覃惠新, 张青松, 等. 考虑季节性分时电价策略对分布式光伏消纳的影响[J]. 电工技术, 2018(03):16-19.
- [92] 王治华, 杨晓梅, 李扬, 等. 气温与典型季节电力负荷关系的研究[J]. 电力自动化设备, 2002(03):16-18.
- [93] 宁光涛, 谢海鹏, 别朝红, 等. 海南电网分布式光伏消纳能力评估[J]. 南方电网技术, 2015,9(05):59-65.
- [94] 付学谦, 陈皓勇, 刘国特, 等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(25):4270-4276.
- [95] 崔勇, 程云龙, 高鑫. 基于综合发电收益的分布式光伏系统规划研究[J]. 水电能源科学, 2018,36(01):208-211.
- [96] 寇凌峰, 徐毅虎, 侯小刚. 光伏扶贫电站应用模式及准入容量优化规划[J]. 供用电, 2017,34(10):14-18.
- [97] 孙一凡, 张蕾琼, 刘达. 农村地区分布式光伏接入消纳能力研究[J]. 浙江电力, 2017,36(11):45-50.
- [98] 赵霞赵成勇贾秀芳李庚银. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. 电网技术, 2005(06):11-16.
- [99] 徐鹏, 杨胜春, 李峰, 等. 基于层次分析和变权重机制的电网安全指标计算及展示方法[J]. 电力系统自动化, 2015,39(08):133-140.
- [100] 牟婷婷, 陆微, 王兰君, 等. 基于主成分分析的用电模式稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2017,41(19):59-65.
- [101] 徐长宝, 王玉磊, 赵立进, 等. 基于信息趋势预测和组合赋权的智能变电站继电保护系统状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2018,38(01):162-168.
- [102] 徐添锐, 丁涛, 李立, 等. 适应三相不平衡主动配电网无功优化的二阶锥松弛模型[J]. 电力系统自动化, 2021,45(24):81-88.