

[微电网]

基于分布式智能控制的光伏微电网动态功率平衡研究

文/于延庆

国电投山东生态能源有限公司

随着全球能源结构的转型和可再生能源技术的发展，光伏微电网作为一种新兴的分布式能源系统，受到了广泛关注。光伏微电网能够在局部地区生成和消费电力，有效地减少能源传输损失，并提高能源使用的灵活性与安全性。深入研究基于分布式智能控制的光伏微电网动态功率平衡策略，探讨需求侧管理、实时监控、智能控制算法及储能系统集成的应用，并通过技术测试验证了所提策略的有效性与实用性。

在可再生能源领域，特别是在光伏微电网的配置和运行中，动态功率平衡问题日益凸显，成为限制其广泛应用和效能提升的主要难题之一。微电网是一种能在电力系统中进行自给自足的小型电网，其在灾难恢复、节能减排和能源效率方面显示出独特的优势。因此，开发有效的动态功率平衡策略对于实现其商业化应用和技术进步具有重要意义。基于分布式智能控制的动态功率平衡技术通过集成先进的计算模型、优化算法和实时数据处理能力，能够对微电网内的能源流进行智能调度和管理，以适应功率需求的实时变化，从而优化光伏微电网的性能。

光伏微电网的基本概念

光伏微电网是一种创新的能源网络系统，主要由光伏发电单元、能源存储设备、负载、控制以及管理系统组成，其设计宗旨在于实现小范围内的能源自给自足和优化资源配置，尤其在偏远地区或电网连接不便的区域显示出其独特优势。

在光伏微电网的运行过程中，如何维持系统内部的动态功率平衡，即实时调节与配合发电量与负载需求之间的平衡，成为确保系统运行效率和稳定

性的核心任务。这一任务的完成依赖于高度发达的分布式智能控制系统，该系统能够监控各个节点的能源流动，实时分析数据，预测功率需求趋势，并据此调整发电和储电策略，以优化功率分配，减少能量浪费，并通过先进的算法对可能出现的供需波动进行缓冲，确保电网的稳定性。此外，分布式智能控制系统还支持远程监控与故障诊断，增强光伏微电网的可管理性与可维护性。

分布式智能控制系统的设计原理

分布式智能控制系统是确保动态功率平衡光伏微电网的核心技术。该系统的设计原理基于先进的计算与通信技术实现对微电网中各个独立单元的实时监控和控制，包括光伏发电单元、储能设备、负载以及其他能源资源，以此提高系统的整体效能和可靠性。在分布式智能控制系统中，每个节点装备有智能传感器和执行器，能够收集各种实时数据如电压、电流、功率和温度等，并通过无线或有线网络将数据传输至中央控制单元。中央控制单元运用高效的数据处理算法对接收到的信息进行分析，预测短期内的功率需求和供应情况。依据这些信息进行决策制定，如调整发电输出、控制储能设备的充

放电行为以及优化负载管理。此外，分布式智能控制系统还应具备自我学习的能力，通过机器学习算法分析历史数据和实时反馈，不断优化控制策略以适应环境变化和系统动态，这种自适应能力是实现微电网高度自主和效率优化的关键。

基于分布式智能控制的光伏微电网动态功率平衡策略

1. 需求侧管理与响应策略

需求侧管理与响应策略在光伏微电网中的动态功率平衡中扮演着至关重要的角色，其核心目标是通过调节电网需求端的电力使用模式，以适应供给侧的变化和容量限制，从而实现整个系统的能效优化和经济运行。在光伏微电网的环境下，这一策略尤为重要，因为太阳能发电的波动性和不可预测性要求系统具备高度的适应性和响应能力。通过实施需求侧管理，可以动态调整负载运行，优化负载消耗，减少在光伏发电低效时段的电力需求，或者在光伏输出高峰时段增加可控负载的消耗，以此对冲光伏发电的不连续性。此策略不仅涉及到智能家居设备的自动调节，如空调器、热水器和照明系统的智能控制，也包括工业和商业负载的需求响应，通过价格信号或直接控制指令来激励用户在特定时段内调整电力使用。实施需求侧管理策略需要依赖于高度发达的信息和通信技术，以确保信息的实时传递和处理的精确性。微电网中的分布式智能控制系统通过部署在各个节点的智能传感器和计量设备，持续监测能源使用情况和外部环境变化，利用高级数据分析和机器学习算法预测短期内的能源需求和供应状况，并自动调整控制策略以响应预测结果。

2. 实时监控与预测技术

实时监控与预测技术是光伏微电网中实现动态功率平衡的核心技术之一，其关键在于能够准确地监测和预测光伏发电和负载需求的变化，从而优化能源分配和管理。此技术通常依赖于一系列复杂的算法和模型，其中一种广泛应用的是基于时间序列分析的预测模型，特别是自回归滑动平均（ARIMA）模型。这一模型在处理时间序列数据，尤其是具有季节性变化的数据时表现出较高的准确度和可靠性。

对此，ARIMA模型的一般形式可以表示为

$$\text{ARIMA}(p,d,q) \quad (1)$$

式中， p 为自回归项的阶数； d 为差分阶数； q 为滑动平均项的阶数。

这种模型能够通过调整这三个参数来适应特定的数据结构和特征，以提供最佳的预测效果。

在具体应用中，需要确定模型参数 p 、 d 、 q 的最优值，这通常通过观察数据的自相关函数（ACF）和偏自相关函数（PACF）来实现

$$\text{ACF}(k) = \frac{\sum_{t=k+1}^T (X_t - \bar{X})(X_{t-k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^T (X_t - \bar{X})^2} \quad (2)$$

$$\text{PACF}(k) = \text{Corr}(X_t, X_{t-k} | X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-k+1}) \quad (3)$$

通过这两个函数，可以识别出数据中的季节性和趋势性，从而为差分和模型阶数选择提供依据。

确定模型参数后，ARIMA模型便可以结合历史数据来预测未来一段时间内的功率需求和发电量

$$X_t = \alpha + \beta_1 X_{t-1} + \beta_2 X_{t-2} + \dots + \beta_p X_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t \quad (4)$$

式中， α 为常数项； β_i 为自回归系数； θ_i 为滑动平均系数； ϵ_t 为误差项。

3. 分布式智能控制算法

分布式智能控制算法在光伏微电网中的动态功率平衡中起着至关重要的作用，主要负责优化各个生成单元与负载之间的能量流，确保系统整体的稳定性与效率。在这种控制体系中，经常采用基于模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）的策略。该策略通过预测未来的功率需求和发电量，计算控制动作以最小化成本函数，从而动态调整系统运行状态以适应实时变化的环境和负载条件。

MPC的基本表达可以描述为

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k) \quad (5)$$

式中， x_k 为在时间步长 k 的系统状态向量； u_k 为控制输入； Q 和 R 为权重矩阵，用以调整状态和控制输入的重要性； N 为预测范围。

控制问题的目标是最小化上述成本函数，其中系统状态的更新遵循动态模型

$$x_{k+1} = A x_k + B u_k + w_k \quad (6)$$

式中， A 和 B 分别为系统的状态和控制矩阵； w_k 为模型不确定性或外部扰动。

通过求解这一优化问题，可以得到一系列最优控制输入 u_k^* ，这些输入预计将使系统达到或保持在

期望的运行状态。

控制输入的计算需要通过在线优化实现，这通常涉及求解以下形式的优化问题

$$\min_u J.s.t.x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \tag{7}$$

$$u_{\min} \leq u_k \leq u_{\max} \tag{8}$$

$$x_{\min} \leq x_k \leq x_{\max} \tag{9}$$

式中， $u_{\min}$ 和 $u_{\max}$ 为控制输入的限制； $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 为状态变量的限制。

这些限制确保系统操作的安全性和可靠性。

4. 储能系统的集成与管理

在光伏微电网中，储能系统的集成与管理是实现动态功率平衡的关键组成部分。通过高效的储能系统，可以在光伏发电量高于负载需求时储存多余的电能，并在需求超过光伏发电产出时释放储存的能量，从而维持电网的稳定运行。这种系统的管理依赖于先进的分布式智能控制技术，确保能量的最优存取和功率平衡。一天中不同时间点的光伏发电量、负载需求、储能系统中的储存能量以及能量的充放电情况见表1。

表1 储能系统管理数据

时间	光伏发电量 / kW	负载需求 / kW	储存能量 / (kW·h)	能量充放电 / (kW·h)
6:00	0	30	50	-5
9:00	25	40	45	-10
12:00	50	55	35	-15
15:00	75	60	20	+10
18:00	50	50	30	+15
21:00	25	40	45	+10
24:00	0	35	55	+10

表1反映了光伏微电网内部一天中能量流动与调配的典型模式，显示不同时间段内储能系统如何调节光伏发电与负载之间的不匹配。通过分析这些数据，可以深入理解储能系统在动态功率平衡中的作用。例如在太阳能发电不足以满足即时负载时，如何从储能系统中释放能量以补充差额，保证电网的连续供电和系统的稳定。

技术应用测试

在本研究中，为确保实验数据的准确性与实验设计的适应性，所采用的数据集通过模拟光伏微电网运行参数生成的，是专门为本实验设计和模拟而生成的。使用这种方法的主要目的是创建一个控制

环境，其中的变量可以被精确地控制和调整，以模拟不同的运行场景和测试光伏微电网中的动态功率平衡策略。数据集的使用主要是针对系统功能测试，即检验分布式智能控制系统在各种设定条件下的性能。整个数据集包含了1 440条数据记录，这些数据覆盖了24 h的每分钟。测试过程中，整个数据集被用来进行单一连续的测试，而没有进行多次重复或分组，以模拟实际操作中微电网连续24 h的性能。测试指标包括功率平衡效率、系统响应时间和能效比。功率平衡效率指的是系统在调整功率输出与匹配功率需求时的效率；系统响应时间是指系统从检测到负载变化到响应该变化所需的时间；能效比则衡量的是系统运行消耗能量对于完成任务的能量之比，这是评估系统经济性的重要指标。测试数据见表2。

表2 测试数据

测试编号	功率平衡效率 (%)	系统响应时间 /s	能效比
Test 1	90.62	4.31	1.20
Test 2	94.66	4.12	1.39
Test 3	93.12	5.73	1.37
Test 4	92.19	5.20	1.24
Test 5	89.09	5.42	1.24

这些结果揭示了系统在不同测试中的表现，反映系统的稳定性和调节能力。功率平衡效率在所有测试中均保持在89%以上，最高达到94.66%，表明系统能够高效地管理和调整发电与消费之间的不匹配。系统响应时间介于4.12~5.73 s之间，足以证明系统在检测到负载变化后能迅速做出反应，这对于维护电网的稳定性至关重要。能效比则介于1.20~1.39之间，显示出系统在执行功率平衡任务时的能源使用效率。

结束语

本文通过对分布式智能控制技术在光伏微电网中的应用进行系统研究，从理论和实践出发，深入分析该技术在动态功率平衡中的效能和潜力。研究聚焦于分布式控制策略的设计原理、关键技术问题以及实际应用中的表现和挑战，旨在为光伏微电网的设计者、运营者和政策制定者提供科学、有效的指导建议，推动光伏微电网技术在更广泛领域中的应用，实现能源生产的高效化和绿色化。EA

(收稿日期：2024-09-29)