

[微电网]

微电网中源荷储无通信协调控制及策略

文/吴丹¹ 琚军² 戚碧云² 向东旭¹ 王勇² 孙林²

1. 国网浙江省电力有限公司常山县供电公司；2. 国网浙江省电力有限公司衢州供电公司

微电网能够有效发挥以往分布式电源发电的优势，还能提高可再生能源的利用率，并保证供电的安全可靠性。实现微电网中源荷储无通信协调控制，对于提高微电网运行的安全水平，节约成本，推动微电网可持续发展具有十分重大的现实意义。基于此，对微电网中源荷储无通信协调控制及策略进行深入探讨，以期对相关人员进行有效参考。

微电网具有重大工程价值，在实际运行中更多基于状态信息采集、通信，实现集中优化控制。但在微电网中要想实现通信全覆盖，需要增加投入资金，提高通信系统使用性能，促进各类信息数据高速进行实时传输。在此过程中，通信系统受到相关因素的影响，发生各类故障问题时，会带来更多安全隐患，不利于微电网稳定运行。因此，对微电网中源荷储无通信协调控制进行研究显得尤为重要。

源荷储协调运行研究

为进一步提升微电网中新能源的整合效果，相关学者普遍基于通信网络，合理构建信息决策层，并结合多种微元在不同外部环境中的输出特性，进行统筹规划，从而获得最佳的协调控制策略。

微电网集中控制方式，普遍以高速通信网络为基础，并利用光纤以太网、Modbus协议方式，充分发挥监控系统的应用价值，更好进行信息传递。但是光纤成本高，Modbus协议方式在实际应用中面对海量数据的传递存在较多弊端。同时，两者在实际微电网运行过程中，都需要借助信道的辅助，整体拓扑结构复杂，缺乏良好的可扩展性。此外，微电网运行中借助通信系统进行控制，在一定程度上提高了优化控制质量，解决分布式电源的相关协调运

行问题，但是在很大程度上增加数据通信传输系统的运行压力。而通信线路在建设和运行中，产生更多费用支出，并且受到多种因素的影响，难以有效改造原有的线路。由于现有研究中对微电网中源荷储无通信协调控制及策略鲜见报道，因而对其研究具有重要的价值和意义。

微电网的电源模型

1. 风力发电机功率模型

风力发电机在实际应用过程中，能够将风能有效转变为电能，通过风力带动发电机轴旋转，提升发电机转速。在此过程中，主要借助叶片获得风能，并通过发电机转动，对风向进行针对性调节，并产生电能。风力发电机的发电功率模型为

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho S V_s^3 C_p \quad (1)$$

式中， P_{wt} 为风机发电功率，kW； ρ 为空气密度， kg/m^3 ； S 为叶轮扫掠面积， m^2 ； V_s 为风速， m/s ； C_p 为风能利用系数。

通过式（1）可知，风机的输出动力受到其自身参数、风速的影响，而最主要的是风能的改变。

2. 光伏发电系统功率模型

光伏发电系统在实际应用中能够将太阳能有效

转变为电能，主要通过光电作用有效生产电力。光伏发电系统的构成如图1所示，其中光电池是该系统的主要构成部分，在光伏发电系统运行中发挥着十分重要的作用。

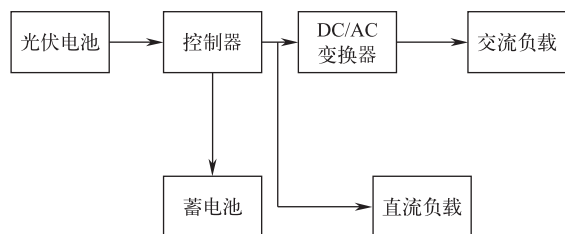


图1 光伏发电系统的构成

太阳能电池在光伏发电中是十分关键的环节，其输出的能量受到光电元件电压的影响，并且对太阳能的转化效果受到光照强度、温度和电源特性产生决定性的影响。通过相关研究分析，照明条件不同的情况下，光伏发电系统的输出功率受到照射强度的增大而持续增大；在光照条件不同时，温度越高，该系统的输出能量峰值越低，最高输出功率值越低。光电电池变化电力输出的数学模型为

$$P_{pv} = P_m \frac{G}{G_{stc}} (1 + K_w (T_d - T_r)) \quad (2)$$

式中， G 为光照强度， W/m^2 ； T 为光伏电池的温度， $^{\circ}C$ ； P_{pv} 为光伏电池输出功率， kW ； G_{stc} 为标准条件下光照强度， W/m^2 ； P_m 为标准条件下的电力最大输出功率， kW ； T_r 为参考的温度， $^{\circ}C$ ； K_w 为功率温度系数。

3. 蓄电池功率模型

蓄电池为常见的储能设备，在实际应用中具有较高的安全可靠性和电能质量较高，并具备环保的优势，主要包含充电、放电模式。蓄电池在实际运行过程中，需要保证每次消纳的电量小于上一次电池最大容量和剩余容量的差。蓄电池充电模型为

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-y) + \eta_{ch} \frac{P_{ch} \Delta T}{ESS} \quad (3)$$

蓄电池放电模型为

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-y) - \frac{P_{dis} \Delta T}{ESS \eta_{dis}} \quad (4)$$

式中， $SOC(t)$ 为 t 时刻蓄电池的电池容量， $W \cdot h$ ； y 为自放电率； ESS 为储能系统的容量， $W \cdot h$ ； P_{ch} 为蓄电池充电功率， kW ； P_{dis} 为蓄电池放电功率，

kW ； η_{ch} 为蓄电池的充电效率； η_{dis} 为蓄电池的放电效率。

光伏电池功率控制

光伏电池在不同条件下的功率输出存在一定差异性。为有效提高光伏输出功率，需要相关人员采取多种策略，全面精准控制其运行点。对光伏电池的输出功率进行分析的过程中，结合光伏输出特性曲线进行分析，其峰值具有唯一性。因此，应当为最终光伏电池的最大功率点，从而发挥新能源出力的最大价值。在此过程中，光伏最大功率点跟踪技术具有显著的应用优势，能够将光伏电池输出阻抗、负载阻抗大小进行等值匹配。在光伏最大功率点跟踪控制时，利用电导增量法，有效改进功率寻优的步长，从而更加快速、准确地找到最大功率点。对微增量的变化值大小进行针对性动态调整，构建小型光伏系统仿真模型，全面验证光伏最大功率点跟踪控制效果。通过实践分析发现，调节搜索步长，促进其在光伏最大功率点附近搜索步长减小，进一步保证小型光伏系统的准确度。

通常情况下，光伏系统运行点在光伏最大功率点位置并向电网馈电，能够发挥太阳能资源的最大应用价值。但是，微电网具有较强的独立性，对功率的接受存在一定缺陷。当微电网运行中，对于最大功率，线路母线不能全部消纳时，需要深入研究光伏系统的降功率运行特性。

光伏仿真模型如图2所示，在Boost升压电路上，光伏PV向负载送电，系统寻找光伏最大功率点，通常会对电路中高频开关的占空比进行针对性调整，进而有效追踪定功率值。在此过程中，通过定功率控制模块，针对性调整占空比，有效降低或者增高电压，并有效实现光伏系统降功率控制。

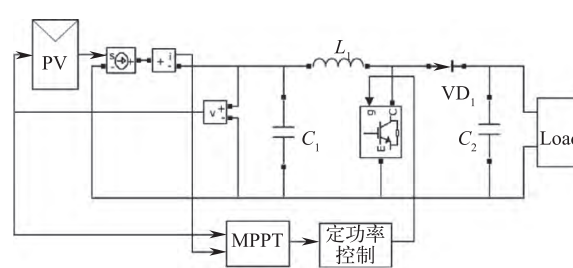


图2 光伏仿真模型

在光伏系统降功率控制的过程中，光伏运行到最大功率点的情况下，其外输出功率达到最大。当光伏系统频率不大于50 Hz的情况下，针对性提高其他单元的有功输出量，使得储能有功功率输出降低，从而有效提升其频率，达到目标值。光伏系统频率不小于50 Hz时，对运行点电压进行针对性调整，能够获得良好的降功率控制效果。

对光伏系统降功率控制进行仿真分析的过程中，利用电导增量法，科学搭建仿真模型，并针对性设计电路参数。同时通过左移、右移的方式，合理调整光伏系统降功率运行点，明确功率值 $P1$ ，并设定系统仿真时间为1 s，光伏输出最大功率达到2 800 W，降功率运行点为2 000 W，运行时间为1 s。在光伏系统运行中，通过电导增量法，确定最大功率点，明确最大功率在2 800 W左右。

源荷储无通信协调运行

1. 系统框架分析

微电网在实际运行中，对电力系统的运行安全和质量具有较高要求，需要相关人员结合实际情况和需求，针对性设计独立的通信网络，确保通信网络系统能够有效支持大量数据的传输。但是，目前电力通信建设的过程中，容易受到多种外部因素的影响，降低其利用效率，并且在大规模电力设备出现各类故障的情况下，相关技术和设备无法快速响应，存在电网运行和电力通信的协调问题。通常情况下，电网通信系统结构较为繁杂，在实际构建过程中，成本较高，从而给微电网的建设和运行带来较大的经济负担。此外，当电网通信网络建设的过程中存在一些问题时，难以满足微电网运行安全质量的需求，不符合其经济性、灵活性的要求。同时，相关企业在通信系统建设和使用过程中缺乏科学、统一的标准，导致系统之间的兼容性较差。在此过程中，电网持续建设和发展，逐渐提高了其复杂度，对电力系统的运行状态提出全新的高要求，使得原有的网络无法有效支持海量数据的通信传输。

在微电网中实现源荷储无通信协调控制，有效摒弃相关物理连接，在实际运行过程中，对相关任务指令的收集和下发无须通过中央控制层，消除不同单元之间的通信连接线。同时，结合采集

的并网节点位置的电气量参数，需要不同节点单元的检测模块，结合实际情况，针对性选定控制策略，进一步保证微电网安全稳定地运行。而实现微电网无通信运行的过程中，对等控制是十分关键的手段之一。电力系统中，保持不同发电单元在微电网中的控制地位一致，不存在相应的从属之分，有效进行下垂控制，进一步保证电网运行的稳定性。

不同单元逆变器控制是微电网中源荷储无通信控制策略的核心。以孤岛微电网为例，主要通过下垂控制的分布式发电单元，针对性调整微电网电压和频率，合理控制电压和频率波动。结合相关技术规定进行分析，20 kV及以下的微电网在实际运行中，电力系统的电压偏差应当严格控制在标称电压的 $\pm 7\%$ ，频率保持在49.5~50.2 Hz之间。在微电网运行过程中，系统频率为50.3~50.5 Hz的情况下，基于下垂控制的分布式电源能够有效降低有功输出能力。当微电网中系统运行在质量可控区内，其控制目标主要是发挥新能源的最大应用价值；而在紧急调整区进行运行的情况下，其控制目标为微电网更加安全稳定地运行。

下垂控制单元在负荷需求不断波动的情况下，对其进行及时响应，从而造成频率呈现出上下波动的现象。负荷相对较小时，额定功率值与有功实际消耗量相比较小，系统内有功冗余度过剩，从而频率提升。结合实际情况进行分析，频率合理波动区间设置为49.5~50.2 Hz之间，其他频率范围内属于紧急调整区。微电网中源荷储无通信协调控制实现的过程中，负荷波动对系统具有一定的影响，在频率分区转移点的位置，反复切换源荷储无通信协调控制手段，在一定程度上给协调控制的稳定性带来不良影响。因此，在源荷储无通信协调控制的过程中，在频率分区临界点的位置，适当增加静止保持区。在微电网运行的过程中，系统频率转移到静止保持区的情况下，源荷储无通信协调控制策略保持固定；反之，需要系统结合频率转移新区间的实际情况，针对性调整协调控制策略。增设静止保持区，能够有效切换分区控制策略，提高整个系统运行的安全性。对微电网中系统频率区间科学进行区域划分，进一步提高源荷储无通信控制策略研究的针对性和有效性，见表1。

表1 频率波动区间及电源控制策略配合
(单位: Hz)

频率波动区间	区域名称
$f \geq 0.25$	紧急调整区
$50.15 \leq f < 50.25$	协调控制策略保持区
$49.55 \leq f < 50.15$	电能可控区
$49.45 \leq f < 49.55$	协调控制策略保持区
$f < 49.5$	紧急调整区

2. 无通信光储协调控制策略

下垂控制在对等控制微电网中，能够在无数据通信的状态下，有效进行功率的协调分配，使得多电源协调配合，保持母线电压的稳定性。但是，在下垂控制的过程中，容易受到相关因素的影响，出现瞬时功率不平衡等现象，进而产生一系列电网功率超调、振荡等各类问题。对于负荷波动，不同控制单元进行协调控制，使得目标输出功率之和不小于微电网运行中所需的调节量，从而利用科学合理的功率调节，优化分配控制策略。

通常情况下，光伏最大功率并网的情况下，前级功率追踪模块紧跟光伏最大功率点状态，从而使光伏新能源功率有效进行并网输出。在此过程

中，光伏输出功率和负荷需求相比较高的情况下，储能当作平衡节点，难以对微电网运行的安全性进行有效控制，使得电力系统电压、频率缺乏针对性的支撑单元调节，这就需要进行光伏电池的降功率控制。因此，对无通信光储协调控制策略进行研究的过程中，进一步优化光伏输出控制系统的频率状态。

对光伏参与频率稳定控制仿真分析的过程中，根据上述光伏最大功率点跟踪方式，基于电导增量法，合理搭建光储协调控制仿真模型，如图3所示，并优化设计电路参数。同时，分析光伏参与系统频率调节的原理，借助相应的仿真工具，提高模型搭建的有效性，从而初步实现微电网中系统在多种运行状态下，不断优化光伏参与频率。同时，实现目标值更好地最终50 Hz额定频率点。结合定功率控制的策略，能够更加高效地将光伏功率输出量，合理控制在特定范围之内。当光伏系统在实际运行过程中，其控制量受到母线频率信号的影响，对控制量进行适当调节，就需要全方位控制Boost电路占空比，从而有效保持光伏参与频率的稳定性。

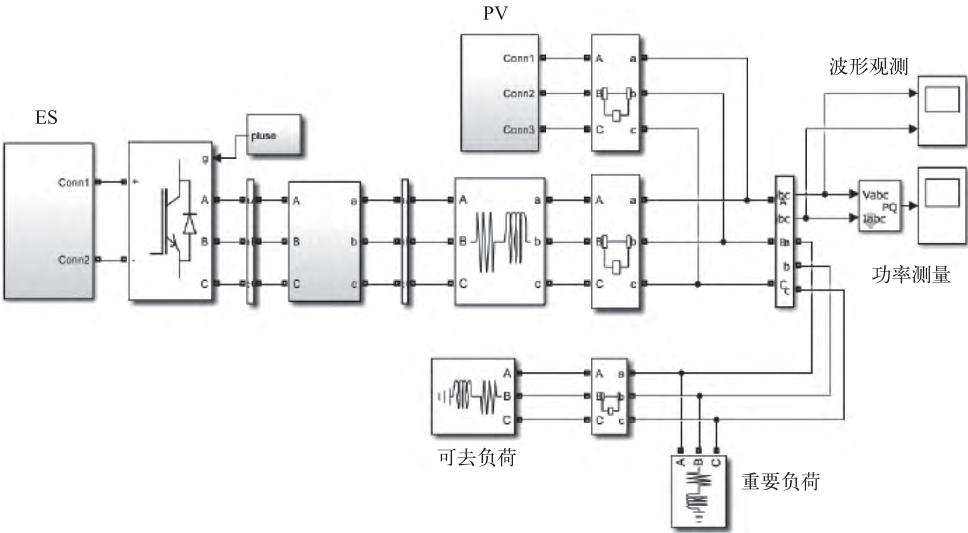


图3 光伏参与频率调节系统仿真模型

结束语

微电网为小型的发电、配电和用电系统，集成了分布式电源、储能系统、能量转换和监控、保护装置，能够接入大电网进行高效运行，或者构建相对封闭的系统，保持独立运行。但是，分布式电源

和储能等大量接入系统，大幅度增加微电网协调控制难度，并在很大程度上转变未来配电系统的架构和格局。因此，对微电网中源荷储无通信协调控制及策略进行研究迫在眉睫。EA

(收稿日期: 2025-04-25)