基于模糊控制的储能优化调度在智能配电网中的应用研究

陆　乐，许吉强，陈浩飞

（国网丹阳市供电公司，江苏 镇江 212300）

摘　要　随着新能源发电规模的不断扩大，风光互补发电在智能配电网中越来越多地被使用，但是风能、光伏发电的间歇性、波动性也给电网功率平衡、电能质量带来了挑战。分布式储能系统可以很好地解决负荷的波动问题，起到削峰填谷的作用，从而提高电网运行的可靠性。本文提出一种以模糊控制为基础的储能优化调度算法，将储能系统的状态、负荷需求以及新能源发电功率结合起来，用模糊控制规则对储能进行充放电的优化。利用建立的智能配电网仿真模型，对典型负荷曲线以及新能源发电数据进行模拟，可以验证该方法对降低功率波动、提高储能利用率以及系统稳定性的效果。结果表明，模糊控制可以处理系统的非线性以及不确定性，从而达到储能调度的高效、自适应的目的。

关键词　储能系统；智能配电网；模糊控制；优化调度；分布式储能

中图分类号：TM73　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.007

0　引言

新能源的快速发展和智能配电网建设推进了电力系统的深度转型。风电和光伏发电具有间歇性和波动性，其输出不确定性对电网功率平衡和电能质量提出挑战。传统电网调度策略难以快速响应这些波动，容易导致电压波动、功率浪涌和储能过度充放电等问题[1]。储能系统具有调节功率输出和充放电能力，对改善新能源的波动有较好的抑制作用，并能提高智能配电网的运行稳定性。

智能配电网依靠信息化手段达成电源、负荷以及储能系统之间的协同控制，从而加强储能调度的即时性和准确性。分布式储能系统布局在负荷中心或者新能源接入节点，用合理的容量和调度策略来改善系统的经济性以及运行稳定性。但是传统的优化方法对于多状态变量、不确定因素等的适应性较差。模糊控制可以处理非线性、不确定的信息，使储能系统动态自适应调度[2]。

1　储能优化调度理论与方法

1.1　智能配电网中分布式储能的功能

分布式储能系统在智能配电网中具有削峰填谷、频率调节、无功支撑和应急备用等作用。通过合理控制储能充放电状态，在负荷高峰期释放电能、低谷期进行储能，可缓解电网供电压力，提高电力资源利用效率。同时，合理配置储能布局和容量能够降低线路损耗，改善电网运行效率，并减少设备长期高负荷运行造成的损耗。此外，储能系统可提供电压支撑和频率响应服务，平抑新能源出力波动，提高配电网运行安全性、稳定性和对负荷变化的适应能力[3]。

1.2　储能优化调度的核心问题

储能优化调度的主要目标是实现功率平衡、提高运行经济性并满足系统安全约束。在实际调度过程中，需要综合考虑储能容量、SOC 限制、充放电速率、电网功率约束以及新能源出力变化等因素，根据实时运行状态制定合理的充放电策略。由于新能源发电和用户负荷具有随机性、波动性，储能调度面临较强的不确定性，传统固定策略难以适应复杂运行环境。因此，储能优化调度不仅需要保障设备安全运行，还需兼顾电网整体运行效率和经济成本，通过建立优化模型和控制算法，实现储能状态动态调整，提高智能配电网运行可靠性和适应能力[4]。

1.3　模糊控制方法

模糊控制是用模糊数学理论以及专家经验知识来设计智能控制的方法，把精确的输入变量转换成模糊的集合，再利用模糊规则做逻辑推理，得到相应的控制输出。储能优化调度中用到模糊控制，可以考虑到

作者简介：陆乐（1994-），男，本科，工程师，研究方向：电力工程技术。

储能运行状况、电网负荷变动、新能源出力波动等各方面因素来调节储能的充放电。输入变量有储能荷电状态（SOC）、负荷偏差、新能源出力变化率等，用来反映系统的能源供需状况；输出变量是储能的充放电功率，通过调节储能的运行状态来达到削峰填谷、平抑新能源波动、提高系统稳定性的目的。模糊控制设计主要包括以下几个步骤：

1. 变量模糊化。把SOC、负荷偏差、新能源出力变化这些连续变量转变成模糊语言变量，然后分成低、中、高等隶属度等级。根据储能状态、电网运行状态的不确定性来建立相应的隶属函数，为模糊推理打下基础。

2. 规则库创建。按照储能运行特性、电网调度需求、专家经验来制订模糊控制规则，建立输入变量和输出控制量的对应关系。当SOC较高、负荷大时，增大储能放电功率来减小峰值负荷；当SOC低、负荷小时，增大充电功率来补充电能，从而达到不同运行状态下自适应调节的目的。

3. 推理和去模糊化。用模糊推理对输入变量进行综合分析，根据规则库得到储能充放电控制量，用质心法等方法把模糊输出转化为实际功率值，达到储能系统精确调节的目的。

模糊控制具有很强的适应性，可以处理系统非线性、不确定和动态变化的问题。在智能配电网储能调度中，不需要建立精确的数学模型，根据实时运行状态来改变控制策略，提高储能响应能力及运行灵活性，达到自适应调度的目的，提高新能源消纳能力、电网运行可靠性。

2 分布式储能布局与调度优化

2.1 储能布局原则

储能系统布局需要综合考虑负荷中心、线路容量、电网拓扑结构以及新能源接入位置等因素，通过合理规划安装位置，提高储能设备对电网运行调节的支撑能力[5]。将储能装置配置于负荷集中区域或新能源接入节点附近，可降低电能传输损耗，减少远距离供电压力，提高系统响应速度和调节效率。同时，储能容量设计应结合区域负荷变化规律、新能源出力特征以及电网运行需求进行综合优化，以满足不同时间尺度下的充放电需求，实现能源高效利用[6]。

2.2 数学模型

储能优化调度可建立如下目标函数：

$$\min J=\sum_{t=1}^{T}[C_{grid}(t)+\alpha\cdot(P_{load}(t)-P_{gen}(t)-P_{ess}(t))^2] \quad (1)$$

式（1）中，$C_{grid}(t)$ 为电网侧综合运行成本，α 为功率平衡惩罚权重系数，$P_{load}(t)$ 为负荷功率，$P_{gen}(t)$ 为新能源出力，$P_{ess}(t)$ 为储能充放电功率，T 为调度周期。约束条件包括：

1. SOC安全运行区间约束：$0\le SOC\ min\le SOC(t)\le SOC\ max\le 1$。

2. 储能充放电功率边界约束：$P_{ess,min}\le P_{ess}(t)\le P_{ess,max}$。

3. 电网安全运行约束：$|V_i(t)|\le V_{limit}$，$|I_{ij}(t)|\le I_{limit}$。

该模型结合SOC动态约束、线路容量约束及电压限制，确保储能调度在安全范围内实现优化。

2.3 模糊控制规则设计

1. 模糊控制输入输出变量设置。储能调度模糊控制规则主要依据储能运行状态、电网负荷变化和新能源出力情况制定，其中SOC、负荷偏差和新能源出力变化率为主要输入变量。SOC反映储能剩余电量及充放电能力，负荷偏差体现电网功率供需状态，新能源出力变化率用于描述风电、光伏等新能源波动情况。模糊控制过程中，将连续输入变量转换为低、中、高等模糊语言变量，并利用隶属函数描述变量变化特征。输出变量为储能充放电功率，根据调节需求设置大放电、中放电、小放电、充电和小充电五种控制状态，实现不同运行条件下的自适应调节。

2. 模糊控制规则库构建。模糊控制规则库是储能优化调度实现智能控制的核心，主要依据储能运行状态、电网调节需求以及新能源出力变化规律建立。通过确定输入变量与输出控制量之间的映射关系，使储能系统能够根据运行状态自动调整充放电策略。当SOC较高且负荷较大时，储能具备较强放电能力，应提高放电功率以降低峰值负荷；当SOC处于中等水平且负荷稳定时，采用适度放电策略，在满足调节需求的同时避免能量过快消耗；当SOC较低且负荷较小时，应增加充电功率，提高储能能量储备。

3. 模糊推理与控制策略优化。完成模糊变量划分和控制规则建立后，通过模糊推理对输入信息进行综合分析，根据规则库确定储能系统充放电控制量。模糊推理综合考虑储能SOC、负荷偏差和新能源出力波动等因素，根据规则匹配结果确定控制策略。由于推理结果为模糊输出，需要通过去模糊化处理转换为实际充放电功率。本文采用质心法进行去模糊化计算，获得连续控制量，实现储能系统平滑调节。相比传统固定充放电方式，模糊控制能够根据运行状态动态调整控制参数，减少频繁切换造成的运行损耗。

3 仿真分析

3.1 仿真平台与参数

在MATLAB/Simulink的仿真环境中建立智能配电网模型，分为典型负荷节点、光伏和风力发电节点和分布式储

能单元。储能系统初始 SOC 设为 50%，容量为 500 kWh，最大充放电功率为 200 kW。仿真周期 24 小时，步长大于等于 1 分钟。负荷曲线取城市配电网典型日负荷曲线，光伏发电按晴天工况出力变化，风力发电用随机波动模式。该仿真设置可以较好地体现储能调度对于负荷的调节以及新能源随机性的影响。

为了直观地表示出调度特性，在表 1 中给出了典型的充放电功率示例数据，可以反映出储能自适应响应的特点。

表 1　储能系统充放电功率数据

时间（h）	负荷功率（kW）	光伏出力（kW）	储能功率（kW）	SOC（%）
6:00	1 200	0	-50	55
9:00	1 800	200	-120	48
12:00	1 600	400	50	50
15:00	1 500	350	30	52
18:00	2 000	100	-150	42
21:00	1 400	0	80	50

（注：负值表示放电，正值表示充电。）

3.2　调度策略效果

从仿真结果可知，用模糊控制策略可以很好地控制负荷峰谷的波动，可以根据负荷的变化自适应地调节储能充放电功率。相比固定充电放电的方式，本方案使总功率减少大约 15%，线路、变压器的负担也减小了。SOC 曲线表明，储能系统全天工作时 SOC 值处在 20% ～ 90% 之间，可以保证安全稳定的运行。与没有储能或者采用简单的定值控制策略相比，系统的功率波动大大减小，电压的波动范围也变小了，说明所提调度策略可以提高电网动态稳定性。

表 2 展示了不同调度策略下负荷峰值与系统电压波动的对比情况，进一步说明模糊控制策略在调度优化中的优势。

表 2　不同调度策略下负荷峰值与电压波动对比

调度策略	峰值功率（kW）	峰谷差（kW）	电压波动范围（p.u.）
无储能	2 100	900	0.92 ～ 1.08
固定充放电策略	1 900	750	0.94 ～ 1.06
模糊控制策略	1 650	650	0.96 ～ 1.04

3.3　系统稳定性与经济性

模糊控制策略对于电网频率、电压的响应有较好的动态特性。储能系统可以迅速调节充放电功率，减小电压波动的幅度，保证系统的频率稳定。从经济性上讲，削峰填谷、峰谷电价套利可以使得仿真结果日运行成本降低约 8%。该结果说明模糊控制策略既可以保证储能系统的运行安全，又在成本效益上具有明显的优势，给智能配电网大规模新能源接入提供可行的技术支持。

4　结束语

本文提出一种基于模糊控制的储能优化调度方法，针对智能配电网分布式储能系统充放电控制问题展开研究。以储能 SOC、负荷偏差和新能源发电波动作为核心输入变量，建立储能充放电策略的模糊控制规则，实现储能调度的动态优化和连续控制。MATLAB/Simulink 仿真结果表明，采用模糊控制策略能够有效减小负荷峰谷波动，使储能系统峰值功率下降约 15%，SOC 在全天运行过程中保持在安全范围内，同时降低电压波动幅度。在峰谷电价调度和削峰填谷控制下，系统日运行成本下降约 8%，验证了该方法在提升系统经济性和稳定性方面的有效性。研究结果表明，模糊控制能够适应智能配电网储能系统中的非线性、随机性和外部环境不确定性，实现高效、自适应的储能调度。分布式储能与模糊控制策略结合，不仅能够提高电网运行稳定性，还可以改善功率质量和储能利用效率，为新能源消纳和能源管理优化提供有效方案。未来研究可进一步结合机器学习算法和预测模型，对模糊控制规则进行自适应优化，提高负荷及新能源出力预测与响应能力。同时，可在多目标优化框架下综合考虑储能寿命、运行经济性和电能质量等因素，进一步研究储能与需求侧响应、微网协同运行以及不同应用场景下的优化调度策略，提高智能配电网应对高比例新能源接入的能力。

参考文献：

[1] 刘吉庆，赵景波，侯睿．基于变分模态分解 - 模糊控制的混合储能系统SOC控制策略[J]．青岛理工大学学报，2025,46(06):114-122,133.

[2] 邓皓．基于模糊聚类分析的储能系统控制环路电气设计[J]．电气技术与经济，2025(12):207-210.

[3] 路巧玲，徐省，李娜，等．智能配电网中分布式储能布局优化配置研究[J]．江西电力，2025,49(01):63-66.

[4] 杜剑峰，朱明媛，庄镇宇．智能配电网中分布式储能布局优化配置分析[J]．现代工业经济和信息化，2022,12(10):268-270.

[5] 章哲玮．智能配电网中分布式储能布局优化配置分析[J]．电气技术与经济，2024(08):342-344,354.

[6] 任锐焕．智能配电网中分布式储能布局优化配置研究[J]．电气应用，2021,40(04):31-35.