

分布式发电系统与混合储能系统协同调度优化研究

董欣 张彦德

喀什大学，新疆维吾尔自治区喀什市，844000；

摘要：本文围绕分布式发电系统与混合储能系统协同调度展开深入研究。分析了两者协同调度的背景与意义，阐述了系统架构及工作原理，探讨了协同调度的优化目标、模型与方法，并结合实际案例分析应用效果，同时指出当前面临的挑战，对未来发展趋势进行展望。研究表明，通过合理的协同调度优化，能够有效提高分布式发电系统的稳定性、可靠性和能源利用效率，降低对传统大电网的依赖，为能源领域的可持续发展提供有力支持。

关键词：分布式发电系统；混合储能系统；协同调度；优化研究；能源利用效率

DOI：10.69979/3041-0673.25.12.014

引言

在全球能源转型的大背景下，分布式发电凭借其环保、高效、靠近用户等诸多优势，成为能源领域的重要发展方向。然而，DG 系统中可再生能源发电的间歇性和波动性，混合储能系统由多种不同类型的储能设备组成，不同储能设备在功率特性、能量特性、充放电效率、寿命等方面各具特点，通过合理组合，HESS 能够综合发挥各类储能设备的优势，有效地平抑 DG 系统的功率波动，增强电力系统的稳定性和可靠性。例如，超级电容器响应速度快，能快速应对短时间的功率变化；电池储能能量密度高，可存储大量能量用于长时间的功率调节。对 DG 系统与 HESS 进行协同调度优化，能够实现两者的优势互补，在满足负荷需求的前提下，最大限度地消纳可再生能源，降低系统运行成本，提高电力系统的整体性能。因此，开展 DG 系统与 HESS 协同调度优化研究具有迫切的现实需求和重要的理论与实践意义。

1 分布式发电系统与混合储能系统概述

1.1 分布式发电系统

分布式发电系统由分布式电源、电力电子变换器、控制器和负载组成。其中，分布式电源分为两类：基于可再生能源的有太阳能光伏、风力发电等，它们清洁可持续，但发电受自然条件影响，存在间歇性和波动性；基于化石能源的有微型燃气轮机、燃料电池，前者启动快、调节灵活但效率低、有污染，后者发电高效环保，不过成本高、技术待完善。电力电子变换器负责转换电能，使其适配电网或负载，控制器实时调控系统运行，

负载则是各类用电设备。

1.2 混合储能系统

混合储能系统通过组合不同储能设备发挥协同优势。其中，电池与超级电容器的组合最为常见：电池能量密度高，适合满足长时间、大容量的用电需求；超级电容器功率密度大、充放电快，能快速应对高功率波动。在具体设备中，锂离子电池能量与功率密度均衡、循环寿命长，是混合储能系统的主力，用于平滑低频功率波动，但存在自放电高、易损坏的问题；铅酸电池胜在成本低、技术成熟，适用于对性能要求不高的场景。超级电容器功率响应迅速，可平抑高频功率波动，不过能量存储有限。飞轮储能以高速旋转储能，响应快、无污染，常用于快速功率调节，但能量密度低、维护成本较高^[1]。

2 分布式发电系统与混合储能系统协同调度优化目标与模型

2.1 优化目标

通过合理调度分布式发电系统和混合储能系统，最大限度地消纳分布式发电产生的电能，减少弃风、弃光现象，提高可再生能源的利用效率。例如，在太阳能发电充足时，优先利用太阳能满足负荷需求，多余的电能存储到混合储能系统中；当太阳能发电不足时，由混合储能系统释放电能补充负荷需求，从而提高整个系统的能源利用效率^[2]。

平抑分布式发电的功率波动，减少其对电网的冲击，提高电力系统的稳定性和可靠性。混合储能系统根据分布式发电的功率变化和负荷需求，快速调节充放电功率，使系统输出功率保持稳定。同时，在分布式发电系统故

障或电网停电时，混合储能系统能够独立为重要负荷供电，提高供电的可靠性^[13]。

优化分布式发电系统和混合储能系统的运行策略，降低系统的运行成本。包括减少分布式发电系统的弃电损失、降低混合储能系统的充放电损耗、延长储能设备的使用寿命等。此外，还可以通过合理安排分布式发电和储能设备的运行时间，利用峰谷电价差，降低用电成本。

2.2 优化模型

构建协同调度优化模型的目标函数，通常以综合成本最小或效益最大为目标。综合成本包括分布式发电系统的发电成本、混合储能系统的充放电损耗成本、设备维护成本以及弃电损失成本等；效益则包括可再生能源的利用效益、减少电网购电成本带来的效益等。目标函数可表示为：

$$\min \sum_{t=1}^T (C_{DG,t} + C_{ES,t} + C_{M,t} + C_{L,t})$$

其中， $C_{DG,t}$ 为 t 时刻分布式发电系统的发电成本， $C_{ES,t}$ 为 t 时刻混合储能系统的充放电损耗成本， $C_{M,t}$ 为 t 时刻设备维护成本， $C_{L,t}$ 为 t 时刻弃电损失成本，T 为调度周期。

2.2.2 约束条件

在每个时刻，分布式发电系统的输出功率、混合储能系统的充放电功率与负荷功率之间应满足功率平衡关系，即：

$$P_{DG,t} + P_{ES,t} = P_{L,t}$$

其中， $P_{DG,t}$ 为 t 时刻分布式发电系统的输出功率， $P_{ES,t}$ 为 t 时刻混合储能系统的充放电功率（充电为负，放电为正）， $P_{L,t}$ 为 t 时刻的负荷功率。混合储能系统中各储能设备的剩余容量应在其允许的容量范围内，即：

$$S_{min,i} \leq S_{i,t} \leq S_{max,i}$$

其中， $S_{min,i}$ 和 $S_{max,i}$ 分别为第 i 种储能设备的最小和最大允许容量， $S_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 种储能设备的剩余容量。各储能设备的充放电功率应不超过其最大允许充放电功率，即：

$$-P_{max,i}^{ch} \leq P_{i,t}^{ch} \leq P_{max,i}^{dis}$$

其中， $P_{max,i}^{ch}$ 和 $P_{max,i}^{dis}$ 分别为第 i 种储能设备的最大允许充电功率和最大允许放电功率，还包括分布式发电系统的出力约束、电网的安全运行约束等。

3 分布式发电系统与混合储能系统协同调度优化方法

3.1 传统优化方法

线性规划法为经典的优化技术，适用于目标函数和约束条件全为线性的系统。分布式电源和混合储能系统协同调度优化，线性规划法将目标函数及约束条件线性化，采用线性规划算法求得最优调度方案。线性规划法计算速度快、求解精度高，但对非线性问题线性化处理后存在一定的误差。

动态规划法是一种多阶段决策过程中优化的一种方法，将整个调度周期进行划分，以每个阶段的情况为节点，根据当前系统的运行状态及约束条件进行决策，以求得整个周期的最优解。动态规划法可解决复杂的约束条件及非线性问题，随着问题规模的增大，计算量呈指数级增长，容易出现“维数灾”现象。

3.2 智能优化方法

遗传算法是模拟生物进化过程、用于优化计算的一种智能算法，主要包括选择、交叉、变异等过程，在解空间内搜索最佳解。遗传算法有着全局搜索能力强、鲁棒性好等特点，可以解决非线性、多约束的优化问题。遗传算法可应用在分布式发电系统和混合储能系统协同调度优化中，实现对储能设备的充放电和分布式发电系统运行方式的优化。

粒子群优化算法是一种借鉴群体智能的优化算法，粒子模拟鸟类的觅食或鱼类的游动行为，在解空间中寻找最优解的迭代搜索算法。粒子群优化算法计算简单、收敛快等优点，适用于复杂的优化问题。在协同调度优化中可利用粒子群优化算法对储能设备容量进行配置和优化调度^[4]。

与遗传算法和粒子群优化算法一样，还有蚁群算法、模拟退火算法等智能优化算法可应用于分布式发电系统与混合储能系统协同调度优化中。这些智能优化算法同样有其优点与不足，在实际应用中，应根据实际问题特点选择恰当的优化方法，也可将不同的优化方法进行组合提高优化效果。

4 分布式发电系统与混合储能系统协同调度优化案例分析

4.1 案例背景

某工业园区内建设有分布式光伏发电与风电系统，配套建设锂离子电池和超级电容器混合储能系统。工业园区负荷有一定波动，分布式发电系统出力受天气影响较大，为了能够进一步提高能源利用效率与供电可靠性，需要对分布式发电和混合储能系统进行协同运行优化控制。

4.2 优化方案设计

通过粒子群优化算法对工业园区分布式发电系统和混合储能系统进行协同调度。先根据历史气象数据和负荷预测得到分布式发电系统的有功出力和负荷有功需求量；然后，建立以综合成本最小为目标的优化模型，设置目标函数和约束条件；最后利用粒子群优化算法进行优化模型计算，得储能装置的充放电方案和分布式发电系统的出力方案。

4.3 应用效果分析

经实际运行实践，改造后的联合调度模式效果较好，分布式发电系统的弃光、弃风率减少；混合储能系统消减分布式发电功率波动，系统输出功率稳定性得到增强；同时充分利用峰谷电价差降低工业园区用能成本，每年可节约购电费用。

5 分布式发电系统与混合储能系统协同调度优化面临的挑战

5.1 精确预测困难

分布式电源输出功率受气象条件、环境等影响，具有明显的随机性和不可预测性。负荷的需求随着时间、季节、用户行为等均不固定，也使得负荷的预测变得困难。不准确的功率预测和负荷的预测将使得协同调度优化方案的准确性降低，影响系统运行的效果^[5]。

5.2 设备成本与寿命问题

混合储能系统中储能设备具有成本高，如锂离子电池等新型的储能设备等，增加系统的建设费用。另外，储能设备是有限寿命的，随着充放电次数的增长，其功能将会逐渐衰退，需定期进行更新换代，从而又增加了系统的运营费用。如何减少储能设备成本、延长储能寿命是推广应用分布式发电系统与混合储能系统协同调度优化的问题。

5.3 控制与通信技术瓶颈

分布式发电系统、混合储能系统的协同调度有赖于实时可靠的信息交互，高效且精确的控制策略。现阶段电力控制与通信技术方面仍存在控制与通信延迟等问题以及信息数据传输可靠性差的困境，造成协同调度难以实时性和精准性，并且复杂的系统结构、不同的设备类型，也是控制调度面临的一项挑战。

5.4 政策与市场机制不完善

现行分布式发电和储能政策和市场机制不健全，缺乏有效的激励措施和补偿机制，制约了企业和用户分布式发电系统、混合储能系统建设的积极性，电力市场交易规则和价格机制要完善配套适应分布式发电和储能系统的特点，促进分布式发电和储能协调发展。

6 分布式发电系统与混合储能系统协同调度优化发展趋势

6.1 智能化与信息化发展

伴随着人工智能、大数据、物联网等技术的发展，分布式发电系统与混合储能系统的协同调度会向智能化、信息化发展，通过实时采集分析分布式发电、储能设备、负载的运行数据，用人工智能算法进行智能预测、智能决策和智能控制，提高协同调度的准确性和效率，利用物联网技术实现设备间互联互通，构成智能能源管理系统，实现系统全局的实时监控和优化运行。

6.2 多能互补与综合能源系统集成

未来分布式发电+混合储能系统还将与天然气系统、热力系统等其他能源系统高度集成，在多能互补的基础上进行综合能源系统集成，在协同利用优化配置的基础上实现多能源形式的综合调度利用，提高多能源的综合利用率，降低能源消耗、减少环境污染。例如分布式光伏发电+风力发电+燃气轮机发电形式与混合储能系统配合作为供能系统，同时为用户提供电、热等多种能源服务。

6.3 政策与市场机制完善

随着对生能源和储能技术受到越来越多的重视，与此相对应的政策、市场机制也会变得越来越完备，政府将出台更多鼓励分布式发电系统和混合储能系统建设的政策与补贴方案；电力市场会逐步开放，其交易的规则和价格也将变得更加合理，有助于分布式发电系统和储能系统进行商业化应用和持续发展。

7 结论

综上所述，分布式发电系统与混合储能系统的协同调度优化是进一步提升可再生能源的利用效率、强化电力系统稳定性和可靠性的有效途径。通过对分布式发电系统和混合储能系统协同调度优化的论述，进一步明确系统构架、优化目标、模型及方法，结合实际案例验证协同调度优化有效性的同时，仍面临预测精度低、设备成本和寿命问题、控制与通信等技术瓶颈、政策和市场机制问题等。分布式发电系统与混合储能系统的协同调度优化在未来势必会随着智能化、多能互补、政策和市场机制的发展而更加广阔，将会为能源可持续发展做出更大的贡献。后续研究中需进一步研究更加适用的优化方法和技术手段，解决研究中的实际问题，加快分布式发电和储能技术的发展。

参考文献

- [1] 杨苓, 廖钧濂, 黄泽杭, 等. 分布式发电系统的功率振荡抑制装置及其控制方法 [J]. 湖南电力, 2025, 45(2): 22-29.
- [2] 孙伟杰, 陈康. 智能电网技术在分布式发电系统中的应用研究 [J]. 张江科技评论, 2024, (12): 60-62.
- [3] 闫立春. 新能源分布式发电及其优化控制技术研究 [J]. 电力设备管理, 2024, (20): 155-157.
- [4] 董顺超. 分布式发电系统中多元混合储能优化配置研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2022.004083.
- [5] 任浩锋. 风光互补分布式发电能量管理研究 [D]. 南通大学, 2023. DOI: 10.27255/d.cnki.gntyc.2023.00005.

作者简介：董欣（1995年9月），女，汉族，甘肃，硕士研究生，研究方向：分布式发电及混合储能系统的微电网。