

含混合储能的独立微电网多时间尺度协调控制策略

张弛¹, 曾杰¹, 张威¹, 徐琪¹, 彭嘉俊², 郭敏铎²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东省广州市 510062;

2. 深圳合纵能源技术有限公司, 广东省深圳市 518110)

Multi-time Scale Coordination Control Strategy of Isolated Microgrid With Hybrid Energy Storage

ZHANG Chi¹, ZENG Jie¹, ZHANG Wei¹, XU Qi¹, PENG Jiajun², GUO Minhua²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510062, Guangdong Province, China;

2. Shenzhen Hupzon Energy Co., Ltd, Shenzhen 518110, Guangdong Province, China)

摘要: 提出了一种含混合储能的独立微电网多时间尺度协调控制策略。该控制策略采用“日前优化+日内滚动+实时控制”的方式, 对各发电机组的启停和出力计划、负荷投切计划和储能系统的控制进行决策, 并且不断修正。该策略可以有效地减轻预测误差带来的影响, 从而提高含混合储能的独立微电网运行的稳定性与经济性。

关键词: 多时间尺度; 独立微电网; 协调控制; 混合储能

Abstract: With the continuous improvement of the renewable energy penetration in the isolated microgrid, the prediction accuracy of renewable energy output have played more and more important role in the coordination control of the isolated microgrid. In addition, hybrid energy storage is introduced into the microgrid as a flexible and schedulable distributed resource, which can shift load and improve voltage quality. In the research of coordinated control of micro-grid, hybrid energy storage also has high adaptability in engineering. Therefore, this paper proposes a multi-time scale coordination control strategy for the isolated micro-grid with hybrid energy storage. The control strategy combines day-ahead optimization, intra-day rolling and real-time control to make decisions and continuous corrections on units' scheduling plan, load switching plan and energy storage system control. This strategy can effectively mitigate the impact of prediction errors, thereby improve the stability and economy of the isolated microgrid operation with hybrid energy storage.

Keywords: multi-time scale; isolated microgrid; coordination control; hybrid energy storage

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2018.1410

基金项目: 南方电网重点科研项目 (GDKJXM20161888)

0 引言

蕴含丰富可再生能源的地区往往远离负荷中心, 在该区域建设含多种分布式电源的独立型微电网能够有效降低成本、提高系统的电能质量和供电可靠性^[1-3]。然而, 高渗透率间歇性可再生能源和负荷具有随机性及多变性, 需要储能设备参与平抑。目前微电网中通常以蓄电池等能量型储能作为主要的储能设备。能量型储能具有能量密度大、功率密度小、循环充放电寿命低、功率响应时间较慢等特点, 无法有效地平抑微电网系统出现的高频扰动。而功率型储能具有功率密度大、能量密度小、循环寿命高、功率响应时间快等特点, 无法长时间提供大量的电能吞吐。文献[4]证明混合储能可以充分利用蓄电池和超级电容的技术优势互补性, 提高储能系统的出力性能, 延长蓄电池的使用寿命。

关于独立型微电网系统的协调控制策略, 国内外学者积累了一定的研究成果。文献[5]针对含风光柴储的独立型微电网, 提出一种基于改进群优化算法的日前协调控制模型, 模型考虑柴油燃料费用、储能运行费用以及网络损耗。文献[6]提出一种考虑蓄电池使用寿命的微电网日前经济调度模型。然而日前新能源和负荷功率预测精度较差, 控制决策结果无法直接利用。文献[7]提出一种考虑负荷需求侧响应的微电网多时间尺度能量管理框架与调度方法, 时间尺度涉及日、小时与分钟。可控机组启停计划在日前计划中决策且不允许更改, 当日前预测误差较大可能会导致

现有机组无法平衡实际的负荷功率。文献 [8] 提出含大规模风电接入电力系统的滚动优化调度策略，考虑了多时间尺度需求侧响应资源，然而该文未将储能作为研究对象考虑在内。文献 [9] 提出从日前和日内两个时间尺度对微电网进行协调控制，同时优化模型运行成本中考虑了储能寿命损耗成本。但上述文献未将混合储能系统作为协调控制元素纳入讨论，同时未提及关于应对可再生能源预测精度所带来问题的解决方案，适用性有限。

本文提出一种含混合储能的独立微电网多时间尺度协调控制策略。针对独立微电网系统规模小、惯性小和抗干扰能力低的特点，该策略采用“日前优化+日内滚动+实时控制”方式，对各发电机组的启停和出力计划、负荷投切计划和储能系统的控制进行决策，并且不断修正，以有地减轻预测误差带来的影响，从而提高含混合储能的独立微电网运行的稳定性与经济性。

1 含混合储能的独立微电网典型拓扑

根据可再生能源及地理资源利用条件，本文独立微电网典型拓扑图如图 1。

本文所研究的独立型独立微电网中包含风力发电单元、光伏发电单元、柴油发电单元、混合储能单元以及负荷，各单元通过交流母线引出的多条馈线连接，馈线一般配置有静态断路器，整个网架呈辐射状结构。

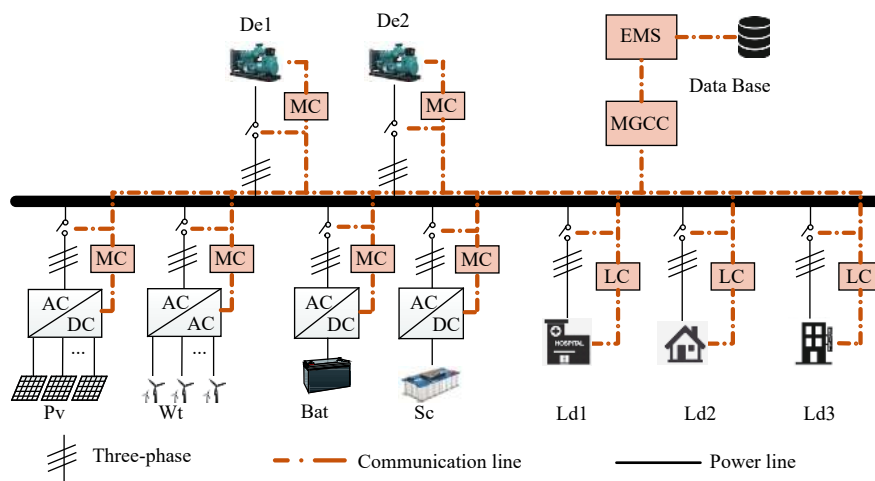


图 1 含混合储能的独立微电网典型拓扑

Fig. 1 Typical topology of isolated microgrid with hybrid energy storage

2 独立微电网控制架构

结合微电网工程的控制实况，基于时间尺度对含混合储能的独立微电网的控制系统进行如图 2 的三层结构划分：①优化调度层，基于 1 天的时间尺度，通过独立微电网能量管理系统 (energy management system, EMS) 实现。EMS 通过日前全局优化算法实现独立微电网全局层面的运行优化调度，并为独立微电网中央控制器 (microgrid central controller, MGCC) 提供计划曲线；②微电网协调控制层，基于分钟级控制，通过 MGCC 实现。通过基于逻辑判断的“源-荷-储”多能互补协调控制策略修正实际工况与理想工况的偏差，并为本地控制器下发控制指令，实现独立微电网内的多能互补协调控制与调度；③实时协调控制：基于秒级控制，通过控制本地控制器实现。控制指令由本地的分布式发电/负荷/混合储能执行。对应地，本文设计含混合储能的独立日前优化调度：

1) 基于短期功率预测结果决策出次日每小时的独立微电网内各类分布式电源 (不包括功率型储能系统) 的出力计划曲线、负荷的经济调度方案。日前调度模型执行周期的时间尺度为 1 天。

2) 日内滚动优化调度：基于超短期功率预测结果，EMS 通过有限时域滚动优化的日内滚动优化调度模型对日前计划不断修正，执行周期的时间尺度为 15 min。

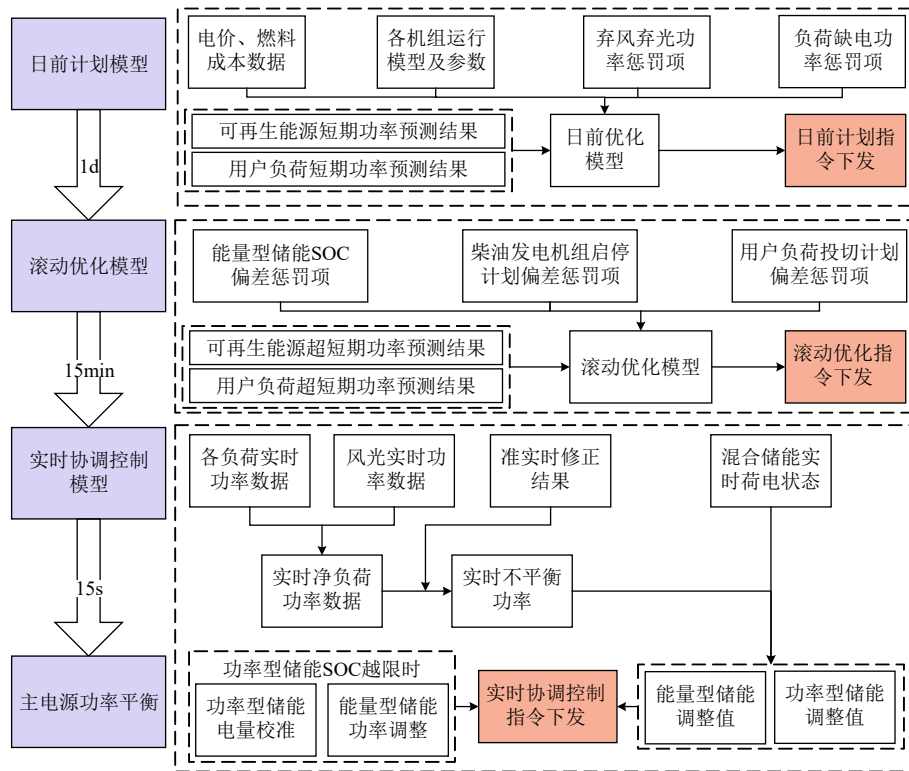


图2 基于时间尺度划分的含混合储能独立微电网控制架构

Fig. 2 Isolated microgrid control architecture with hybrid energy storage based on time scales

3) 实时协调控制: 以日内滚动优化调度计划作为参考曲线实时协调控制策略修正实际工况与理想工况的偏差, 尽可能跟踪日内滚动优化调度计划曲线。执行周期的时间尺度为 30 s。

3 多时间尺度协调控制策略

3.1 考虑供电可靠性的日前优化调度模型

本文在源侧考虑独立型微电网内包含风力发电系统、光伏发电系统、能量型储能系统、功率型储能系统、柴油发电系统等多类型分布式电源的特点, 建立日前优化调度模型。

3.1.1 优化目标

独立型独立微电网日前优化调度模型优化目标函数如下式所示:

$$y(P, u) = F_{\text{load}}(u_{\text{load}}) - F_{\text{ba}}(P_{\text{ba}}, u_{\text{ba}}) - F_{\text{de}}(P_{\text{de}}, u_{\text{de}}) - F_{\text{re}}(P_{\text{pv}}, P_{\text{wt}}) + P_{\text{dep}}(P_{\text{pv}}, P_{\text{wt}}) + P_{\text{lpsp}}(u_{\text{load}}) \quad (1)$$

式中: F_{load} 、 F_{ba} 、 F_{de} 、 F_{re} 、 P_{dep} 、 P_{lpsp} 分别为负荷收益、能量型储能系统运行成本、柴油发电系统运行成本、可再生能源发电系统运行成本、弃风弃光惩罚费用和负荷缺电惩罚费用; P_{de} 、

P_{ba} 、 P_{pv} 、 P_{wt} 分别为柴油发电机组、能量型储能、光伏发电机组、风力发电机组未来 24 h 的发电计划曲线; u_{load} 、 u_{de} 、 u_{ba} 分别为负荷功率预测值、柴油发电机组和能量型储能未来 24 h 的启停计划。

3.1.1.1 柴油发电系统运行成本

柴油发电系统每个时段的运行成本主要由柴油发电系统的启停成本、燃料消耗成本、环保折算成本等几部分构成, 数学描述如式 (2) 所示:

$$F_{\text{de}} = \sum_{i=1}^{T_1} \sum_{j=1}^{n_{\text{de}}} [(s_{\text{de,start},i}(t) f_{\text{de,start}} + s_{\text{de,down},i}(t) f_{\text{de,down}}) + u_{\text{de},i}(t) f_{\text{diesel}}(P_{\text{de},i} \Delta T) + u_{\text{de},i}(t) g_{\text{diesel}}(P_{\text{de},i} \Delta T)] \quad (2)$$

式中: $F_{\text{de}}(t)$ 为柴油发电系统在调度期 T_1 的运行成本; T_1 为日前优化调度时长, $T_1 = 24 \text{ h}$; n_{de} 为柴油发电机组数量; ΔT 为时间间隔, $\Delta T = 1 \text{ h}$; $s_{\text{de,start},i}(t) = 1$ 、 $s_{\text{de,down},i}(t) = 1$ 分别为柴油发电机组 i 在第 t 个时段转换为开机状态和转换为停机状态; $u_{\text{de},i}(t) = 1$ 为柴油发电机组 i 在第 t 个时段处于开机运行状态; $u_{\text{de},i}(t) = 0$ 为柴油发电机组 i 在第 t 个时段处于停机状态; $f_{\text{de,start}}$ 、 $f_{\text{de,down}}$ 分别为

柴油发电机组的启动成本和停机成本。

此外，由 $f_{\text{diesel}}(P_{\text{de},i}\Delta T)$ 表示的柴油发电系统燃料成本计算函数及 $g_{\text{diesel}}(P_{\text{de},i}\Delta T)$ 表示的柴油发电系统环保折算成本计算方参考文献 [10-11]。

3.1.1.2 能量型储能系统运行成本

初始空段落

3.1.1.2 能量型储能系统运行成本

能量型储能运行成本由放电运维成本以及设备寿命损耗成本构成，数学描述如式 (3) 所示：

$$F_{\text{ba}} = \sum_t \sum_{j=1}^{n_{\text{ba}}} u_{\text{ba},j}(t) f_{\text{ba,oper}} |P_{\text{ba},j}(t)| \Delta T + f_{\text{ba,inv}} \frac{\int_0^{T_1} |P_{\text{ba},j}(t)| dt}{E_{\text{ba,totalenergy}}} \quad (3)$$

式中： F_{ba} 为能量型储能系统在调度期 T_1 的运行成本； n_{ba} 为能量型储能系统的数量； $u_{\text{ba},j}(t)$ 为第 j 个能量型储能在第 t 时刻的启停状态， $u_{\text{ba},j}(t) = 1$ 为第 j 个能量型储能处于运行状态，反之 $u_{\text{ba},j}(t) = 0$ 为第 j 个能量型储能处于停机状态； $f_{\text{ba,oper}}$ 为能量型储能的运行成本系数，元/kW； $P_{\text{ba},j}$ 为第 j 个能量型储能系所损耗的循环寿命比例统在第 t 时刻的功率； $f_{\text{ba,inv}}$ 为能量型储能初始投资成本； $E_{\text{ba,totalenergy}}$ 为能量型储能的总吞吐量。

3.1.1.3 可再生能源发电系统运行成本

由风力发电系统运行成本、光伏发电系统运行成本构成，数学描述如下：

$$F_{\text{re}}(P_{\text{pv}}, P_{\text{wt}}) = \sum_t [f_{\text{pv,oper}} P_{\text{pv},l}(t) \Delta T] + [f_{\text{wt,oper}} P_{\text{wt},m}(t) \Delta T] \quad (4)$$

式中： $F_{\text{re}}(P_{\text{pv}}, P_{\text{wt}})$ 为发电系统运行成本； $f_{\text{wt,oper}}$ 、 $f_{\text{pv,oper}}$ 分别为风力发电系统、光伏发电系统的运行成本系数； n_{wt} 、 n_{pv} 分别为风力和光伏发电机组数量； $P_{\text{wt},m}$ 、 $P_{\text{pv},l}$ 分别为第 m 台风力发电机组的功率和第 l 台光伏发电机组的功率。

3.1.1.4 负荷收益

由售电收益、可中断负荷切除赔偿成本构成，数学描述如下：

$$F_{\text{load}} = \sum_{t=1}^{T_1} \sum_{k=1}^{n_{\text{load}}} [f_{\text{load,sale}} P_{\text{load},k}(t) - f_{\text{load,cut}} \Delta P_{\text{cutload},k}(t)] \quad (5)$$

式中： $P_{\text{pv},l}^{\text{short-term}}(t)$ 、 $P_{\text{wt},m}^{\text{short-term}}(t)$ 、分别为光伏、风电的短期预测功率； β_{dep} 、 β_{ipsp} 分别为弃风

弃光惩罚项和负荷缺电惩罚项的惩罚系数； n_{sdload} 、 n_{ctload} 分别是次要负荷与可中断负荷的数量； $u_{\text{sdload},k}(t)$ 、 $u_{\text{ctload},p}(t)$ 分别表示第 k 个次要负荷和第 p 个可中断负荷第 t 时刻的投切计划矩阵，0 表示切除，1 表示投入； $P_{\text{sdload},k}(t)$ 、 $P_{\text{ctload},p}$ 分别是第 k 个次要负荷的功率和第 p 个可中断负荷第 t 时刻的功率。

3.1.1.5 惩罚项

优化目标中引入惩罚项的目的是在系统安全稳定运行的前提下提高供电可靠性，降低弃风弃光率。惩罚项由弃风弃光惩罚项和负荷缺电惩罚项组成，计算公式如下式所示：

$$P_{\text{dep}}(P_{\text{pv}}, P_{\text{wt}}) = \beta_{\text{dep}} \sum_{t=1}^{T_1} \left(\sum_{l=1}^{n_{\text{pv}}} [P_{\text{pv},l}^{\text{short-term}}(t) - P_{\text{pv},l}(t)] + \sum_{m=1}^{n_{\text{wt}}} [P_{\text{wt},m}^{\text{short-term}}(t) - P_{\text{wt},m}(t)] \right) \quad (6)$$

$$P_{\text{ipsp}}(u_{\text{load}}) = \beta_{\text{ipsp}} \sum_{t=1}^{T_1} \left(\sum_{k=1}^{n_{\text{sdload}}} [(1 - u_{\text{sdload},k}(t)) P_{\text{sdload},k}(t)] + \sum_{p=1}^{n_{\text{ctload}}} [(1 - u_{\text{ctload},p}(t)) P_{\text{ctload},p}(t)] \right) \quad (7)$$

式中： F_{load} 为负荷在调度期 T_1 的收益； n_{load} 为独立微电网内的负荷数量； $f_{\text{load,sale}}$ 为微电网的售电电价； $f_{\text{load,cut}}$ 为可中断负荷的赔偿系数； $P_{\text{load},k}(t)$ 为第 k 个负荷在第 t 时刻的功率； $\Delta P_{\text{cutload},k}(t)$ 为第 k 个负荷在第 t 时刻的可中断负荷削减量。

3.1.2 主要约束条件

1) 系统平衡约束。

独立微网离网运行状态下，系统各时刻各分布式电源出力须与系统内负荷功率平衡，即：

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{de}}} P_{\text{de},i}(t) + \sum_{j=1}^{n_{\text{ba}}} P_{\text{ba},j}(t) + \sum_{l=1}^{n_{\text{de}}} P_{\text{de},l}(t) + \sum_{m=1}^{n_{\text{wt}}} P_{\text{wt},m}(t) = \sum_{s=1}^{n_{\text{ipload}}} P_{\text{ipload},s}(t) + \sum_{p=1}^{n_{\text{ctload}}} u_{\text{ctload},p}(t) P_{\text{ctload},p}(t) + \sum_{k=1}^{n_{\text{sdload}}} u_{\text{sdload},k} P_{\text{sdload},k}(t) \quad (8)$$

式中： n_{ipload} 为系统重要负荷的个数； $P_{\text{ipload},s}(t)$ 为第 s 个重要负荷第 t 时刻的功率。

2) 能量型储能系统运行约束。

主要受逆变器额定功率、本体允许充放电功率约束：

$$P_{ba,n,j}^{cha} \leq P_{ba,j}(t) \leq P_{ba,n,j}^{dis} \quad (9)$$

$$Soc_{ba,min,j} \leq Soc_{ba,j}(t) \leq Soc_{ba,max,j} \quad (10)$$

式中： $P_{ba,n,j}^{cha}$ 、 $P_{ba,n,j}^{dis}$ 分别为第 j 个逆变额定充电和放电功率； $Soc_{ba,min,j}$ 、 $Soc_{ba,max,j}$ 分别为第 j 个荷电状态上下限。

3) 柴油发电系统运行约束。

系统低负载率运行时发电效率显著下降，耗油量接近满载，且长期低负载率运行易对柴油发电机组造成损害，因此需满足一定功率约束；此外系统还需满足爬坡率约束，即运行约束有：

$$\beta_{de,i,min} P_{de,n,i} \leq P_{de,i}(t) \leq P_{de,n,j} \quad (11)$$

$$-\Delta P_{de,down,j} \leq P_{de,j}(t) - P_{de,j}(t-1) \leq \Delta P_{de,up,j} \quad (12)$$

式中： $P_{de,n,i}$ 为第 i 台柴油发电机组的额定功率； $\beta_{de,i,min}$ 为第 i 台柴油发电机组的最小运行功率系数； $-\Delta P_{de,down,j}$ 、 $\Delta P_{de,up,j}$ 分别为第 i 台柴油发电机组的最大向下爬坡率和最大向上爬坡率。

4) 备用容量约束。

由柴油发电系统与能量型储能系统提供，由下式描述：

$$\sum_{i=1}^{n_{de}} \min(u_{de,j}(t) P_{de,n,i} - P_{de,i}(t), \Delta P_{de,up,i}) + \sum_{i=1}^{n_{de}} \min(u_{ba,j}(t) P_{ba,n,j}^{dis} - P_{ba,j}(t), \frac{E_{ba,n,j}(Soc_{ba,j}(t) - Soc_{ba,min,j})}{\Delta T} \eta_{ba,dis}) \geq R_S(t) \quad (13)$$

式中： $E_{ba,n,j}$ 为第 j 个能量型储能的额定容量； $\eta_{ba,dis}$ 为能量型储能的放电效率； $R_S(t)$ 为独立型微电网的备用容量需求； $u_{de,j}(t)$ 、 $u_{ba,j}(t)$ 、 $P_{de,n,i}$ 、 $P_{ba,n,j}^{dis}$ 、 $P_{de,i}(t)$ 、 $\Delta P_{de,up,i}$ 、 $P_{ba,j}(t)$ 、 $E_{ba,n,j}$ 、 $Soc_{ba,j}(t)$ 、 $Soc_{ba,min,j}$ 、 ΔT 的含义见前文。

3.2 基于模型预测控制的日内滚动优化调度模型

图3是基于模型预测控制的日内滚动优化调

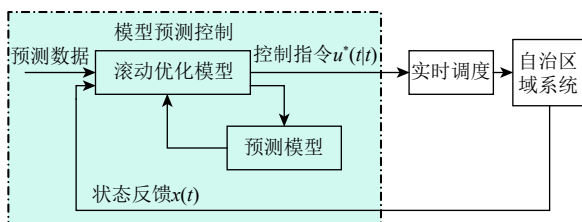


图3 日内滚动优化调度流程

Fig. 3 Optimal scheduling process of intraday rolling

度框图。在 t 时刻，将实测的系统状态 $x(t)$ 反馈到滚动优化调度模型中，将其与预测数据结合求解最优控制序列，并将最优控制序列第1组解作为实际下发控制量。如下式是最优控制序列：

$$\mathbf{U}^* = [\mathbf{u}^*(t|t), \mathbf{u}^*(t+1|t), \dots, \mathbf{u}^*(t+1|t)] \quad (14)$$

式中： k 为预测时域； \mathbf{U}^* 为 t 时刻求出的、对未来 k 个时段的最优控制序列； $\mathbf{u}^*(t|t)$ 为 t 时刻求出的第1个时段最优控制率，其由控制变量向量组成。设定滚动时域时间窗，即预测时域 $k=4$ h，时间辨识度为 $\Delta t=15$ min。

对于可再生能源渗透率较高的独立型微电网而言，源荷的随机性和间歇性时刻影响着系统稳定性。因此，在日内优化调度模型中，有必要在可能影响系统安全稳定运行的情况下开放启停机组和负荷投切的优化修正。此外为保证日内滚动优化过程中，期望能量型储能荷电状态尽可能跟随日前计划。因此，在日内滚动优化调度模型的优化目标中，由运行成本项 F 和决策惩罚项 P 两部分组成，其目标函数的数学描述如下所示：

$$y(\mathbf{P}, \mathbf{u}) = F_{load}(\mathbf{u}_{load}) - F_{ba}(\mathbf{P}_{ba}, \mathbf{u}_{ba}) - F_{de}(\mathbf{P}_{de}, \mathbf{u}_{de}) - F_{de}(\mathbf{P}_{pv}, \mathbf{P}_{wt}) + P_{dep}(\mathbf{P}_{pv}, \mathbf{P}_{wt}) + P_{crt_soc}(\mathbf{P}_{ba}, \mathbf{u}_{ba}) + P_{crt_ld}(\mathbf{u}_{load}) + P_{crt_de}(\mathbf{u}_{de}) \quad (15)$$

式中： $P_{crt_soc}(\mathbf{P}_{ba}, \mathbf{u}_{ba})$ 、 $P_{crt_ld}(\mathbf{u}_{load})$ 、 $P_{crt_de}(\mathbf{u}_{de})$ 分别为能量型储能荷电状态修正惩罚项、负荷投切计划修正惩罚项、柴发启停计划修正惩罚项，各个新增惩罚项的计算公式如下：

$$P_{crt_soc}(\mathbf{P}_{ba}, \mathbf{u}_{ba}) = \beta_{crt_soc} \sum_{t=1}^{T_2} \sum_{j=1}^{n_{ba}} [Soc_{ba,j}(t) - Soc_{ba,j}^{Day_ahead}(t)]$$

$$P_{crt_ld}(\mathbf{u}_{load}) = \beta_{crt_ld} \sum_{t=1}^{T_2} \quad (16)$$

$$\left(\sum_{k=1}^{u_{sdload}} [abs(u_{sdload,k}(t) - u_{sdload,k}^{Day_ahead}(t)) + abs(u_{ctload,p}(t) - u_{sctload,p}^{Day_ahead}(t))] \right) \quad (17)$$

$$P_{crt_de}(\mathbf{u}_{de}) = \beta_{crt_de} \sum_{t=1}^{T_2} \left(\sum_{i=1}^{n_{de}} abs(u_{de,i}(t) - u_{de,i}^{Day_ahead}(t)) \right) \quad (18)$$

式中： β_{crt_soc} 、 β_{crt_ld} 、 β_{crt_de} 分别为能量型储能

荷电状态修正惩罚项、负荷投切计划修正惩罚项、柴发启停计划修正惩罚项的惩罚系数； $Soc_{ba,j}^{Day_ahead}(t)$ 、 $u_{sdload,k}^{Day_ahead}(t)$ 、 $u_{ctload,p}^{Day_ahead}(t)$ 、 $u_{de,i}^{Day_ahead}(t)$ 分别为各变量在日前计划中 t 时刻对应的数值； T_2 为日内滚动优化调度的滚动窗口，一般为 4 h。

3.3 基于逻辑准则判断的快速实时协调控制策略

为解决日内滚动优化调度中可再生能源或负荷突变对系统造成的冲击，独立型微电网主电源增设时间尺度更小的环节，进一步消纳系统的预测误差功率。本文采用基于逻辑准则判断的快速实时协调控制策略来平衡预测误差功率，时间尺度定为 30 s。在能量型储能系统可用容量较大、净负荷需求较小的场景中，柴油发电系统可以处于停机备用状态，而由能量储能系统作为独立型微电网的主电源支撑系统的电压频率稳定。因此在快速实时协调控制策略需要区分柴发作为主电源或能量型储能作为主电源的情况分别进行讨论。

3.3.1 柴油发电系统作为系统主电源

定义柴油发电系统动态最优功率区间 (optimal power range of diesel engine, OPRDE) 为 $[P_{de,down}, P_{de,up}]$ 。多能互补协调控制策略目的是为了保证柴油发电系统尽可能跟踪日内滚动优化曲线运行，若不平衡功率波动过大，则通过调节混合储能系统、光伏发电系统、风力发电系统的功率对主电源最优运行区间进行修正。OPRDE 上下限的计算公式如下所示：

$$\begin{cases} P_{de,up} = (1 + \mu_{de,up}) P_{de,iref}(t_i) \\ P_{de,down} = (1 - \mu_{de,down}) P_{de,iref}(t_i) \\ \text{s.t.} \\ P_{de,up} + R_s(t_i) \leq P_{de,max} \\ P_{de,min} \geq P_{de,down} \\ 0 \leq \mu_{de,up} \leq 1 \\ 1 \leq \mu_{de,down} \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中： $P_{de,iref}(t_i)$ 为第 t_i 时段柴油发电机组的日内滚动优化计划出力； $\mu_{de,up}$ 、 $\mu_{de,down}$ 分别为 OPRDE 上下限的偏离系数； $P_{de,min}$ 、 $P_{de,max}$ 分别为柴油发电机组的最小运行功率和最大运行功率； $R_s(t_i)$ 是前文提及的第 t_i 时段动态备用容量。

当柴油发电机组越过 OPRDE 上下限时，优先使用混合储能进行调节，若调节无法将柴油发电机组的出力维持在 OPRDE 内再使用其它发电系统进行调节，其策略流程图如图 4 所示。

由于功率型储能系统额定功率大，而额定容量小，为保证功率型储能的持续运行，需要定义功率型储能的最优 Soc 运行区间，当功率型储能的实测 Soc 值不在此最优运行区间时，需要利用能量型储能系统来调节功率型储能的 Soc，使其重回最优 Soc 运行区间的中心点附近。

步骤 1：若功率型储能 Soc 偏离最优运行区间，根据系统当前运行情况，设定功率型储能的充放电功率参考值。

功率型储能 Soc 过低时：

$$P_{sc}(t) = \max \left(P_{sc,n}^{char}, P_{ba,n}^{char} - P_{ba}^{min}(t), - \frac{E_{sc}(Soc_{sc,set-} - Soc_{sc}(t))}{T_{charge,set}} \eta_{sc,charge} \right) \quad (20)$$

功率型储能 Soc 过高时：

$$P_{sc}(t) = \min \left(P_{sc,n}^{dischar}, P_{ba,n}^{dischar} - P_{ba}^{min}(t), \frac{E_{sc}(Soc_{sc}(t) - Soc_{sc,set+})}{T_{discharge,set}} \eta_{ba,discharge} \right) \quad (21)$$

式中： E_{sc} 是功率型储能的额定容量； $P_{sc,n}^{char}$ 、 $P_{sc,n}^{dischar}$ 分别是功率型储能的额定充放电功率； $\eta_{sc,charge}$ 、 $\eta_{sc,discharge}$ 分别是功率型储能的充放电效率； $Soc_{sc,set+}$ 、 $Soc_{sc,set-}$ 分别为功率型储能二次调整后的 Soc 目标范围上下限； $P_{ba}^{min}(t)$ 为 t 时刻能量型储能日内滚动优化的计划出力值。

步骤 2：计算能量型储能 t 时刻的实际出力值。

$$P_{ba}(t) = P_{ba}^{min}(t) - P_{sc}(t) \quad (22)$$

步骤 3：MGCC 在 t 至 $t+T_{charge,set}$ 时刻重复步骤 1、2 下发混合储能系统功率参考指令，直至 Soc 处于预设的运行范围内。

3.3.2 能量型储能系统作为系统主电源

为实时平抑净负荷而频繁地充放电会降低其使用寿命，需利用功率型储能配合能量型储能进行净负荷功率高频部分的平抑，减少充放电次数。采用一阶低通滤波算法计算功率型储能的功率指令，其传递函数表达式为

$$P_{nld}^{filt}(s) = \frac{1}{1 + sT_{stab}} P_{nld}(s) \quad (23)$$

式中： $P_{nld}^{filt}(s)$ 、 $P_{nld}(s)$ 为净负荷的平抑目标曲线和平抑前曲线的拉普拉斯变换； T_{stab} 为低通滤波时间常数； s 为拉普拉斯算子。

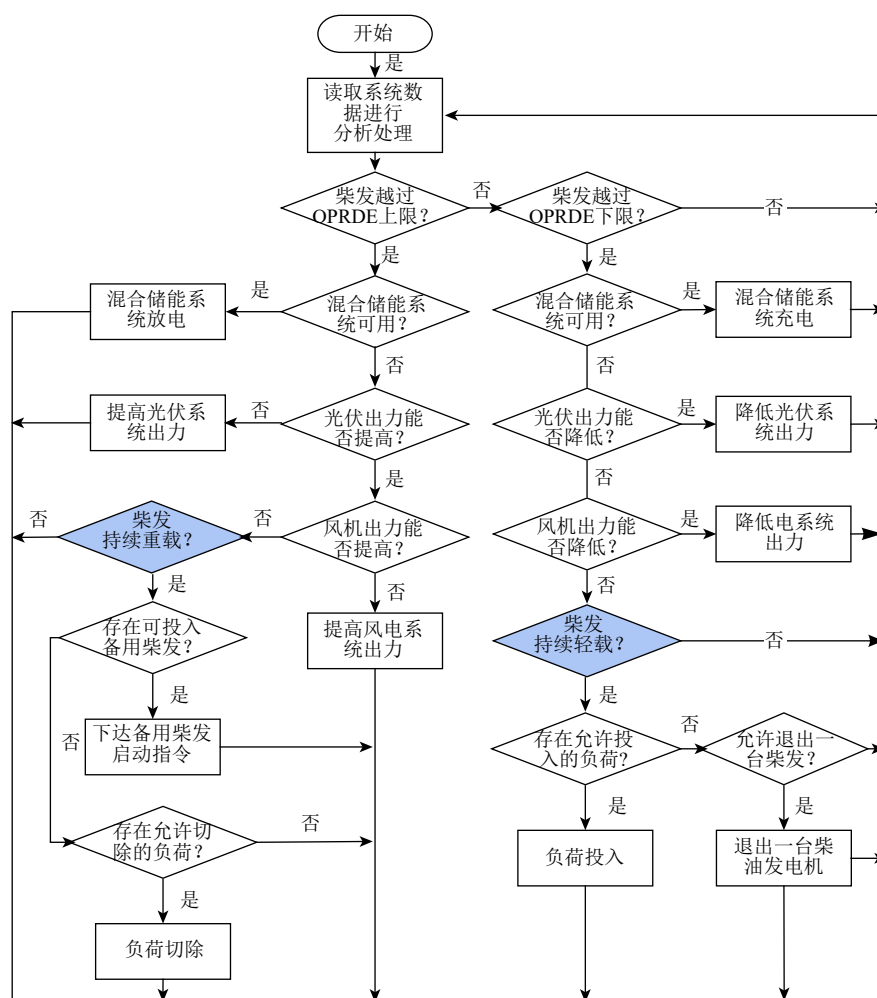


图4 主电源为柴发时的快速实时协调控制策略流程图

Fig. 4 Flow chart of fast real-time coordinated control strategy with diesel units as the main power supply

若将上式 s 以 d/dt 表示, ΔT 作为计算步长, 可得一阶低通滤波在时域的表达式:

$$P_{\text{nld}}^{\text{filt}}(t) = \frac{T_{\text{stab}}}{\Delta T + T_{\text{stab}}} P_{\text{nld}}^{\text{filt}}(t - \Delta t) + \frac{\Delta T}{\Delta T + T_{\text{stab}}} P_{\text{nld}}(t) \quad (24)$$

式中: $P_{\text{nld}}(t)$ 、 $P_{\text{nld}}^{\text{filt}}(t)$ 为净负荷和平抑目标的时域值; $P_{\text{nld}}^{\text{filt}}(t - \Delta t)$ 为上一时刻净负荷经过平抑后的功率。

得到净负荷平抑目标值后, 可计算功率型储能的功率指令, 如下式所示:

$$P_{\text{sc,ref}}(t) = P_{\text{nld}}(t) - P_{\text{nld}}^{\text{filt}}(t) = \frac{T_{\text{stab}}}{\Delta T + T_{\text{stab}}} (P_{\text{nld}}(t) - P_{\text{nld}}^{\text{filt}}(t - \Delta t)) \quad (25)$$

平抑效果的选取关键在于时间常数如何选取, 时间常数越大, 平抑目标值越平滑, 但对混合储能系统中功率型储能、能量型储能的出力能力、存储电量要求更高; 时间常数越小, 平抑目

标值越接近原新能源出力值, 平抑效果越差。

4 仿真及结果分析

本算例考虑独立微电网内含有重要负荷、不参与需求侧响应的次要负荷、参与需求侧响应的可中断负荷共三类负荷。

4.1 日前/日内滚动优化调度算例结果

日前/日内滚动优化调度计划曲线如图5所示。对比曲线发现, 在获取更多实时数据信息以及超短期功率预测结果的基础上, 日内对日前优化计划进行了适当地修正, 以获取更为精准的优化调度计划。

本次优化仅需修改柴油发电机组1的启停计划, 将运行时段17:00~24:00的启动时间提前了15 min。在0:00~12:00时段, 发电机1开启, 2停运, 根据超短期功率预测计算得到的净负荷预测

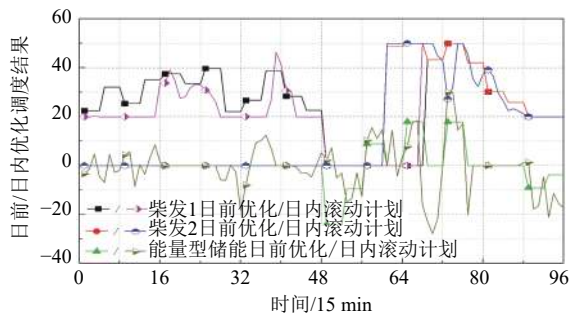


图 5 日前优化/日内滚动优化调度各可控机组出力计划曲线

Fig. 5 Day-ahead/Intra-day rolling optimal scheduling plan curves

值在某些时段会小于柴油发电机组 1 的最低运行功率，因此决策能量型储能进行充电以保持发电机组 1 运行在最低运行功率之上。12:00~15:00 时段，发电机组均停机，由能量型储能作为系统主电源平衡净负荷功率，由于日前预测功率计算得到的净负荷预测值总体偏高，因此在能量型储能充电阶段，日内计划的充电功率总体小于日前计划的，而放电功率总体大于日前计划。15:00~24:00 时段，2 台柴油发电机组按日内滚动修正计划进行启停，但始终至少有 1 台柴油发电机开启。系统净负荷功率主要由柴油发电机组平衡，当净负荷功率过大，超过柴油发电机组额定功率时将决策能量型储能进行放电；当净负荷功率过小，低于柴油发电机组最低运行功率时决策能量型储能进行充电，以保持柴油发电机组运行在额定功率范围内。

由日前优化/日内滚动优化调度能量型储能 Soc 计划曲线可知，日内的能量型储能 Soc 计划曲线在整体趋势上遵循着日前计划。0:00~12:00 时段中，能量型储能系统在修正柴油发电机组运行功率避免其轻载运行的同时，基本跟随日前计划执行着充放电计划。12:00~15:00 时段，柴油发电机组全部停机，能量型储能作为主电源平衡净负荷，此时段 Soc 日内滚动优化结果边界值与日前优化结果的边界值相近，但由于短期功率预测与超短期功率预测之间存在误差，因此时段内各时刻的 Soc 数值存在差异，属于正常情况。15:00~24:00 时段，在柴油发电机组运行功率过大时，能量型储能适当放电缓解柴油发电机组的运行压力，在柴油发电机组运行功率过小时，能量型储能适当充电以维持柴油发电机在最小负载率下继

续运行。

4.2 快速实时协调控制算例结果

图 6 为混合储能的实时协调控制充放电曲线及日内滚动计划曲线 (12:00~18:00)。由图可知，当柴油发电机组运行功率超出预设的最佳运行区间时，混合储能系统将通过充放电实时补偿盈缺功率，其中功率型储能承担盈缺功率的高频部分，而能量型储能承担盈缺功率的低频部分；当柴油发电机组运行于最佳区间时，混合储能无需调整充放电功率指令。12:00~15:00 时段柴油发电机组关停，由能量型储能系统作为主电源支撑系统平衡，由于采用了功率型储能系统的功率平滑策略，不平衡功率的高频部分均由功率型储能承担，低频部分则由能量型储能系统补偿，因此该时段功率依然较为平滑。尽管能量型储能系统在实时阶段经常需要修正功率指令，但从整体上功率指令与日内滚动优化计划依然保持较好的一致性。

图 7 为柴油发电机组一天内的实时协调控制

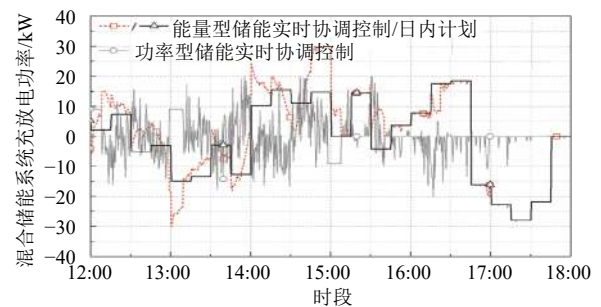


图 6 混合储能系统实时协调控制充放电曲线及日内滚动计划曲线

Fig. 6 Hybrid energy storage system real-time coordinated control of charging and discharging curves and intraday rolling plan curves

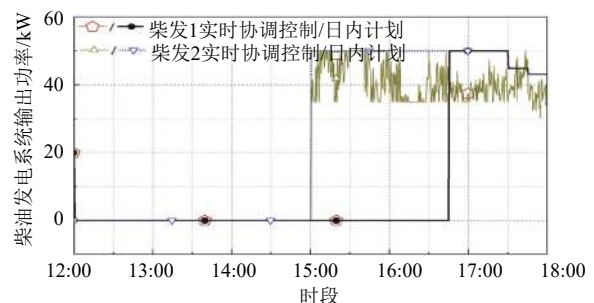


图 7 柴油发电系统实时协调控制功率曲线及日内滚动优化计划曲线

Fig. 7 Real-time coordinated control power curve and intraday rolling optimization plan curve for diesel power generation system

运行功率曲线及日内计划曲线。由图可知,柴油发电机组的实时协调运行功率曲线基本跟随日内滚动优化计划曲线,且偏离计划曲线的值在允许范围内,即柴油发电机组实时运行功率均在最佳运行区间内,体现了快速实时协调控制的有效性。

5 结论

1) 在日前优化模型的优化目标函数中引入负荷缺电惩罚项能够显著地提高独立型微电网的供电可靠性,但同时会损失一定经济性。

2) 基于预测误差更小的超短期功率预测,日内滚动优化能够较为精准地对各类分布式电源的日前出力计划进行调整。当日前预测误差很大时,将对柴发启停计划和负荷投切计划进行修正,进一步提高系统的鲁棒性。

3) 柴油发电机组的实时协调运行功率曲线基本跟随日内滚动优化计划曲线,且偏离计划曲线的值在允许范围内,即柴油发电机组实时运行功率均在最佳运行区间内,体现了快速实时协调控制的有效性。

参考文献

- [1] SAHEB K, DHADDADI M, BELHAMEL M. Economic and technical study of a hybrid system (wind-photovoltaic-diesel) for rural electrification in Algeria [J]. *Applied Energy*, 2009, 86(7/8): 1024–1030.
- [2] 马艺玮, 杨苹, 郭红霞, 等. 风-光-沼可再生能源分布式发电系统电源规划 [J]. *电网技术*, 2012, 36(9): 9–14.
MA Yiwei, YANG Ping, GUO Hongxia, et al. Power source planning of wind-PV-biogas renewable energy distributed generation system [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(9): 9–14 (in Chinese).
- [3] 舒杰, 张先勇, 沈玉梁, 等. 可再生能源分布式微电网电源规划方法及应用 [J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(5): 675–680.
SHU Jie, ZHANG Xianyong, SHEN Yuliang, et al. The algorithm and application in power sources planning and designing for microgrid based on distributed renewable energy [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(5): 675–680 (in Chinese).
- [4] DOUGAL R A, LIU S., WHITE R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids [J]. *Components & Packaging Technologies IEEE Transactions on*, 2002, 25(1): 120–131.
- [5] ZHANG Xianyong, YE Weichang, JIANG Yunzhi, et al. A case study of control and improved simplified swarm optimization for economic dispatch of a stand-alone modular microgrid [J]. *Energies*, 2018, 11(4): 793.
- [6] 刘春阳, 王秀丽, 刘世民, 等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型 [J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(10): 29–36.
LIU Chunyang, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(10): 29–36 (in Chinese).
- [7] FAN Songli, AI Qian, PIAO Longjian, et al. Hierarchical energy management of microgrids including storage and demand response [J]. *Energies*, 2018, 11(5): 1111.
- [8] WANG Beibei, TANG Nan, FANG Xin, et al. A multi time scales reserve rolling revision model of power system with large scale wind power [J]. *Proc. CSEE*, 2017, 37: 1645–1656.
- [9] 郭思琪, 袁越, 张新松, 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略 [J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 122–129.
GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 122–129 (in Chinese).
- [10] 陈健. 风/光/蓄(/柴)微电网优化配置研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [11] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2008(29): 11–15.
QIAN Kejun, YUAN Yue, SHI Xiaodan. Environmental benefits analysis of distributed generation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008(29): 11–15 (in Chinese).

收稿日期: 2018-12-11

作者简介:

张弛(1989), 男, 硕士, 工程师, 从事储能、微电网及新能源并网的相关技术研究, E-mail: sashinseno@163.com;

曾杰(1979), 男, 博士, 高级工程师, 从事储能、微电网及交直流配网的相关技术研究, E-mail: zjhust@qq.com.