

DOI: 10.7667/PSPC161538

串联结构多微网的负荷供电性能多目标优化控制

袁昊哲¹, 杨苹²

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516003; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 相邻区域内的微网因互联互通所需可组成多微网系统, 有助于提高该区域内微网能效。针对离网模式下串联结构多微网, 提出一种综合考虑负荷供电率和负荷持续供电时间的负荷供电性能多目标优化控制算法。建立各层子微网负荷供电性能最优的多目标函数, 各层子微网联合进行分布式预测控制, 实现滚动优化。算例结果证明, 该控制算法实现了多微网负荷供电性能多目标优化。

关键词: 多微网; 串联结构; 预测控制; 供电性能; 多目标优化

Loads power supply performance multi-objective optimization control of multi-microgrid with series structure

YUAN Haozhe¹, YANG Ping²

(1. Huizhou Electric Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Huizhou 516003, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Multi-microgrid system is composed of multiple microgrids in adjacent area to meet the needs of interconnection and power supply, which is conducive to improve the energy efficiency of regional microgrids. Based on off-grid mode multi-microgrid with series structure, this paper comprehensively considers the power supply rate and last supply time of loads and presents a multi-objective optimization control algorithm of loads power supply performance. This paper formulates the multi-objective functions of loads optimal power supply performance in each sub-microgrids. Each sub-microgrids jointly use distributed predictive control to achieve rolling optimization. Under this control algorithm, multi-objective optimization of loads power supply performance of multi-microgrid is verified by actual example.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA052001).

Key words: multi-microgrids; series structure; predictive control; power supply performance; multi-objective optimization

0 引言

可再生能源发电通过微电网进行并网, 可有效地降低其发电波动性对大电网的影响。微电网具有自治运行、多能互补、优化管理和协调控制等优势, 已成为现代智能电网发展的重要组成部分^[1-3]。

正常情况下, 微电网与配网有电气连接, 可由配网供电。当配网故障或电能质量不符合并网要求时, 微电网转换为离网模式^[4-5]。离网型微电网负荷仅由其内部电源供电, 且具有可再生能源发电的随机、间歇等特性, 若某一时刻电源出力不能满足负荷需求时, 需根据功率平衡削减部分负荷^[6-7]。离网

型微电网应尽量满足最大负荷供电需求, 同时维持负荷长时间供电。由于微电网储能容量有限, 离网型微电网负荷供电率和负荷持续供电时间不能同时为最优, 存在多目标优化问题。文献[8-9]考虑了微网内部负荷大小和其他运行约束条件, 构建了离网型微电网多目标经济优化模型, 实现负荷优化分配。文献[10]将微网内的负荷按重要程度和用电特性进行分类, 考虑经济性和多个约束等条件, 建立能量混合整数规划模型, 实现离网型微网的多目标优化运行。

近年来, 微网发展逐渐规模化, 形式多样并具有地域特点, 将众多微网延伸至中压网络将形成多微网(Muti-microgrid)系统^[11]。文献[12-13]分别采用多代理系统智能配网动态博弈框架和储能系统实时与跨时段调度决策, 提高多微网可再生能源发电效率。文献[14]提出的含多个微网的主动配电系统运

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2014AA052001); 广东省科技计划项目(2012B040303005)

行优化模型, 实现了微网间的合作运行以及微网层对配网层的支持运行。文献[15-16]提出了多微网系统的联络线功率控制和并网同步协调控制策略, 实现多微网并/离网无缝切换。以上文献均未对离网型多微网负荷供电性能优化问题进行深入研究。

本文结合分布式预测控制, 提出一种综合考虑负荷供电率和负荷持续供电时间的多目标优化控制算法。建立各层子微网负荷供电性能最优的多目标函数, 并进行联合分布式预测控制, 实现离网模式下串联结构多微网的负荷供电性能多目标优化。

1 串联结构多微网

本文研究的串联结构多微网为光储型, 如图 1 所示。多微网的各子微网可再生能源发电单元为光伏发电系统。子微网内含储能单元进行功率调节, 并内接多个负荷。子微网 1—子微网 n 分别通过其对应的并离网开关 $L1—Ln$ 与上一层子微网相连接。由于串联结构的电气连接特点, 上一层子微网对于本层子微网近似于“配网”, 为本层子微网提供电能和频率电压参考, 下一层子微网对于本层子微网近似于“负荷”。因此, 下一层子微网应尽量服从上一层子微网的调度。本层子微网的运行控制, 可仅考虑上、下一层子微网。

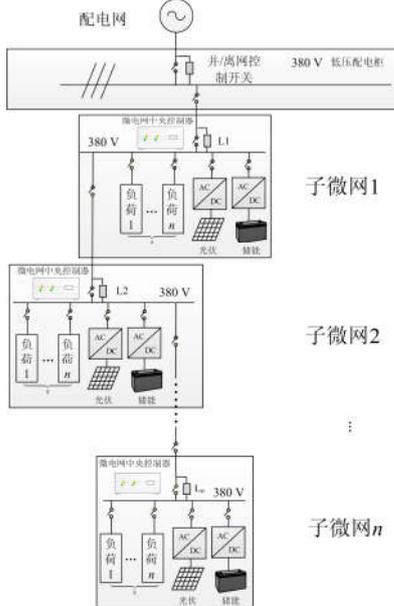


图 1 串联结构多微网拓扑图

Fig. 1 Series structure multi-microgrid topology

2 离网状态微电网模型预测控制

在模型预测控制中, 预测模型是描述系统动态行为的基础模型, 如式(1)所示^[17]。

$$\mathbf{Y}^* = \mathbf{A}\Delta\mathbf{U} + \mathbf{Y}_0 \quad (1)$$

式中: $\Delta\mathbf{U}$ 表示未来 n 个时刻作用于系统的控制量矩阵; \mathbf{Y}^* 表示有 $\Delta\mathbf{U}$ 作用时未来 n 个时刻的系统预测输出值矩阵; \mathbf{Y}_0 表示无 $\Delta\mathbf{U}$ 作用时未来 n 个时刻的系统预测输出值矩阵; \mathbf{A} 为动态系数矩阵。

定义目标函数如式(2)。

$$f = \sum_{i=1}^n [y^*(t+i) - y(t+i)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (2)$$

式中: n 为微电网最大预测长度, m 为控制量长度, $m \leq n$; $\lambda(j)$ 为控制加权系数; $y^*(t+i)$ 和 $y(t+i)$ 分别为 $t+i$ 时刻的预测参考值和预测输出值; $\Delta u(t+j-1)$ 为 $t+j-1$ 时刻的系统控制量。

由于被控对象及环境不是理想的, 控制量作用在 t 时刻后, 在 $t+1$ 时刻的实际输出和预测输出可能不相等, 生成预测误差 $e(t+1)$ 。

$$e(t+1) = y(t+1) - y^*(t+1) \quad (3)$$

此误差经过系数加权后改善对未来其他时刻对应的预测值。

$$y_i^*(t+2) = y^*(t+2) + h \cdot e(t+1) \quad (4)$$

式中, h 为预测误差的加权系数, 本文取 $h=1$ 。

定义子微网 m 的负荷供电率 θ_m 为

$$\theta_m = \frac{load_{m \text{ real}}}{load_m} \quad (5)$$

式中, $load_{m \text{ real}}$ 和 $load_m$ 分别为子微网 m 投入的实际负荷和能投入的最大负荷。

根据式(2)和式(4), 子微网 m 基于负荷供电率的目标函数为

$$f_{\theta_m} = \theta_m(t+1) + e_{\theta}(t) \quad (6)$$

式中, $e_{\theta}(t)$ 为 t 时刻负荷供电率的目标函数生成的预测误差。

对于光储型多微网, 当光照严重不足, 即光伏发电功率较小时, 需通过储能出力补偿负荷供电需求。当储能 SOC 到达下限值 SOC_{\min} 时, 储能停止放电。此时负荷仅由出力较小的光伏发电进行供电, 则实际投入负荷也较小, 可近似认为储能停止放电时刻, 多微网对负荷停止供电。

定义子微网 m 负荷能持续供电时间为

$$T_m = W_{PCSm} \cdot (SOC_m - SOC_{\min}) / P_{BSm} \quad (7)$$

式中, W_{PCSm} 、 SOC_m 和 P_{BSm} 分别为子微网 m 的储能容量、储能 SOC 值和储能充放电功率。当单以负荷持续供电时间最长为优化目标时, 多微网仅确保重要负荷供电, 延长负荷持续供电时间。

根据式(2)和式(4), 子微网 m 基于负荷持续供电时间的目标函数为

$$f_{T_m} = T_m(t+1) + e_T(t) \quad (8)$$

式中, $e_T(t)$ 为 t 时刻负荷持续供电时间的目标函数生成的预测误差。

3 微电网多目标优化

离网模式下, 微网储能容量有限, 无法长时间对负荷供电, 为延长负荷持续供电时间, 需要对微网进行减载。同时, 在确保重要负荷供电的基础上, 微网应满足每一时刻的尽可能多的负荷得到电能, 即负荷供电率最大。因此, 本文同时以负荷供电率和负荷持续供电时间作为优化运行的目标, 实现离网型微电网多目标优化。由各个目标对应的函数及其相应约束条件所组成的多目标优化问题的数学表达如下^[18-19]。

$$\max_{X \in \Omega} F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)) \quad (9)$$

式中: $X \in \Omega \subset \mathbf{R}^n$, $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ 是 n 维实数 \mathbf{R}^n 空间向量; 多目标问题的决策空间称 X 存在的类型空间 D ; $f_i(X) (i=1, 2, \dots, m)$ 为每一个对应子目标的函数, 不同目标之间可能存在互相抵触, 即不存在 X 使每一个子目标函数 $f_i(X) (i=1, 2, \dots, m)$ 同时取得最大值; 多目标问题的目标空间为 m 维向量 $(f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X))$ 存在的空间; $g_i(X) \leq 0 (i=1, 2, \dots, p)$ 为对应约束。

结合式(6)、式(8)和式(9), 本文采用加权求和法, 子微网 m 的多目标优化函数如式(10)。

$$F_m(T_m, \theta_m) = u_m(k) \cdot f_{T_m} + \lambda_m(k) \cdot f_{\theta_m} = u_m(k) \cdot T_{m_i}(t+1) + \lambda_m(k) \cdot \theta_{m_i}(t+1) + e_F(t) \quad (10)$$

式中: $e_F(t) = u_m(k) \cdot e_T(t) + \lambda_m(k) \cdot e_{\theta}(t)$ 为 t 时刻多目标函数预测误差; $\lambda_m(k)$ 为子微网 m 负荷供电率 θ_m 的系数权重值; $u_m(k)$ 为子微网 m 负荷持续供电时间 T_m 的系数权重值。

定义 $u_m(k) + \lambda_m(k) = 1$, $u_m(k) = k/s$, s 为权重系数的等分个数, $k = 1, 2, \dots, s$ 。通过循环迭代的方式, 将 $t+1$ 时刻每一组 $T_{m_i}(t+1)$ 和 $\theta_{m_i}(t+1)$ (i 为对应编号, $i = 1, 2, \dots, n$) 与每一组 $u_m(k)$ 和 $\lambda_m(k)$ 代入目标函数进行计算, 得到所有可能的多目标函数值 $F_m(T_m, \theta_m)$ 。系统查找 $F_m(T_m, \theta_m)$ 最大值所对应的一组 $T_{m_i}(t+1)$ 和 $\theta_{m_i}(t+1)$, 即多目标优化的最优解。

4 基于分布式预测的多微网多目标优化

分布式模型预测控制可实现各子系统分别对自身的目标函数进行优化控制的同时又兼顾全局最优^[20-21]。如图 2 所示, 本文采用基于串联结构的分

布式模型对系统进行预测控制^[22]。

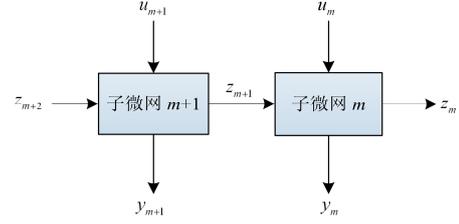


图 2 基于串联结构的分布式模型预测控制示意图
Fig. 2 Diagram of distributed model predictive control based on series structure

其中: z_m 为对应的子微网 m 向上层子微网传输的信息量; u_m 为对应的子微网 m 控制器的输入量, 为相应子微网的储能、负荷和光伏等设备的状态参数; y_m 为对应的子微网 m 负荷、光伏和储能的状态输出量。

子微网 m 光伏最大功率跟踪控制下(MPPT)输出功率为 P_{PVm} , 子微网 m 的 t 时刻功率缺额如式(11)。

$$P_{lossm}(t) = load_m(t) - P_{PVm}(t) \quad (11)$$

当子微网 m 的功率缺额小于 0, 即光伏发电有余, 则剩余光伏功率对储能进行充电, 当下一时刻储能 SOC 预测值 $SOC_m^*(t+1) \geq SOC_{max}$ 时, 限制储能充电功率和光伏输出功率, 光伏逆变器由最大功率控制(MPPT)转变为功率可调控(PQ)。 SOC_{max} 为储能 SOC 上限值。子微网 m 光伏下一时刻的 PQ 功率参考值为

$$P_{PVm \text{ ref}}(t+1) = load_m(t+1) \quad (12)$$

当子微网 m 的功率缺额大于 0 时, 储能通过放电对功率缺额进行补偿。

子微网 m 的负荷供电率为 θ_m , 取值范围为

$$0 \leq \theta_m \leq 100\% \quad (13)$$

对 θ_m 的取值范围进行 n 等分, $i = 0, 1, 2, \dots, n$, 下一时刻子微网 m 的负荷供电率可能值为

$$\theta_{m_i}(t+1) = i/n \quad (14)$$

子微网 m 需满足重要负荷 $load_{m \text{ imp}}(t+1)$ 的供电要求, 因此限制负荷供电率的取值范围为

$$\frac{load_{m \text{ imp}}(t+1)}{load_m(t+1)} \leq \theta_{m_i}(t+1) \leq 100\% \quad (15)$$

基于串联结构的分布式预测控制原理, 子微网 m 进行参数预测时, 下层子微网 $m+1$ 已将其预测结果上传至子微网 m 。 $t+1$ 时刻子微网 $m+1$ 的联络线功率为

$$P_{PCC(m+1)}(t+1) = load_{(m+1) \text{ real}}(t+1) - P_{PV(m+1)}(t+1) - P_{BS(m+1) \text{ ref}}(t+1) \quad (16)$$

式中, $load_{(m+1) \text{ real}}(t+1)$ 、 $P_{PV(m+1)}(t+1)$ 和 $P_{BS(m+1)\text{ref}}(t+1)$ 分别为 $t+1$ 时刻子微网 $m+1$ 投入的负荷、光伏输出功率和储能充放电功率参考值。

子微网 m 在当前负荷供电率下预测储能充放电功率为

$$P_{BSmi}(t+1) = \theta_{mi}(t+1)load_m(t+1) - P_{PVm}(t+1) + P_{PCC(m+1)}(t+1) \quad (17)$$

当 $t+1$ 时刻储能 $SOC_m^*(t+1) \leq SOC_{\min}$ 时, 限制储能充放电功率。子微网 m 负荷持续供电时间所有可能值为

$$T_{mi}(t+1) = W_{PCSm} \cdot (SOC_m(t) - SOC_{\min}) / P_{BSmi}(t+1) \quad (18)$$

根据式(10)计算多目标函数 $F_m(T_m, \theta_m)$ 的最大值, 并输出对应编号 i^* 。 $t+1$ 时刻子微网 m 实际投入的负荷和储能充放电功率参考值分别为

$$load_{m \text{ real}}(t+1) = \theta_{mi^*}(t+1)load_m(t+1) \quad (19)$$

$$P_{BSm \text{ ref}}(t+1) = load_{m \text{ real}}(t+1) - P_{PVm}(t+1) + P_{PCC(m+1)}(t+1) \quad (20)$$

为延长储能蓄电池的使用寿命, 选择 $20\% \leq SOC_m \leq 80\%$ 作为 SOC 限制范围。当储能 SOC 超出限制范围时, 限制储能充放电功率参考值。基于分布式预测控制的多微网多目标优化具体流程图如图 3 所示。

5 算例分析

根据图 1 所示, 本文以两层串联结构多微网为例子进行分析, 对提出的多目标优化控制算法进行分析验证, 同理该控制算法可运用到多层子微网串联的多微网, $m=1,2$ 。该系统由子微网 1 和微网 2 通过并离网开关 L2 串联构成, 并离网开关 L1 断开, 多微网为离网模式。其中子微网 1 包括 30 kW 光伏发电、66.7 kWh 储能系统和本地负荷, 子微网 2 包括 30 kW 光伏发电、30 kWh 储能系统和本地负荷。

5.1 负荷供电率最大为优化目标

当单以负荷供电率最大为优化运行的目标时, 系统以最大的负荷供电率对微电网负荷进行供电, 如图 4 所示。6 点 15 分—10 点 30 分, 此时, 光伏输出功率大于微电网负荷, 储能 SOC 未达到上限值, 将多余的光伏出力对微电网储能进行充电; 10 点 30 分—15 点, 光伏输出功率大于微电网负荷, 子微网 1 和子微网 2 的储能 SOC 均达到上限值, 光伏发电单元限功率运行, 子微网 1 和子微网 2 光伏实际输出功率为 $P_{PV1 \text{ real}}$ 和 $P_{PV2 \text{ real}}$; 15 点—24 点, 光伏输出功率小于负荷, 剩余负荷需求由储能放电补偿。由于储能容量有限, 负荷持续供电时间较短,

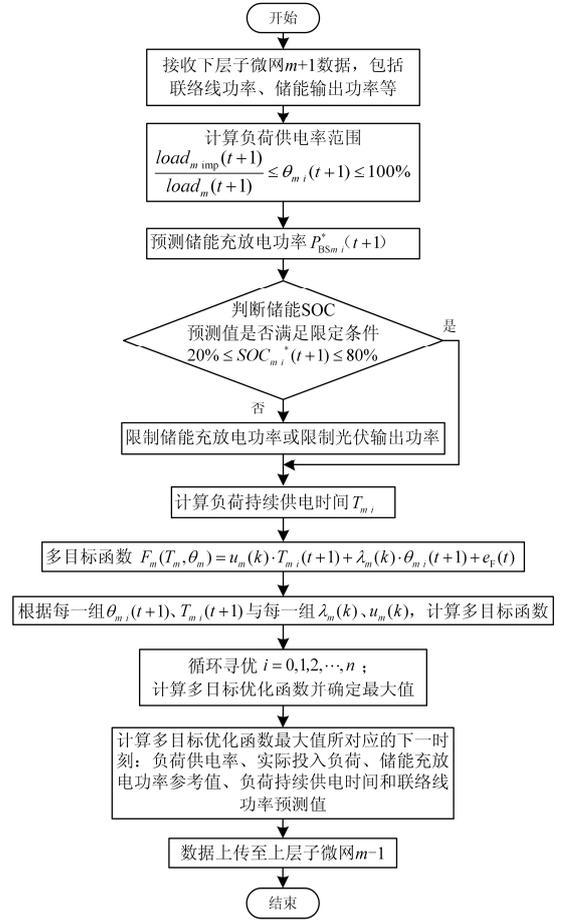


图 3 基于分布式预测的多微网多目标优化流程图

Fig. 3 Flowchart of multi-microgrid multi-objective optimization based on distributed model predictive control

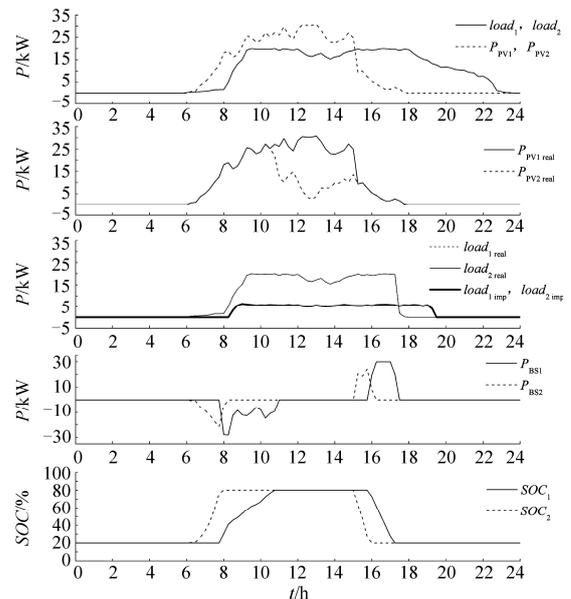


图 4 最大负荷供电率的优化结果

Fig. 4 Optimization results of maximum power supply rate

微电网 18 点已经对负荷停止供电,此时重要负荷功率大于零,多微网无法满足重要负荷的供电要求。

5.2 负荷持续供电时间最长为优化目标

当单以负荷持续供电时间最长为优化运行的目标时,系统以最长的负荷持续供电时间对微电网负荷进行供电,如图 5 所示。6 点 15 分—15 点,情况与 5.1 小节相同;15 点—19 点 15 分,光伏输出功率小于微电网负荷,剩余负荷需求由储能放电补偿,为保障重要负荷供电且有较多的储能电量确保长时间供电,微电网只投入重要负荷,此时的负荷供电率较低;19 点 15 分—24 点,此时重要负荷为 0,若多微网尽量少地投入负荷,负荷持续供电时间最长可达到 24 点。当多微网投入最大负荷,在负荷持续供电时间最长为优化目标的控制模式下,此时供电时间最短,但也能到达 21 点。以该优化控制下最短供电时间与多目标优化结果作对比,分析多目标优化的有效性。

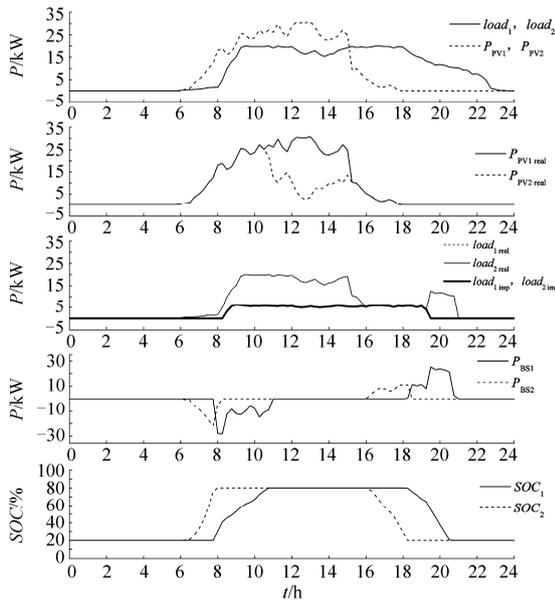


图 5 最长负荷持续供电时间的优化结果

Fig. 5 Optimization results of maximum power supply time

5.3 多目标优化

系统以负荷供电率和负荷持续供电时间组成的多目标优化函数对多微网进行优化运行控制,如图 6 所示。6 点 15 分—15 点,情况与 5.1 小节相同;约 15 点—24 点,光伏输出功率小于负荷,剩余负荷需求由储能放电补偿。多微网在确保对重要负荷供电的情况下,同时兼顾负荷供电率和负荷持续供电时间的优化,负荷供电率较高,负荷供电时间至 19 点 45 分。对比不同优化目标下的性能指标,如表 1 所示,验证了该多目标优化控制能有效地优化多微网的负荷供电性能。

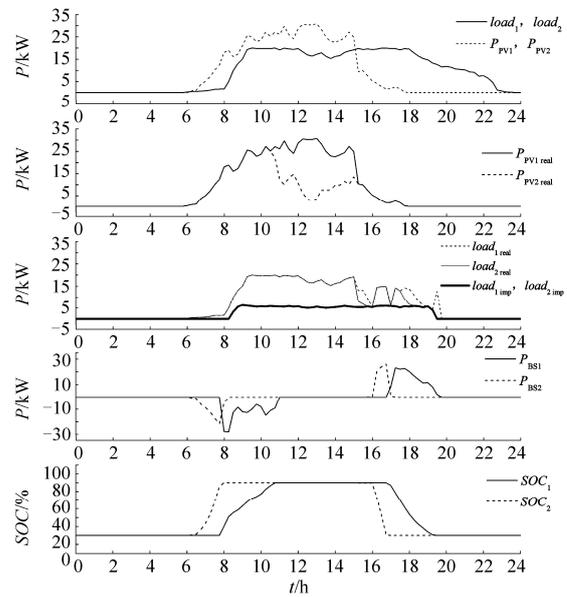


图 6 多目标优化的结果

Fig. 6 Results of multi-objective optimization

表 1 不同优化目标下的性能指标

Table 1 Performance indexes of different optimized objectives

	负荷供电率最大	负荷持续供电时间最长	多目标优化
子微网 1 负荷供电率	100%	81.19%	86.65%
子微网 1 负荷持续供电时间	供电至 18 点	供电至 21 点	供电至 19 点 45 分
子微网 2 负荷供电率	100%	81.19%	81.4%
子微网 2 负荷持续供电时间	供电至 18 点	供电至 21 点	供电至 19 点 30 分

注:表中负荷供电率为对负荷供电起、止时间段内供电率平均值。

6 结论

针对离网运行的串联结构多微网,本文结合分布式预测控制,提出一种综合考虑负荷供电率和负荷持续供电时间的负荷供电性能多目标优化控制算法。建立各层子微网负荷供电性能的多目标优化函数,对各个子微网进行基于串联结构的分布式预测控制,实现滚动优化。通过算例验证了该控制算法的有效性。

参考文献

[1] 黄宜平, 马晓轩. 微电网技术综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 320-328.
HUANG Yiping, MA Xiaoxuan. Research on microgrid technology[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2015, 30(S1): 320-328.
- [2] 王竹颖, 陈志新, 王晓辉. 微电网控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 398-405.
WANG Zhuying, CHEN Zhixin, WANG Xiaohui. The research on control strategy of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 398-405.
- [3] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 基于微电网的电网需求响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 20-26.
ZHANG Ying, RONG Zhanpeng, ZHANG Yuxiong, et al. Study of grid demand response based on micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 20-26.
- [4] 杨苹, 许志荣, 郑群儒, 等. 复杂拓扑结构光储型微电网黑启动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 142-149.
YANG Ping, XU Zhirong, ZHENG Qunru, et al. Black start strategy of PV-ESS microgrid with complicated topology structure[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 142-149.
- [5] 陈丽丽, 牟龙华, 刘仲. 光储柴微电网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 86-91.
CHEN Lili, MU Longhua, LIU Zhong. Analysis of the operating characteristics of a PV-Diesel-BESS microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 86-91.
- [6] 胡龙龙. 微电网建模及其负荷优化分配方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
HU Longlong. Research on microgrid modeling and optimal distribution plan of its load[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [7] 姬志辉. 微电网系统能量优化调度策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
JI Zhihui. Research on micro-grid system energy optimal scheduling strategy[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [8] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 25-31.
CHEN Jian, WANG Chengshan, ZHAO Bo, et al. Economic operation optimization of a stand-alone microgrid system considering characteristics of energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 25-31.
- [9] 林伟, 陈光堂, 邱晓燕, 等. 基于改进自适应遗传算法的微电网负荷优化分配[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 49-55.
LIN Wei, CHEN Guangtang, QIU Xiaoyan, et al. Optimal load distribution of microgrid based on improved self-adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 49-55.
- [10] 张忠, 王建学, 曹晓宇. 基于负荷分类调度的孤岛型微网能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 17-23, 109.
ZHANG Zhong, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu. An energy management method of island microgrid based on load classification and scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 17-23, 109.
- [11] 徐意婷, 艾芊. 基于全景理论的多微网聚合优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 50-56.
XU Yiting, AI Qian. Optimal operation of multi-microgrid aggregation based on landscape theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 50-56.
- [12] 江润洲, 邱晓燕, 李丹. 基于多代理的多微网智能配电网动态博弈模型[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3321-3327.
JIANG Runzhou, QIU Xiaoyan, LI Dan. Multi-agent system based dynamic game model of smart distribution network containing multi-microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3321-3327.
- [13] 江润洲, 邱晓燕, 李丹, 等. 含储能系统的多微网智能配电系统经济运行[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3596-3602.
JIANG Runzhou, QIU Xiaoyan, LI Dan, et al. Economic operation of smart distribution network containing multi microgrids and energy storage system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3596-3602.
- [14] 吕天光, 艾芊, 孙树敏, 等. 含多微网的主动配电系统综合优化运行行为分析与建模[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 122-132.
LÜ Tianguang, AI Qian, SUN Shumin, et al. Behavioural analysis and optimal operation of active distribution system with multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 122-132.
- [15] 周念成, 金明, 王强钢, 等. 串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 13-18.
ZHOU Niancheng, JIN Ming, WANG Qianggang, et al. Hierarchical coordination control strategy for multi-microgrid system with series and parallel structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 13-18.

- [16] 李鹏, 张雪松, 赵波, 等. 多微网多并网点结构微网设计和模式切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 172-178.
LI Peng, ZHANG Xuesong, ZHAO Bo, et al. Structural design and mode switching control strategies of multi-microgrid with several PCCs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 172-178.
- [17] 李鹏, 张保会, 汪成根, 等. 基于模型预测的分布式电压协调控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 8-12.
LI Peng, ZHANG Baohui, WANG Chenggen, et al. The model prediction based distributed coordinated voltage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 8-12.
- [18] 谢涛, 陈火旺. 多目标优化与决策问题的演化算法[J]. 中国工程科学, 2002, 4(2): 59-68.
XIE Tao, CHEN Huowang. Evolutionary algorithms for multi-objective optimization and decision-making problems[J]. Engineering Science, 2002, 4(2): 59-68.
- [19] 马小姝, 李宇龙, 严浪. 传统多目标优化方法和多目标遗传算法的比较综述[J]. 电气传动自动化, 2010, 32(3): 48-50, 53.
MA Xiaoshu, LI Yulong, YAN Lang. Comparison review of traditional multi-objective optimization methods and multi-objective genetic algorithm[J]. Electric Drive Automation, 2010, 32(3): 48-50, 53.
- [20] 喻振帆, 谢敏, 刘明波. 基于多代理技术的分布式模型预测长期电压稳定紧急控制[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 108-115.
YU Zhenfan, XIE Min, LIU Mingbo. Distributed model predictive emergency control for long-term voltage stability based on multi agents[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 108-115.
- [21] 杜晓宁, 席裕庚, 李少远. 分布式预测控制优化算法[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(5): 793-796.
DU Xiaoning, XI Yugeng, LI Shaoyuan. Distributed optimization algorithm for predictive control[J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(5): 793-796.
- [22] 蔡星, 谢磊, 苏宏业, 等. 基于串联结构的分布式模型预测控制[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 510-518.
CAI Xing, XIE Lei, SU Hongye, et al. Distributed model predictive control based on cascade processes[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(5): 510-518.

收稿日期: 2016-09-18; 修回日期: 2016-10-23

作者简介:

袁昊哲(1991—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统和微电网的稳定与控制; E-mail: 931136550@qq.com

杨 苹(1967—), 女, 博士, 教授, 研究方向为新能源并网发电控制。

(编辑 魏小丽)