

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191286

基于最优潮流的含多微网的主动配电网双层优化调度

叶亮, 吕智林, 王蒙, 杨啸

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 多个微电网并入主动配电网(Active Distribution Network, ADN)会对 ADN 系统的经济性和可靠性产生影响。采用传统的多微网与 ADN 全网统一优化调度方法时, 若微网中风/光出力一旦出现波动, 难以高效精确地求出系统的最优潮流, 甚至造成无解。因此提出一种基于双层规划的多微网并网优化调度模型。上层模型中各微网作为电源并入 ADN, 以 ADN 系统潮流平衡为约束, 建立最优潮流模型。运用二阶锥松弛技术将非凸非线性的潮流模型转化为凸可行域的二阶锥规划模型, 并调用 Gurobi 求解器求解。下层模型以上层优化出的联络线功率为约束, 建立并网微电网内可控电源的调度模型, 并采用结合 Tent 映射混沌和 NDX 交叉技术的改进遗传算法(GA)求解。以并入多微网的调整 IEEE33 节点系统为算例, 仿真算例表明双层规划的调度模型及算法具有可行性且在此模型下含多微网的 ADN 系统有更好的经济性。同时当风/光伏发电出现波动时, 下层模型仍然可以进行局部调整优化, 从而降低了微电网波动对 ADN 系统的影响, 提高了系统的可靠性和鲁棒性。

关键词: 多微网; 主动配电网; 双层规划; 最优潮流; 二阶锥松弛技术; 改进 GA

Bi-level programming optimal scheduling of ADN with a multi-microgrid based on optimal power flow

YE Liang, LÜ Zhilin, WANG Meng, YANG Xiao

(College of Electric Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: A multi-microgrid in an Active Distribution Network (ADN) will influence the economy and reliability of an ADN system. When the traditional unified optimal dispatching method of a multi-microgrid and the whole ADN network is adopted, it is difficult to calculate the optimal power flow of the system efficiently and accurately once the wind power output in the microgrid fluctuates, and may even cause no solution being obtained. Therefore, an optimal scheduling model for a grid-connected multi-microgrid based on bi-level programming is proposed. Each microgrid in the upper model is incorporated into the ADN as a power source. The optimal power flow model is established with the ADN system power flow balance as the constraint. Using the second-order cone relaxation technique, the non-convex non-linear power flow model is transformed into a second-order cone programming model for the convex feasible region and the solution is obtained using the Gurobi solver. The lower model takes the power of the line optimized from the upper model as the constraint, sets up within the MG interconnection of a controllable power supply scheduling model, and uses the combination of Tent map chaotic and NDX cross technology improved Genetic Algorithm (GA) to solve the problem. The feasibility of the algorithm is verified by the example of the adjustment IEEE-33 nodes system incorporated into the multi-microgrid. The simulation results show that the scheduling model and algorithm of bi-level programming are feasible and the ADN system with multi-microgrid is more economical. When the wind/sun output fluctuates, the lower model can still be locally adjusted and optimized to reduce the influence of microgrid fluctuation on the ADN system and improve the reliability and robustness of the system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61364027) and Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2019GXNSFAA185011).

Key words: multi-microgrid; active distribution network; bi-level programming; optimal power flow; second-order cone relaxation technique; improved GA

0 引言

随着环境污染问题的加剧, 且电力系统中负荷

不断增加, 传统的配电网供电已经不能更好满足新形势下的负荷需求。微电网作为新型能源供电, 可以并入配电网系统形成主动配电网(ADN)满足供电需求^[1]。ADN 系统通过网络拓扑结构实现对潮流的控制, 实现对局部的分布式电源(Distributed Energy Resource, DER)进行管理和控制^[2], 使 ADN 系统与

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61364027); 广西自然科学基金面上项目资助(2019GXNSFAA185011)

DER 协调至稳定运行。微电网并入主动配电网系统的供电模式将是未来构建智能电网的关键,对电力行业的发展有重要意义^[3]。

目前国内外学者已从不同方向对多微网并入主动配电网展开研究,其中包括能量管理、源网规划应用、控制方式等。文献[4]针对含多微网的 ADN 系统分散自治特性,提出一种基于目标级联分析理论的调度模型和优化求解算法。文献[5]从多微网能量管理角度分析,提出基于多代理系统的 ADN 多源协调优化调度方法,但未考虑风/光/负荷的随机性对 ADN 系统优化调度的影响。文献[6]研究多微网互联系统的能量管理,考虑含风光不确定的微电网能量管理系统鲁棒优化模型,并采用列约束生成算法求解模型。文献[7]考虑多微网间电能交互作用,提出一种基于微网间电能交互的冷热电供联型多微网系统经济优化调度模型及调度策略。文献[8]为提高多个微电网相互支援能力,提出高可再生资源渗透率下的区域多微网系统优化规划法,并采用免疫遗传算法对微网中的能源进行优化配置。文献[9]从集中式和分布式控制的角度,分析了主动配电网的无功功率控制方法,但未对系统经济优化分析。文献[10]针对主动配电网中各区域可控资源不均衡、区域自治性能差,提出基于区域自治能力的 ADN 分层调度模型及最优条件分解理论实现分层求解。文献[11]为保证多微网并网后,ADN 系统可以安全可靠运行,提出一种基于配微网交互功率控制和竞价交易策略的多微网双层模型。文献[12]考虑微电网并网时对 ADN 系统稳定性的影响,提出一种基于动态电价的主动配电网分层优化调度模型及求解算法。文献[13]针对多微网并入主动配电网优化调度中系统可靠性降低、弃风弃光大的问题,提出一种基于两层嵌套的优化调度模型并采用改进粒子群算法求解该模型。

但上述文献对含多微网的 ADN 系统优化调度分析中,缺少对 ADN 系统的潮流问题进行研究,ADN 系统的有功和无功潮流优化问题会对 ADN 系统和多微网间的协调运行及含多微网的 ADN 系统可靠性造成影响。

多微网并入主动配电网时采用全网一起优化调度,发现微电网中一旦风、光出力出现波动,将不易求解得到系统的最优解或系统收敛性能降低甚至出现无解的情况。为有效解决并入多微网后其不确定性带来的问题以及优化求解时精度降低、收敛效果不佳等问题,本文考虑 ADN 系统的潮流约束及多微网与 ADN 系统间的耦合关系,提出双层优化调度模型。模型中针对微电网内可再生能源出力和

负荷功率的不确定性,本文取某地区微电网内风/光出力及负荷的实际值和预测值(在误差允许范围内)进行分析。

双层模型中上层以 ADN 系统为研究对象,将并入的微电网看作电源,考虑 ADN 系统的网络拓扑结构中潮流平衡约束,以系统网损最小为优化目标建立 ADN 系统最优潮流模型。下层以微电网系统为研究对象,针对微电网中不确定因素(风力、光伏及负荷)取实际值进行优化调度(假设风光及负荷的实际值是以预测值的-10%~10%进行波动),考虑微电网系统功率平衡、上层优化的联络线功率及可控电源出力特性等约束,以微电网运行成本最低为优化目标,建立并网微电网内可控电源的动态优化调度模型。上/下层通过公共联络线(Point of Common Coupling, PCC)进行功率的协调,使上/下层系统均满足最优运行状态。上层模型的求解是采用二阶锥松弛技术将非凸非线性的最优潮流模型转化为凸可行域的二阶锥规划模型,再调用 Gurobi 求解器求 ADN 系统最优潮流分布;下层模型的求解是采用结合了 Tent 映射混沌和 NDX 交叉算子技术的改进遗传算法,分别求出各微电网的运行成本及可控电源出力。

1 基于双层规划的多微网并网调度策略

多个微电网并入主动配电网后,ADN 系统由简单有源网络变为交直流混合的有源网络,微电网的并入位置与容量大小均会影响 ADN 系统的网损;并且改变 ADN 系统中潮流分布,可能使潮流的流向由单向流动变为双向流动,同时增加了 ADN 系统优化调度的难度。基于上述影响因素,本文提出一种基于双层规划的多微网并网优化调度模型。经过仿真算例的验证,在此模型下进行 ADN 系统的优化调度,可以降低求解难度,增加系统的鲁棒性。双层规划模型中上/下层间的联络线功率是决定 ADN 系统调度策略及稳定运行的关键因素。

1.1 多微网并网的主动配电网系统

含多微网的 ADN 系统调控框架如图 1 所示。多微电网并入 ADN 系统后,由于微电网具有自治特性,可以作为可调单元。ADN 系统可通过 PCC 对并网后的多微网进行能量管理与优化调度,实现两者间的协调运行。含多微网的 IEEE33 节点 ADN 系统的网络拓扑结构如图 2 所示。其中并入的微电网主要由风力发电机(Wind Turbines, WT)、光伏发电机(Photovoltaic arrays, PV)、柴油机(Diesel Engine, DE)、微型燃气轮机(Micro Turbine, MT)和由蓄电池(Storage Battery, SB)组成的储能装置及负荷等构成,

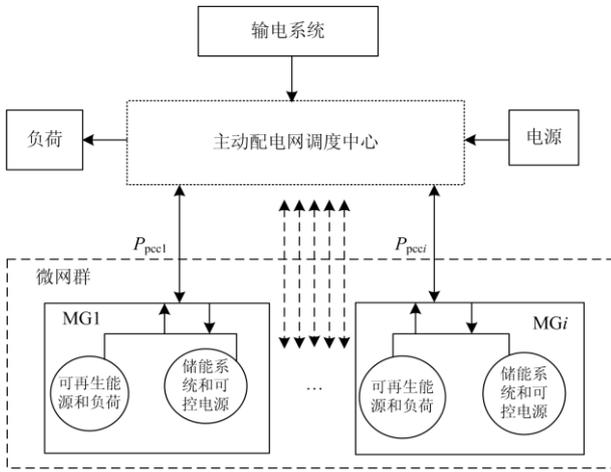


图 1 含多微网的主动配电网调控框架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the active distribution network regulation framework with multi-microgrid

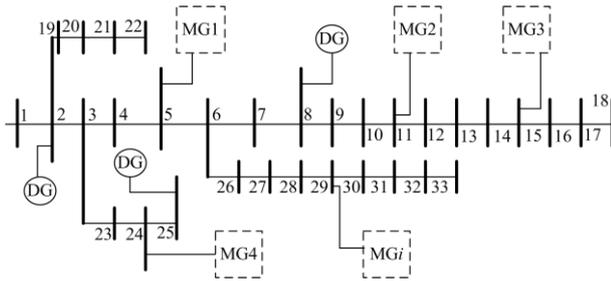


图 2 含多微网的 IEEE33 节点 ADN 系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of IEEE33 node ADN system with multi-microgrid

且可控电源包括 DE、MT 和 SB。

1.2 基于双层规划的 ADN 系统优化调度策略

双层规划^[14]是 Stackelberg 博弈模型的延伸, 适用于含不同决策者的系统, 同时上/下层存在主从关系, 需考虑决策者的利益来实现整体效益最佳。该理论方法的提出, 可以较好解决多个不同主体的利益冲突问题, 使系统处于最佳利益状态, 该方法已经被广泛应用于各类复杂模型求解中。

本文借鉴双层规划理论方法, 将并入多微网的 ADN 系统分为上、下层进行研究, 采用不同的优化调度方法求最优潮流解。其中 ADN 系统的优化调度是以上层优化出的联络线功率来制约下层的最优经济调度为主要思路, 通过智能优化算法及调度策略, 实现最优经济运行, 同时使得整体的经济效益最佳。在双层规划的多微电网优化调度模型中, 上层模型以 ADN 系统潮流平衡为约束, 对 ADN 系统中发电机组的出力和 PCC 的功率进行最优调度, 实现 ADN 系统网损最小。下层模型是以上层

优化出的联络线功率为约束, 通过对微电网中可控电源及蓄电池的有效调节, 使互联的多微网经济效益达到最佳。

2 双层优化调度的模型

2.1 主动配电网的优化调度模型

上层模型是并入了多个微电网的 ADN 系统, 该系统构成了新的网络拓扑结构。在满足潮流约束和其他出力约束下, 以系统网损最小为目标建立最优潮流模型, 并通过相应算法求系统的最优潮流解。

2.1.1 目标函数

ADN 系统中以系统的网损最小为目标函数, 同时尽可能降低 ADN 系统的运行成本。其目标函数及各机组发电成本函数^[15]的数学模型如下。

$$P_{\text{all,loss}} = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^L P_{\text{loss},i,t} \quad (1)$$

$$P_{\text{loss},i,t} = P_{g,i,t} - P_{\text{load},i,t} \quad (2)$$

$$F_{g,i} = a_i P_{g,i,t}^2 + b_i P_{g,i,t} + c_i \quad (3)$$

式(1)中: $P_{\text{all,loss}}$ 为调度周期内 ADN 系统的网损; T 为调度时间; L 为 ADN 系统中节点总数; $P_{\text{loss},i,t}$ 为 t 时段 i 节点的功率损耗。式(2)中: $P_{g,i,t}$ 为 t 时段 i 节点处发电机的输出功率; $P_{\text{load},i,t}$ 为 t 时段 i 节点处负荷的有功功率。式(3)中: $F_{g,i}$ 为 ADN 系统中 i 节点处发电机的发电成本; a_i 、 b_i 、 c_i 分别为 i 节点处发电机的耗量特性参数。

2.1.2 约束条件

1) 系统的潮流约束

$$\begin{cases} U_{i,t} \sum_{j=1}^L U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) - \\ P_{g,i,t} - P_{\text{mg},i,t} + P_{\text{load},i,t} = 0 \\ U_{i,t} \sum_{j=1}^L U_{j,t} (B_{ij} \cos \theta_{ij,t} - G_{ij} \sin \theta_{ij,t}) - \\ Q_{g,i,t} - Q_{\text{mg},i,t} + Q_{\text{load},i,t} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{g,i,t}$ 、 $Q_{g,i,t}$ 分别为 t 时段 ADN 系统中第 i 节点发电机所发出的有功功率、无功功率; $P_{\text{mg},i,t}$ 、 $Q_{\text{mg},i,t}$ 分别为 t 时段第 i 节点处并入的微电网输出的有功功率、无功功率; $P_{\text{load},i,t}$ 、 $Q_{\text{load},i,t}$ 分别为 t 时段第 i 节点处负载消耗的有功、无功功率; $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 分别为 t 时段第 i 节点和第 j 节点处的电压幅值; G_{ij} 为 ij 线路之间的电导; B_{ij} 为 ij 线路间的电纳; $\theta_{ij,t}$ 为 t 时段节点 i 与节点 j 处电压的相角差。

2) ADN 系统安全运行的约束

$$\begin{cases} \underline{P}_{g,i,t} \leq P_{g,i,t} \leq \overline{P}_{g,i,t} \\ \underline{Q}_{g,i,t} \leq Q_{g,i,t} \leq \overline{Q}_{g,i,t} \\ \underline{U}_{i,t} \leq U_{i,t} \leq \overline{U}_{i,t} \\ |U_{i,t}^2 G_{ij} - U_{i,t} U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})| \leq P_{ij,max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\overline{P}_{g,i,t}$ 、 $\underline{P}_{g,i,t}$ 分别为 t 时段第 i 节点处发电机有功输出的上限、下限; $\overline{Q}_{g,i,t}$ 、 $\underline{Q}_{g,i,t}$ 分别为 t 时段第 i 节点处发电机无功输出的上限、下限; $\overline{U}_{i,t}$ 、 $\underline{U}_{i,t}$ 分别为 t 时段节点 i 电压幅值上限、下限; $P_{ij,max}$ 为 ij 支路所能承受的最大功率。

3) 公共联络线的功率约束

$$P_{pcc,min} \leq P_{pcc,i,t} \leq P_{pcc,max} \quad (6)$$

式中: $P_{pcc,i,t}$ 为 t 时段节点 i 处微电网与主动配电网之间的公共联络线功率; $P_{pcc,max}$ 、 $P_{pcc,min}$ 分别为联络线传输的最大功率、最小功率。从配电网层来考虑, 联络线功率 $P_{pcc,i,t}$ 可以等效为虚拟负荷或电源; 从微电网层来考虑, $P_{pcc,i,t}$ 可以等效为虚拟电源或负荷。

2.2 微电网的优化调度模型

下层模型是将微电网系统作为研究对象, 考虑系统的功率平衡、上层优化的联络线功率及可控电源出力特性等约束, 以微电网运行成本最低为优化目标, 建立并网微网内可控电源的动态调度模型。在微电网优化调度过程中, 考虑风光出力全部被消纳且以风光出力和负荷功率的实际值为输入, 通过调节可控电源的出力, 进而抑制微电网内间歇性电源及负荷的随机波动, 维持微电网内功率平衡与供电可靠性, 实现微电网最优经济调度。

2.2.1 可控电源模型

1) 微型燃气轮机(MT)具有机组运行稳定、占地面积小等优点。假设 MT 的微燃机、溴冷机排烟温度始终保持不变, 其燃料耗量特性数学模型^[16]为

$$V_{mt} = \sum P_{mt} \Delta t / (\eta_{mt} \cdot L_g) \quad (7)$$

式中: V_{mt} 为天然气消耗量; Δt 为时间间隔; P_{mt} 为 MT 的出力; L_g 为天然气低位热值; η_{mt} 为 MT 的发电效率。

2) 柴油发电机(DE)在微网系统中作为重要的发电单元, 其发电特性可采用二次函数模型^[17]表示。

$$V_{de} = \alpha(P_{de})^2 + \beta P_{de} + \gamma \quad (8)$$

式中: V_{de} 为 DE 的耗油量; P_{de} 为 DE 的输出功率; α 、 β 、 γ 分别取 2.666 7、0.163 7 和 0.000 15。

3) 蓄电池(SB)是一种储能单元, 可起到削峰填谷和抑制不平衡功率的作用。本文假设 SB 在各阶段充/放电功率保持稳定且忽略温度的变化, 主要考虑 SB 在 t 时刻的荷电状态(State of Charge, SOC) 与 $t-1$ 时刻的荷电状态及 SB 的充/放电特性有关^[18], SOC 充/放电过程的数学模型如下。

充电过程为

$$SOC_t = SOC_{t-1}(1 - r_{self-dis}) - P_{sb,t} \Delta t \cdot \eta_{ch} / E_{sb} \quad (9)$$

放电过程为

$$SOC_t = SOC_{t-1}(1 - r_{self-dis}) - P_{sb,t} \Delta t / \eta_{dis} E_{sb} \quad (10)$$

式中: Δt 为相邻时段差; SOC_t 为 t 时段荷电量; $P_{sb,t}$ 为 t 时段 SB 充/放电功率, 其中放电时为正值(反之为负值); η_{ch} 为 SB 的充电效率; η_{dis} 为 SB 的放电效率; $r_{self-dis}$ 为 SB 的自放电率; E_{sb} 为 SB 装机容量。

2.2.2 目标函数

下层模型以各微电网的运行成本最低为目标函数(主要包括可控电源运行总成本、蓄电池充/放电折旧成本), 其数学模型为

$$F_{wei} = \min \sum_{t \in T_s} (C_{Sg,t} + C_{dep,t}) \quad (11)$$

式中: F_{wei} 为并入的所有微电网运行成本; T_s 为调度周期(本文取为 24 h); $C_{Sg,t}$ 为 t 时段并入的所有微电网内可控电源的运行成本; $C_{dep,t}$ 为 t 时段并入所有微电网内的蓄电池充/放电过程中产生的折旧成本。其中 $C_{Sg,t}$ 、 $C_{dep,t}$ 的成本函数表达式如下文所述。

$$C_{Sg,t} = \sum_{m \in W_E} \sum_{l \in S_G} (C_{op,l,t,m} + C_{fu,l,t,m} + C_{st,l,t,m}) \quad (12)$$

式中: W_E 为微电网的个数; S_G 为可控电源的个数; $C_{op,l,t,m}$ 、 $C_{fu,l,t,m}$ 和 $C_{st,l,t,m}$ 分别为 t 时段微电网 m 内可控电源 l 的运行维护成本、燃料成本和机组启动成本, 其函数表达式分别为

$$\begin{cases} C_{op,l,t,m} = D_{l,t} K_{op,l} P_{l,t} \\ C_{fu,l,t,m} = D_{l,t} K_{fu,l} \cdot V_{fu,l}(P_{l,t}) \\ C_{st,l,t,m} = D_{st,l,t} K_{st,l} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{l,t}$ 分别为 t 时段微电网内可控电源 l 的输出功率; $D_{l,t}$ 表示 t 时段可控电源 l 的工作状态(若 $D_{l,t}$ 为 1 表示工作状态, 为 0 则停止); $D_{st,l,t}$ 表示 t 时段可控电源 l 开启状态($D_{st,l,t}$ 为 1 表示可控电源启动); $K_{op,l}$ 、 $K_{fu,l}$ 、 $K_{st,l}$ 分别为可控电源 l 运行维护的成本系数、燃料价格系数和启动成本系数; $V_{fu,l}(P_{l,t})$ 为 t 时段可控电源 l 的燃料消耗量。

$$C_{dep,t,m} = P_{sb,t} \cdot \zeta(P_{sb,t}) \quad (14)$$

式中: $P_{sb,t}$ 为 t 时段微电网内 SB 充放电功率; $\zeta(P_{sb,t})$ 为 t 时段 SB 充放电的折旧系数。

2.2.3 约束条件

1) 微电网系统的功率平衡

$$\sum_{l \in S_G} P_{l,t} + P_{sb,t} + P_{pcc,t} = P_{mg,load,t} - P_{pv,t} - P_{wt,t} \quad (15)$$

式中: $P_{l,t}$ 、 $P_{sb,t}$ 、 $P_{pcc,t}$ 、 $P_{mg,load,t}$ 、 $P_{pv,t}$ 、 $P_{wt,t}$ 分别为 t 时段可控电源 l 出力、蓄电池充放电功率、联络线功率、微网的负荷功率、光伏机组的出力、风力发电机组的出力。其中联络线功率作如下规定: 若 $P_{pcc,t}$ 为负数, 表示此时段微电网中负荷吸收等值功率, 反之则是微电网中电源需发出等值功率。

2) 分布式电源的功率约束

$$P_{l,\min} \leq P_{l,t} \leq P_{l,\max} \quad (16)$$

式中: $P_{l,t}$ 为 t 时段可控电源 l 发出的有功功率; $P_{l,\max}$ 、 $P_{l,\min}$ 分别为可控电源 l 发出的最大有功功率、最小有功功率。

3) 可控电源的爬坡约束

$$\begin{cases} P_{l,t} - P_{l,t-1} \leq R_{up,l} \Delta t \\ P_{l,t-1} - P_{l,t} \leq R_{down,l} \Delta t \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{l,t}$ 、 $P_{l,t-1}$ 分别为可控电源 l 在 t 、 $t-1$ 时段的有功出力; $R_{up,l}$ 、 $R_{down,l}$ 分别为可控电源 l 最大爬坡上升率、下降率; Δt 为相邻时间间隔。

4) 可控电源的启停时间约束

$$\begin{cases} D_{st,l,t} + \sum_{y=1}^{L_{st,l}} (1 - D_l^{t-L_{st,l}+y-1}) \leq 1 \\ D_{stp,l,t} + \sum_{y=1}^{L_{stp,l}} D_l^{t-L_{stp,l}+y-1} \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $L_{st,l}$ 、 $L_{stp,l}$ 分别表示可控电源 l 启动、停机时间的最小总长度值; $D_{st,l,t}$ 、 $D_{stp,l,t}$ 分别为可控电源 l 的不同工作状态(其中 $D_{stp,l,t} = 1$ 表示在 t 时刻停机, $D_{st,l,t} = 1$ 表示 t 时刻启动)。

5) 蓄电池充/放电约束

本文储能单元由蓄电池构成, 而蓄电池组过充和过放都会对电池寿命造成影响, 因而需考虑其充放电的荷电量状态^[19], 它应满足如下函数表达式。

$$SOC_{\min} \leq SOC_t \leq SOC_{\max} \quad (19)$$

式中, SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 分别为蓄电池最低荷电量、最高荷电量, 文中其值分别取 0.2、0.9。蓄电池组长期运行在过大的功率环境下, 会对其使用寿命造成影响, 所以对各时段充放电功率也进行约束。

$$\begin{cases} -\min\{P_{ch,\max}, P_{ch,sup,t}\} \leq P_{ch,t} \leq 0 \\ 0 \leq P_{dis,t} \leq \min\{P_{dis,\max}, P_{dis,sup,t}\} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{ch,\max}$ 、 $P_{dis,\max}$ 分别为蓄电池充/放功率的最大值, 均取为 $0.2E_{sb}/h$; $P_{ch,sup,t}$ 、 $P_{dis,sup,t}$ 分别为 t 时段末蓄电池的荷电量提供的最大充/放功率, 其数学模型为^[20]

$$\begin{cases} P_{ch,sup,t} = E_{sb}(SOC_{\max} - SOC_t)/\Delta t \\ P_{dis,sup,t} = E_{sb}(SOC_t - SOC_{\min})/\Delta t \end{cases} \quad (21)$$

式中, E_{sb} 为蓄电池装机总容量。

3 双层规划的优化调度模型求解

3.1 上层模型的求解算法

上层模型的求解属于电力系统中复杂的非线性潮流优化问题且呈非凸性, 传统求解方法难以获得全局最优解。本文采用二阶锥松弛技术^[21]将含多微网的主动配电网系统的潮流方程及其他相关的等式约束或不等式约束转化为线性的二阶锥规划(Second-order Cone Programming, SOCP)方程, 再通过 Gurobi 求解器进行最优潮流的求解。

3.1.1 二阶锥的标准形式

SOCP 主要被用于求线性目标函数的最小值问题。其函数的可行域包括了线性等式、线性不等约束、旋转锥或二阶锥不等式约束^[22], 其标准形式为

$$\begin{cases} \min F(x) \\ \text{s.t. } Ax = S, x \in G \end{cases} \quad (22)$$

式中: $F(x)$ 为目标函数; $Ax = S$ 是线性等式约束; $x \in \mathbf{R}^n$, $A \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $S \in \mathbf{R}^m$, n 、 m 分别为实数组 \mathbf{R} 的维数和阶数; G 为二阶锥约束, 锥规划的基本形式有二阶锥和旋转二阶锥两种形式^[22], 本文上层的非凸非线性最优潮流模型是将其转换为锥规划中的二阶锥形式, 得到对应的线性潮流模型再通过 Gurobi 求解器求出系统的最优潮流解。

3.1.2 二阶锥最优潮流模型

上层最优潮流模型是采用二阶锥松弛技术对模型进行转换, 将非线性模型转化为线性潮流模型。系统的非凸非线性特性可表示为

$$\begin{cases} e_i^2 + f_i^2 = |U_i|^2 \\ e_i e_j + f_i f_j = |U_i| |U_j| \cos \theta_{ij} \\ e_i f_j - e_j f_i = |U_i| |U_j| \sin \theta_{ij} \end{cases} \quad (23)$$

式中: e_i 、 f_i 为节点 i 处电压向量的实部与虚部; e_j 、 f_j 为节点 j 处电压向量的实部与虚部; θ_{ij} 为节点 i 、 j 之间的相角差。对于每个节点而言重新定义变量

λ_{ii} 、 λ_{ij} 及 δ_{ij} ，且各变量之间必须满足如下关系式。

$$\begin{cases} \delta_{ij} = e_i f_j - e_j f_i \\ \lambda_{ii} = e_i^2 + f_i^2, \lambda_{ij} = e_i e_j + f_i f_j \\ \lambda_{ij}^2 + \delta_{ij}^2 = \lambda_{ii} \lambda_{jj} \end{cases} \quad (24)$$

根据新定义的变量，对原主动配电网的最优潮流模型进行等价变换，进行相应转化后 ADN 系统的最优潮流模型包括如下方程式。

$$\begin{cases} G_{ii} \lambda_{ii} + \sum_{j \in \Omega(i)} (G_{ij} \lambda_{ij} - B_{ij} \delta_{ij}) = \\ \quad P_{g,i} + P_{mg,i} - P_{load,i} \\ B_{ii} \lambda_{ii} - \sum_{j \in \Omega(i)} (-B_{ij} \lambda_{ij} - G_{ij} \delta_{ij}) = \\ \quad -Q_{g,i} - Q_{mg,i} + Q_{load,i} \\ |(\lambda_{ii} - \lambda_{jj}) G_{ij} + \delta_{ij} B_{ij}| \leq P_{ij,max} \\ \lambda_{ij} = \lambda_{ji} \quad \delta_{ij} = -\delta_{ji} \\ \lambda_{ij}^2 + \delta_{ij}^2 + \left(\frac{\lambda_{ii} - \delta_{jj}}{2} \right)^2 \leq \left(\frac{\lambda_{ii} + \delta_{jj}}{2} \right)^2 \end{cases} \quad (25)$$

式中， $\Omega(i)$ 表示以 i 为末端节点的新支路的末端节点集合。转换为二阶锥规划模型后，使用 Matlab 软件工具编写与该模型方程式对应的程序，再运用 Gurobi 求解器求解最优潮流分布。分别求出主动配电网系统中的网损、各机组输出功率、各节点电压幅值及微网与配电网间的联络线功率。

3.2 下层模型的求解算法

下层模型的优化求解问题是复杂的非线性动态优化问题，传统遗传算法难以求得该模型全局最优解，因此本文提出一种改进遗传算法求解该模型，改进遗传算法^[23]中主要有两部分的改进。步骤 1：对多目标形成的种群引入 Tent 混沌映射来初始化。步骤 2：将交叉操作修改为 NDX 算子，再进行新的交叉操作^[24]。改进 GA 算法求解模型可以更好地避免陷入局部解，使得优化结果更加精准，具体求解流程如图 3 所示。

3.2.1 Tent 混沌映射的构成

Tent 映射是分段线性映射技术，其映射具有遍历性、均匀概率密度等特征，本文利用其混沌映射具有相空间遍历性的特点对种群初始化，寻优过程中个体更具多样性，其函数表达式为

$$H(v_x) = \begin{cases} 2v_x, & 0 \leq v_x \leq 0.5 \\ 2(1-v_x), & 0.5 < v_x \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

式中， v_x 为第 x 次混沌迭代点。在 Tent 迭代序列中会出现不满足条件的序列，此时需通过小值扰动方式使迭代序列回到混沌迭代状态。式(27)种群内的

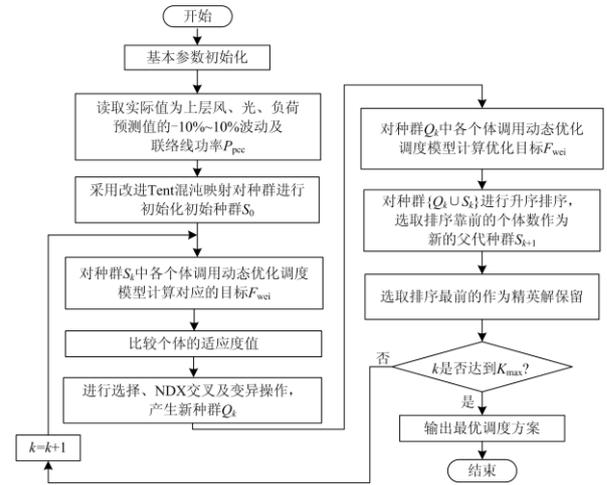


图 3 改进遗传算法的流程图

Fig. 3 Flow chart of improved GA algorithm

染色体会生成一个混沌序列 σ ，并将该混沌序列映射到决策变量的区间内，此时区间中的第 i 个 a 染色体第 j 维分量需满足如下函数关系式。

$$a_{i,j} = a_{i,j}^{\min} + (a_{i,j}^{\max} - a_{i,j}^{\min}) \cdot \sigma_{i,j} \quad (27)$$

3.2.2 交叉 NDX 算法的构建

传统的 NSGA-II 算法中交叉操作是模拟二进制交叉，搜索范围受限且易陷入局部最优解。为增强算法全局搜索性能，求得全局最优解。本文采用正态分布交叉 NDX 算子进行交叉操作，函数方程为

$$\begin{cases} b_{1,j} = (a_{1,j} + a_{2,j}) / 2 \pm \\ \quad 1.481 \cdot |N(0,1)| \cdot (a_{1,j} - a_{2,j}) / 2, \quad r \leq 0.5 \\ b_{2,j} = (a_{1,j} + a_{2,j}) / 2 \mp \\ \quad 1.481 \cdot |N(0,1)| \cdot (a_{1,j} - a_{2,j}) / 2, \quad r > 0.5 \end{cases} \quad (28)$$

式中： $a_{1,j}$ 和 $a_{2,j}$ 为第 j 维分量上的两个父代染色体； $b_{1,j}$ 和 $b_{2,j}$ 为父代交叉操作后在第 j 维分量上产生的子代染色体； r 在区间(0,1)上均匀分布； $N(0,1)$ 为标准正态分布的变量。

3.3 双层优化调度模型的求解流程

上层模型 ADN 系统中以多微网的预测出力上/下限、配电网的网络拓扑结构参数及其他机组出力范围为输入数据，根据 ADN 系统的最优潮流模型并采用 Gurobi 求解器，求出系统最优潮流分布。包括：ADN 系统的网损、各机组出力、节点电压及 PCC 功率。下层模型以 PCC 功率为约束，建立并网微电网内可控电源的动态调度模型，采用改进遗传算法对微网内的可控机组(DE、MT、SB 等)进行优化调度。优化求解过程中，如果上层和下层模型均有解，则循环运行至调度周期末，将各时段上/

下层最优调度的结果输出; 如果求解过程中出现不收敛的情况, 此时根据需要返回至初始位置修改多微网出力上下限, 即调整 PCC 功率的上下限, 直到满足收敛条件; 上/下层模型均收敛时才可求出主动配电网系统的最优潮流解及多微网可控机组最佳出力。基于最优潮流的双层优化调度模型求解流程如图 4 所示。

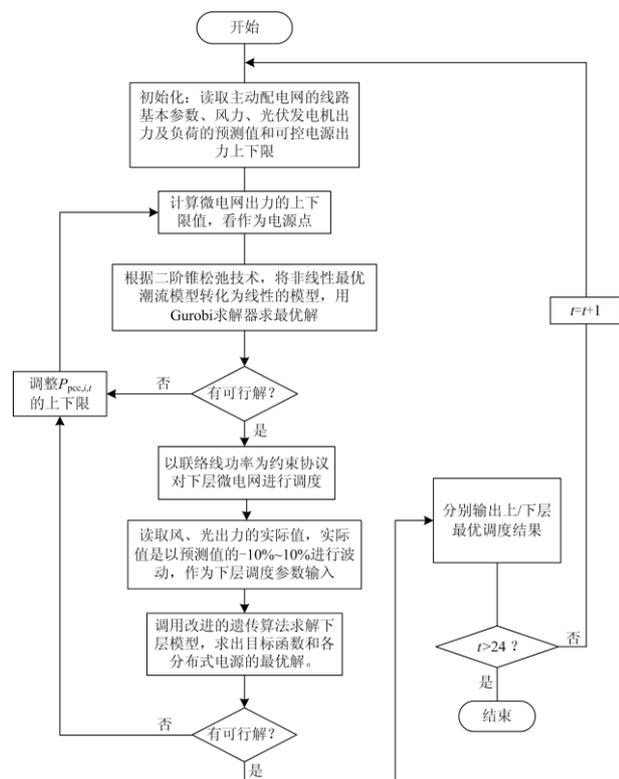


图 4 双层调度模型求解流程图

Fig. 4 Bi-level scheduling model solution flow chart

4 数据分析

为验证含多微网的主动配电网双层优化调度模型的有效性。本文以改进的 IEEE33 节点主动配电网系统为仿真算例进行分析, 且该算例的系统中含有两个微电网, 分别对应于系统网络拓扑结构中的节点 14 和节点 28。节点 14 并入微电网 1, 节点 28 并入微电网 2, 含多微网的主动配电网系统结构如图 5 所示。

4.1 算例的基本参数

主动配电网系统中网络拓扑结构数据参考文献[25], ADN 系统中各机组的特性参数及出力范围见表 1 和表 2。并入的两个微电网主要由光伏发电机(装机容量为 100 kW)、风力发电机(装机容量 100 kW)、柴油发电机(装机容量 150 kW)、微型燃气轮机(装机

容量 250 kW)以及 200 kWh 容量的蓄电池构成。其中 SB 充/放电效率均为 92%, SB 中的荷电状态以百分数表示且初值为 50%, 其上/下限分别为 90% 和 20%, 天然气单价为 2.08 元/m³, 柴油单价为 7.19 元/kg, DE 与 MT 技术参数如表 3 所示。本文并入的微电网不考虑其在联络线上的网损和内部损耗, 且风/光输出功率全部被消纳。

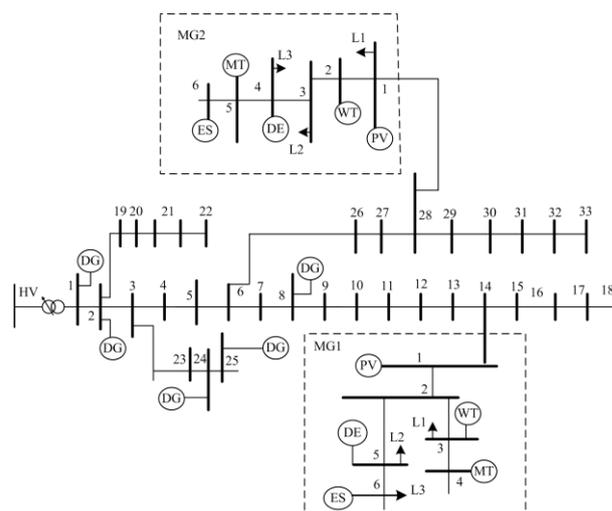


图 5 含多微网的主动配电网结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of active distribution network with multi-microgrid

表 1 ADN 系统中各机组的特性参数

Table 1 Characteristic parameters and output range of each unit in the ADN system

节点	机级系数		
	a	b	c
1	0.017	7.25	10
2	0.044	4.00	10
8	0.045	6.00	15
24	0.036	5.00	18
25	0.028	3.75	18

表 2 ADN 系统中各机组出力的上/下限

Table 2 Upper/lower limit of unit output in ADN system

节点	机组出力	
	P _{min} /kW	P _{max} /kW
1	200	2 000
2	300	1 500
8	300	1 200
24	100	1 500
25	100	1 500

表 3 可控电源技术参数

Table 3 Controllable power supply technical parameters

可控电源	电源出力/kW		运维系数/(元/kWh)	最小运行时间/h	最小停机时间/h	启动成本/元	电源的爬坡率/kW		
	下限	上限					上升率	下降率	
	DE	5	150	0.080	9	1.25	2.15	3.2	120
MT	15	250	0.040	1	2.17	2.20	5.1	120	160

算例仿真以 24 h 为一个调度周期, 选取配电网系统的线路基本参数及负荷预测值, 其负荷预测值为某地区一天内的负荷需求。而各微电网中以未来 24 h 内的风、光、负荷预测数据作为预测值, 实际值允许误差为预测值的-10%~10%上下波动。下层模型中改进遗传算法的参数设置: 种群大小为 200、迭代次数最大值 $K_{max}=300$ 、交叉操作的概率为 0.92、发生变异的概率为 0.15。

ADN 系统中并入的两个微电网的负荷预测值不同。其中微电网 1 中负荷预测最大值为 179 kW, 微电网 2 中负荷预测最大值为 129 kW; 微电网中风机、光伏的预测最大出力分别为 46 kW 和 35 kW。不可控因素的预测值如图 6 所示, 图中 MG1 表示微电网 1, MG2 表示微电网 2。

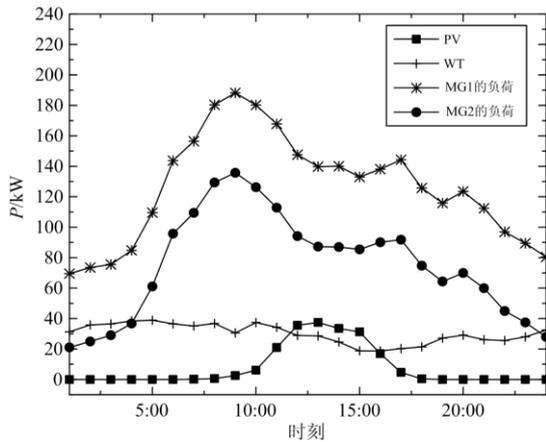


图 6 风、光及负荷的预测曲线

Fig. 6 Predictive output of wind, sun and load

4.2 结果与分析

采用 Gurobi 求解器分别求出 ADN 系统中各机组出力、联络线功率及网损等。各机组出力如图 7 所示, 其中负荷预测最大值为 3.57 MW。联络线功率如图 8 所示, 联络线最大传输功率为 0.30 MW。

由图 7 可以看出: 主动配电网日调度过程中, 负荷需求主要由各机组出力供给; 为有效利用可再生能源, 并入的微电网也提供部分功率, 进而降低 ADN 系统的网损; 节点 8 和节点 25 处机组输出功率紧跟负荷需求变化, 节点 1、2、24 处机组出力始

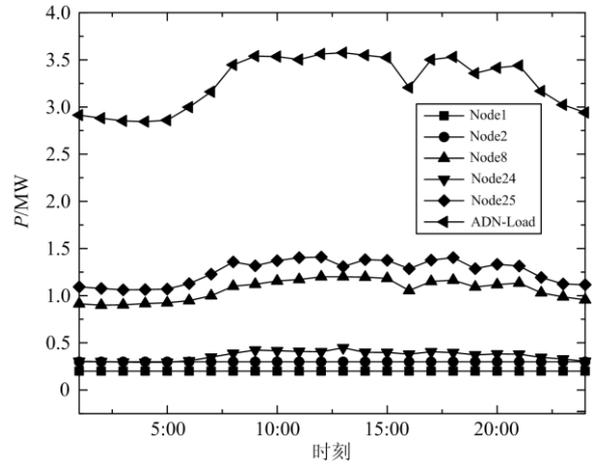


图 7 ADN 系统中机组出力及负荷功率

Fig. 7 Output and load power of each unit in ADN system

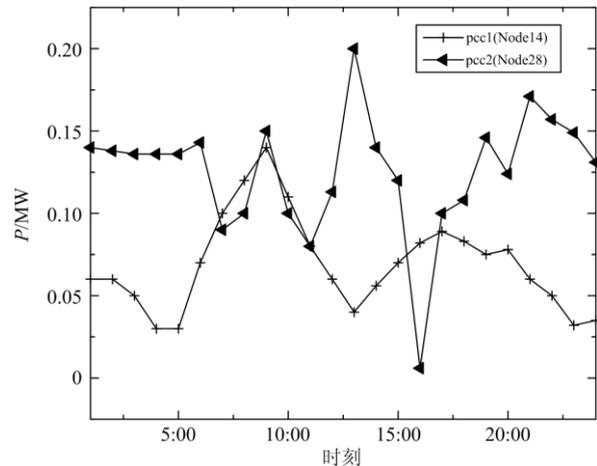


图 8 ADN 系统中联络线输出功率

Fig. 8 Contact line output power in ADN system

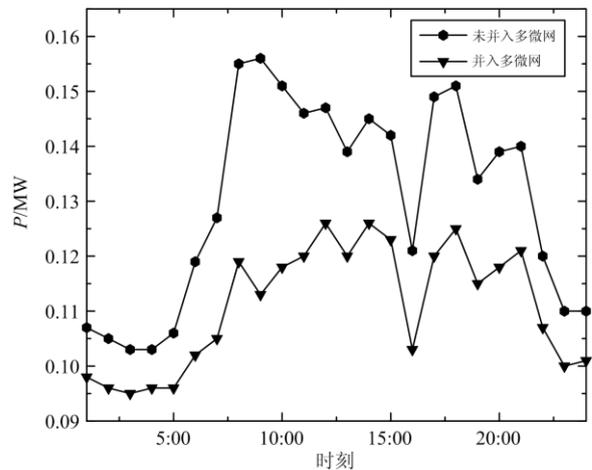


图 9 ADN 系统的网损

Fig. 9 Network loss of ADN system

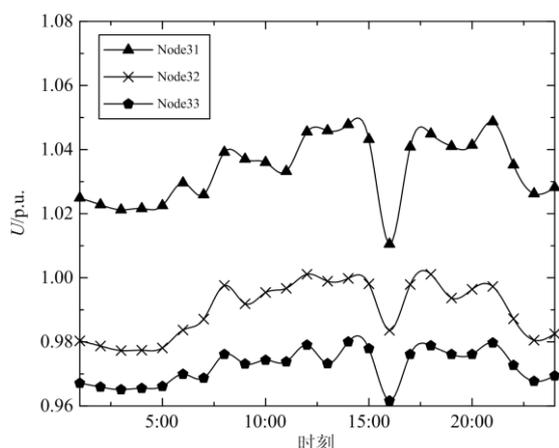


图 10 ADN 系统中远端节点电压的标么值

Fig. 10 Voltage per unit at remote node in ADN system

始终保持其下限。由图 8 可以看出：联络线功率的输出可降低其他机组的出力，用于协调网络的潮流平衡，实现对可再生能源最大化的利用。由图 9 和图 10 可以看出：并入多个微网后，主动配电网系统的网损降低了，ADN 运行的经济效益提高了，同时远端节点电压幅值均在允许范围内，验证了上层的优化调度算法具有较好的经济性和可靠性。

ADN 系统中节点 14 处微电网 1 的调度结果如图 11 所示，节点 28 处的微电网 2 调度结果如图 12 所示，各微电网在满足上层联络线功率要求的情况下，优化调度各可控电源出力，整个过程中各微电网内不存在切机切荷情况。

由图 11 和图 12 可以看出：由于并入的微电网负荷需求远小于主动配电网中的负荷需求，联络线功率始终保持为正值(微电网供电)。在微电网总容量足够大的条件下，为满足联络线功率约束，微电网通过对可控电源及蓄电池组出力进行调度，使微

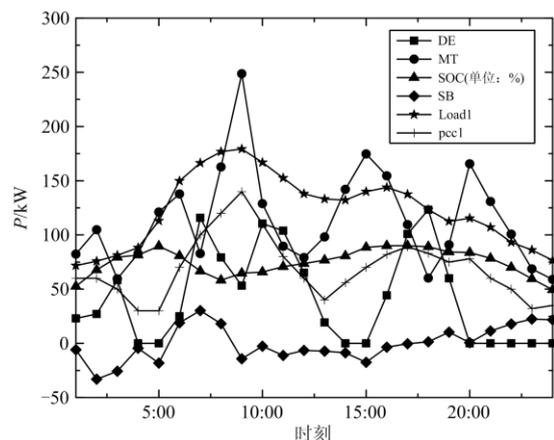


图 11 MG1 调度的结果

Fig. 11 MG1 scheduling results

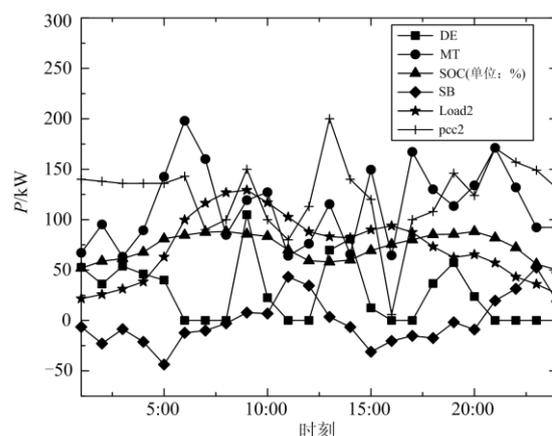


图 12 MG2 调度的结果

Fig. 12 MG2 scheduling results

电网运行成本最低。联络线功率约束及微电网中的负荷需求主要由可控电源、风机和光伏出力满足。当微电网中的电源装置出力不能满足负荷及联络线功率约束时，需调用储能装置进行供电，维持系统可靠运行；反之若出力过剩，则将多余功率存储至储能装置中。

为验证所提双层规划模型的含多微网的 ADN 系统经济性，将调度结果与未并入多微网的 ADN 系统调度情况进行对比。两类不同方式下 ADN 系统优化调度结果的经济成本对比如表 4 所示。表中未并入多微网是指多微网独立自治运行不接入配电网，两者之间的联络线开关没有接通，系统总成本包括 ADN 成本和多微网成本。

表 4 ADN 系统优化调度结果的经济性对比

Table 4 Economic comparison of optimal scheduling results of ADN system

主动配电网	ADN 网损/MW	多微网 总成本/元	系统 总成本/元
未并入多微网	3.125	5 434.78	89 874.78
并入多微网时	2.663	9 882.78	86 225.78

由表 4 可以看出：多微网并入 ADN 后，多微网自身运行总成本增加了，但 ADN 系统网损降低 17.34%，系统总成本是减少的。数据表明采用基于双层规划的调度模型求最优潮流，可以极大减少 ADN 系统的网损且降低 ADN 系统总成本。

5 结论

本文研究多微网并入 ADN 系统运行时，针对微网内部的不可控电源及负荷的波动对 ADN 系统运行的影响，采用基于双层规划的优化调度策略来分析 ADN 系统的运行特性。在上层模型中将并入

ADN 的多微网作为电源,其预测出力的上下限作为输入数据,优化出 ADN 系统的最优潮流,同时求出多微网处联络线功率;下层模型中以联络线功率为约束条件,对微网内可控机组进行优化;即使当风光出力波动时,下层优化模型仍然可以进行局部调整优化,从而降低了微电网的波动对 ADN 系统的影响。通过对联络线功率的优化控制,使得上/下层(配电网层与多微网层)能相互协调至各自运行于最优状态。以包含 2 个微网的修改 IEEE33 节点系统为算例验证了算法的可行性与有效性。通过与多微电网未参与调度的 ADN 系统相比发现,在确保系统稳定运行的情况下所提出的双层优化调度模型及求解算法,可降低 ADN 系统的网损,减少系统的总运行成本,增强系统的鲁棒性;同时更有效地利用微网内可再生能源,为未来大规模多微网并网供电提供一定的理论基础。

参考文献

- [1] 肖峻,李振生,张跃. 基于最大供电能力的智能配电网规划与运行新思路[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 8-14.
XIAO Jun, LI Zhensheng, ZHANG Yue. New ideas on planning and operation of intelligent distribution network based on maximum power supply capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 8-14.
- [2] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Study on feasible technology of active power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [3] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [4] 谢敏,吉祥,柯少佳,等. 基于目标级联分析法的多微网主动配电系统自治优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4911-4921.
XIE Min, JI Xiang, KE Shaojia, et al. Autonomous optimization of economic dispatch for multi-micro network active power distribution system based on objective cascade analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4911-4921.
- [5] BUI V, HUSSAIN A, KIM H. A multi-agent based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1323-1333.
- [6] 陈其森,汪湘晋,池伟,等. 多微电网互联系统能量管理方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 83-91.
CHEN Qisen, WANG Xiangjin, CHI Wei, et al. Research on energy management method of multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 83-91.
- [7] 徐青山,李淋,蔡霖霖,等. 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 36-46.
XU Qingshan, LI Lin, CAI Jilin, et al. Optimization of economic dispatch for a multi-microgrid system of cold and hot electricity considering electric energy interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 36-46.
- [8] 王守相,张齐,王瀚,等. 高可再生能源渗透率下的区域多微风系统优化规划方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 33-38, 52.
WANG Shouxiang, ZHANG Qi, WANG Han, et al. Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 33-38, 52.
- [9] ALI K M, MAJID N P, ME H, et al. Novel distributed active and reactive power management approach for renewable energy resource and loads in distribution network[J]. Transactions of Electrical Engineering, 2019, 6(12): 313-322.
- [10] 孟繁星,孙英云,蒲天骄,等. 考虑区域自治能力的主动配电网分层优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 70-76.
MENG Fanxing, SUN Yingyun, PU Tianjiao, et al. Hierarchical optimal dispatching of active distribution network considering regional autonomy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 70-76.
- [11] 何黎君,程杉,陈梓铭,等. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10-17.
HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming, et al. Two-layer optimal dispatching of multi-micro grid considering interactive power control and bilateral bidding transaction[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 10-17.
- [12] 胡晓通,刘天琪,刘舒,等. 基于动态奖惩电价的微电网与配网协调优化运行[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 33-40.

- HU Xiaotong, LIU Tianqi, LIU Shu, et al. Coordinated and optimized operation of micro-grid and distribution network based on dynamic incentive and punishment price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 33-40.
- [13] 李云龙, 田书, 马亚光. 含多微网的主动配电网分层优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 88-93.
- LI Yunlong, TIAN Shu, MA Yaguang. Hierarchical optimal dispatching of active distribution networks with multiple microgrids[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6): 88-93.
- [14] 周玮, 孙恺, 孙辉, 等. 基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 70-77.
- ZHOU Wei, SUN Kai, SUN Hui, et al. Bi-level optimization model for load supplying capability in active distribution network based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 70-77.
- [15] 王满商, 李正明, 汪洋, 等. 考虑电动汽车不确定性因素的配电网分布式电源优化布置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 67-72.
- WANG Manshang, LI Zhengming, WANG Yang, et al. Optimal layout of distributed power supply in distribution network considering uncertainty factors of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 67-72.
- [16] QIU J, ZHAO J, ZHENG Y, et al. Optimal allocation of BESS and MT in a microgrid[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2018, 12(9): 1988-1997.
- [17] HONG Y, LIAN R. Optimal sizing of hybrid Wind/PV/Diesel generation in a stand-alone power system using Markov-based genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 640-647.
- [18] 朱兰, 严正, 杨秀, 等. 风光储微网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 26-31.
- ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Optimal configuration of battery capacity in microgrid composed of wind power and photovoltaic generation with energy storage[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 26-31.
- [19] 陈丽雪, 房方. 计及蓄电池寿命的风光储微网系统能量优化管理[J]. 现代电力, 2018, 35(3): 62-69.
- CHEN Lixue, FANG Fang. Optimal energy management of solar energy storage microgrid system in consideration of battery life[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(3): 62-69.
- [20] WANG L, GAO H, ZOU G. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [21] MIAO Z, FAN L, AGHAMOLKI H G, et al. Least squares estimation based SDP cuts for SOCP relaxation of AC OPF[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(1): 241-248.
- [22] YE Z, YUAN T, KE W, et al. Robust optimisation for AC-DC power flow based on second-order cone programming[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2017, 13(8): 2164-2167.
- [23] HUANG S, LAN H, WU L, et al. Economic optimisation of microgrid based on improved quantum genetic algorithm[J]. Journal of Engineering, 2019, 16(3): 1167-1174.
- [24] 陈志旺, 陈林, 白铎, 等. 求解约束多目标区间优化的交互多属性决策 NSGA-II 算法[J]. 控制与决策, 2015, 30(5): 865-870.
- CHEN Zhiwang, CHEN Lin, BAI Xin, et al. Nsga-ii algorithm for interactive multi-attribute decision making for constrained multi-objective interval optimization[J]. Control and Decision, 2015, 30(5): 865-870.
- [25] ZHAO Y, AN Y, AI Q. Research on size and location of distributed generation with vulnerable node identification in the active distribution network[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2014, 8(11): 1801-1809.

收稿日期: 2019-12-18; 修回日期: 2020-07-01

作者简介:

叶亮(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统优化与控制; E-mail: 1034469757@qq.com

吕智林(1971—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 硕导, 研究方向为智能电网, 复杂系统优化与控制; E-mail: luzhilin2001@163.com

王蒙(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统优化与控制. E-mail: 913598391@qq.com

(编辑 许威)