

计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度

韩笑, 周明, 李庚银

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 为了实现可再生分布式能源的充分消纳以及配网负荷峰谷差的降低, 提出了一种考虑储能系统和空调负荷的主动配电网多目标调度优化方法。首先, 基于空调负荷等效热参数模型和状态队列控制方法, 给出了空调负荷虚拟电厂运行参数的计算方法。在此基础上, 构建了一种以可再生能源功率削减量最小、配网运行费用最小和负荷曲线方差最小为目标的主动配电网优化调度模型。最后, 采用多目标粒子群算法在改进的 IEEE 33 节点测试系统上对所提模型进行求解和仿真分析。仿真结果表明, 所建模型可以有效地提升可再生能源的消纳能力, 优化负荷曲线。

关键词: 空调负荷; 储能系统; 主动配电网; 多目标优化; 可再生能源消纳

Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads

HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin

(State Key Laboratory of New Energy Power System (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: In order to achieve the sufficient consumption of renewable distributed energy and the reduction of the load peak-valley difference in distribution networks, this paper proposes a novel multi-objective optimal dispatching method of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads. Firstly, based on the equivalent thermal parameter model for air-conditioning loads and the state-queue control method, a calculation method for virtual power plant operating characteristics is proposed. Accordingly, a multi-objective optimal dispatching model of active distribution networks is built, aiming to minimize renewable energy curtailment, the operational costs, and load curve variance. Finally, the proposed model is solved and examined on transformed IEEE 33-bus test system by using the multi-objective particle swarm algorithm. Our findings show that our proposed model can effectively increase the consumption of renewable distributed energy and improve the load curve.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100).

Key words: air conditioning loads; energy storage systems; active distribution networks; multi-objective optimization; renewable energy consumption

0 引言

可再生分布式能源、储能系统和可控负荷等可调资源的接入, 给配网的调度与运行带来了新的挑战^[1], 传统的被动、单向、单电源的配电网正逐步向主动、双向、多源的主动配电网发展^[2]。然而, 主动配电网的实施与发展关键在于主动配电网的优化调度。主动配电网的调度, 是利用先进的通信及自动控制技术^[3], 对配网中各类可调的分布式资源

实施协调管理, 进而达到提升配网对可再生分布式能源的消纳能力、降低网损、缩小配网负荷峰谷差^[4]等目标。

针对主动配电网调度^[5-9]问题, 目前国内外学者已从不同角度进行了相关的研究。文献[5]为了实现分布式电源、网络和需求响应负荷的优化控制, 提出了以运行费用最小为目标的智能配电网日前优化模型。文献[6]也是从经济性出发, 构建了一个包含日前和实时的两阶段配网优化调度模型。文献[7]以运行成本最小化和负荷曲线方差最小化为目标, 提出考虑大规模电动汽车接入的主动配电网多目标优

化调度方法。文献[8]针对风电和光伏出力的不确定性问题, 基于机会约束规划的方法提出了含有风光储的主动配电网能量优化调度模型。文献[9]则利用多场景技术来处理间歇性电源和负荷的不确定性问题, 建立了一种考虑日前和实时的主动配电网两步优化调度模型。上述成果针对不同的研究对象, 利用不同的研究方法, 提出相应的处理配网调度问题的优化模型。但是, 上述研究所提出的模型均未能体现配网对提升可再生分布式能源消纳能力的目标要求。

此外, 近几年, 空调负荷成为一种重要的分布式能源。空调负荷的特点主要表现为如下几点: 1) 空调及其所属建筑环境具备一定的热存储能力; 2) 可调性能好^[9], 调控成本低; 3) 在合理范围内调节空调设备的设定温度, 对用户用电舒适度的影响很小^[10]; 4) 夏季高峰时段, 空调负荷占比大, 具有巨大的削峰潜力, 据统计, 在经济发达地区, 如江苏、上海等地, 空调负荷占夏季高峰负荷的比重高达 30%~40%, 局部地区可达 50%以上^[10]。目前, 针对空调负荷的研究主要还是集中在建模^[11-15]和控制策略^[11, 16-17]方面, 缺乏考虑空调负荷参与的配网调度运行问题的有效研究。

针对上述问题, 本文首先基于空调负荷等效热参数模型和状态列队控制方法, 提出了空调负荷虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)出力及运行成本的计算方法。然后, 分别以可再生能源功率削减量最小化、配网运行费用最小化和负荷曲线方差最小化为优化目标, 建立了主动配电网多目标优化调度模型。该模型综合考虑风力发电、光伏发电、燃气轮机、储能系统以及空调虚拟电厂这些可调度资源, 通过“源-储-荷”协调优化来降低负荷峰谷差, 优化负荷曲线, 提升可再生能源的消纳能力, 同时保证配网运行的经济性。采用多目标粒子群算法求解本文所建模型。最后, 以改进的 IEEE 33 节点配网系统进行分析, 仿真结果验证了所建模型的有效性。

1 空调负荷建模

1.1 空调负荷等效热参数模型

目前, 空调负荷建模主要有两种方法: 1) 基于等效热参数^[12-13]的建模方法; 2) 基于冷负荷计算^[14]的建模方法。第二种方法虽然原理简单, 但是冷负荷计算比较复杂, 且计算精度较低。相比之下, 等效热参数建模方法的计算精度则相对较高, 该方法是将建筑物构件、外界环境和空调制冷量等参数等效成电路的电阻、电容及电源等相关电路参数, 从而用等效电路来模拟空调-建筑物系统的热能变

化。等效热参数模型按结构复杂程度, 又可分为三阶和二阶等效热参数模型。三阶模型虽然计算精度相对较高, 但是计算量大, 缺乏实际应用价值^[15], 因此, 本文采用简化的二阶等效热参数模型^[13]对空调负荷进行研究。图 1 显示了简化的空调负荷热力学等效热参数模型。该模型适用于居民和小型商业用户的空调系统。图中, C_m 为室内物质热容, C_a 为室内空气热容; Q 为空调负荷的操作热比率, R_1 为室内空气热阻, R_2 为室内物质热阻, T_{out} 为室外空气温度, T_m 为室内物质温度, T_{in} 为室内空气温度。

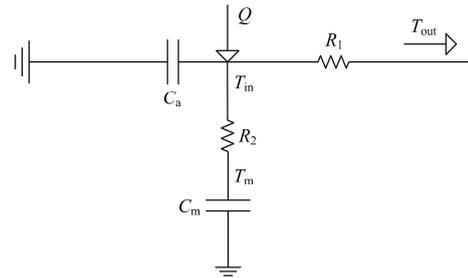


图 1 空调负荷简化的等效热参数模型

Fig. 1 Simplified equivalent thermal parameter model for air-conditioning loads

在图 1 所示模型的基础上进一步简化, 可以得到空调设备室内温度的计算公式如式(1)和式(2)。

$$T_{in,t+1} = T_{out,t+1} - (T_{out,t+1} - T_{in,t})e^{-\Delta t/RC}, s_{AC} = 0 \quad (1)$$

$$T_{in,t+1} = (\eta P_{AC} / A + T_{in,t} - T_{out,t+1})e^{-\Delta t/RC} + T_{out,t+1} - \eta P_{AC} / A, s_{AC} = 1 \quad (2)$$

式中: $T_{in,t}$ 和 $T_{in,t+1}$ 分别表示 t 时刻和 $t+1$ 时刻的室内温度; $T_{out,t+1}$ 为 $t+1$ 时刻的室外温度; $e^{-\Delta t/RC}$ 为热耗参数, Δt 为时间间隔, R 为等效热阻, C 为等效热容; η 为空调负荷效率; P_{AC} 为空调负荷的额定功率; A 为导热系数; s_{AC} 为空调的开关状态, 取 1 表示空调处于开启状态, 取 0 表示空调处于关闭状态。若已知空调设备的温度设定区间和外界环境温度, 根据式(1)和式(2), 就可以模拟出空调设备室内温度随时间的变化轨迹。

1.2 空调负荷群聚合模型

研究表明, 在多数简化的分析场景下(比如: 当空调设备运行在较小的温度区间内时), 空调负荷室内温度轨迹可以近似为直线^[17], 此时, 可以采用状态列队模型进行模拟。

图 2 显示了单个空调设备在两个运行周期的运行状态。如图 2 所示, 空调设备在一个周期需要经历 10 个运行状态。状态 1—7(灰色方格)表示空调设备处于关停状态, 状态 8—10(白色方格)表示空调设备处于启动状态。假设室外温度和温度设定值保持

不变, 温度设定范围的最大值和最小值分别为 T_{\max} 和 T_{\min} , 则空调设备的运行状态会在温度设定范围 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 内, 从状态 1 至状态 10 依次切换。

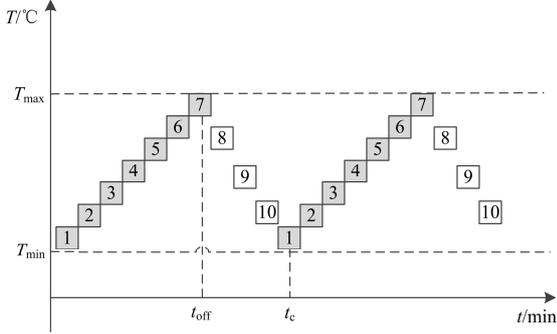


图 2 空调负荷的状态列队模型

Fig. 2 State-queueing model of air conditioning loads

假设有 N_{AC} 个具有相似热参数和相同初始状态的空调群, 将它们均匀地分成 t_c 组, 按照图 2 所示的控制方式对每组空调设备实行轮流控制。假如每个状态的时间间隔为 1 min, 此时, 会有 t_{on} 组空调设备处于开启状态, t_{off} 组空调设备处于关停状态。因此, 可以推导出空调负荷群的聚合功率 P_{ACsum} 的计算公式为

$$P_{ACsum} = \frac{t_{on}}{t_c} N_{AC} P_{AC} \quad (3)$$

若在室外温度 T_{out} 保持不变的情况下, 空调负荷温度设定值取 T_{set} 时, 对应的温度区间为 $[T_{\min}, T_{\max}]$, 根据式(1)和式(2), 就能够计算出该设备温度下空调负荷在一个运行周期内的开启时间 t_{on} 和关断时间 t_{off} , 代入到式(3)中, 可以得到室外温度为 T_{out} 和温度设定值为 T_{set} 的情况下空调负荷群聚合功率 $P_{ACsum,set}$ 为

$$P_{ACsum,set} = \frac{\ln\left(\frac{T_{out} - \eta P_{AC} / A - T_{\min}}{T_{out} - \eta P_{AC} / A - T_{\max}}\right)}{\ln\left(\frac{T_{out} - T_{\max}}{T_{out} - T_{\min}}\right) + \ln\left(\frac{T_{out} - \eta P_{AC} / A - T_{\min}}{T_{out} - \eta P_{AC} / A - T_{\max}}\right)} \cdot N_{AC} P_{AC} \quad (4)$$

1.3 空调负荷 VPP 模型

由于空调负荷的分散分布特性, 为了更好地整合空调负荷群参与配电调度运行, 本文采用 VPP 表示聚合的空调负荷。

VPP 与传统发电厂一样, 具有自己的运行特性, 比如出力限制和运行费用等。假设具有相同或是相似参数的空调负荷群, 可以等同一个 VPP。在整个调度周期内, 所有参与受控的空调负荷被分为 N_{VPP} 个 VPP。在调度运行人员制定调度计划之前, 空调负荷聚合商需要向电网提供可行的空调负荷功率

调整方案和相应的补偿费用。定义 $N_{s,n}$ 为第 n 个 VPP 可行的功率调整方案集合。则第 n 个 VPP 在 t 时刻实际的出力 $P_{VPP,n,t}$ 为

$$P_{VPP,n,t} = \sum_{s \in N_{s,n}} P_{a,n,s} S_{n,s,t} \quad (5)$$

式中: $P_{a,n,s}$ 表示第 n 个 VPP 在 t 时刻实行第 s 个功率调整方案时候的削减功率; $S_{n,s,t}$ 为状态变量, $S_{n,s,t} = 1$ 代表第 n 个 VPP 在 t 时刻实行第 s 个功率调整方案, $S_{n,s,t} = 0$ 表示第 n 个 VPP 在 t 时刻没有实行第 s 个功率调整方案。为了更好地解释 $P_{a,n,s}$ 的计算方法, 进行如下的举例说明。首先, 根据式(4), 可以分别计算出设定温度为 T_{set} 和 T_{reset} 时的 VPP 出力, 假设第 n 个 VPP 的温度设定值从 T_{set} 变为 T_{reset} , 则第 n 个 VPP 实行上述温度设定值调整方案时的削减功率计算如式(6)所示。

$$P_{a,n,reset,t} = P_{ACsum,n,reset,t} - P_{ACsum,n,set,t} \quad (6)$$

式中: $P_{a,n,reset,t}$ 表示第 n 个 VPP 在 t 时刻温度设定值从 T_{set} 调整到 T_{reset} 时的功率削减量; $P_{ACsum,n,reset,t}$ 和 $P_{ACsum,n,set,t}$ 分别表示设定温度为 T_{reset} 和 T_{set} 时的第 n 个 VPP 出力。

1.4 空调负荷 VPP 运行费用计算

随着温度设定值的升高, VPP 的出力将会增大, 但是空调用户的舒适度将随之降低。此时, 需要给用户更多的补偿, 来弥补舒适度的降低。

则 t 时刻第 n 个 VPP 的运行费用 $C_{VPP,n,t}$ 的计算公式为

$$C_{VPP,n,t} = K \sum_{s \in N_{n,s}} \Delta T_{n,s} S_{n,s,t} \quad (7)$$

式中: K 为补偿费用系数; $\Delta T_{n,s}$ 代表第 n 个 VPP 实行温度设定值调节方案 s 后的温度设定值变化量的绝对值。例如, 当第 n 个 VPP 温度设定值从 T_{set} 调整到 T_{reset} , 则 $\Delta T_{n,s}$ 就等于 $|T_{reset} - T_{set}|$ 。

2 优化模型

本文考虑风力发电、光伏发电、燃气轮机、储能系统以及空调虚拟电厂为可调度资源, 建立了主动配电网多目标优化调度模型。该模型的优化目标主要包括可再生能源的削减量最小、配网运行费用最小和负荷曲线方差最小这三个目标函数。

2.1 目标函数

1) 可再生能源的功率削减量最小

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_{RE}} (P_{RE,max,g,t} \Delta t - P_{RE,g,t} \Delta t) \quad (8)$$

式中: T 为调度时长; N_{RE} 为接入配网的可再生能源台数; $P_{RE,max,g,t}$ 为第 g 台可再生能源在 t 时刻的最大

输出功率; $P_{RE,g,t}$ 为第 g 台可再生能源在 t 时刻的实际输出功率。

2) 配网运行费用最小

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{k=1}^{N_{DG}} C_{DG,k,t} P_{DG,k,t} \Delta t + C_{TR,t} P_{TR,t} \Delta t + \sum_{h=1}^{N_{ESS}} C_{ESS,h} |P_{ESS,h,t}| \Delta t + \sum_{n=1}^{N_{VPP}} C_{VPP,n,t} \Delta t \right) \quad (9)$$

式中: N_{DG} 为接入配网的分布式电源台数; N_{ESS} 为接入配网的储能装置台数; N_{VPP} 为参与配网调度运行的虚拟电厂数; $C_{DG,k,t}$ 为第 k 台分布式电源在 t 时刻的上网电价; $C_{TR,t}$ 为 t 时刻从主网购电的电价; $C_{ESS,h}$ 为第 h 台储能设备的运行成本; $P_{DG,k,t}$ 为第 k 台分布式电源在 t 时刻的输出功率; $P_{TR,t}$ 为 t 时刻从主网购买的功率; $P_{ESS,h,t}$ 为第 h 台储能设备在 t 时刻的充放电功率。

3) 负荷曲线方差最小

$$\min f_3 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(P_{L,t} - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{L,t} \right)^2 \quad (10)$$

$$P_{L,t} = P_{load,t} + \sum_{h=1}^{N_{ESS}} P_{ESS,h,t} - \sum_{n=1}^{N_{VPP}} P_{VPP,n,t} \quad (11)$$

式中: $P_{L,t}$ 为储能设备和空调负荷虚拟电厂参与配网运行后, t 时刻的配网负荷功率; $P_{load,t}$ 为 t 时刻原始的配网负荷功率。

2.2 约束条件

1) 网络潮流约束

$$\begin{cases} P_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 处注入的有功功率和无功功率; $U_{i,t}$ 和 $U_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 和节点 j 处的电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 与 j 之间线路的电导和电纳。

2) 线路潮流约束

$$S_{ij,t} \leq S_{ij,max} \quad (13)$$

式中: $S_{ij,t}$ 为 t 时刻支路 ij 的功率; $S_{ij,max}$ 为支路 ij 的最大功率。

3) 节点电压约束

$$U_{i,min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,max} \quad (14)$$

式中, $U_{i,max}$ 和 $U_{i,min}$ 分别为节点 i 的电压上下限。

4) 出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{DG,k,t} \leq P_{DG,max,k,t} \\ 0 \leq P_{TR,t} \leq P_{TR,max,t} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{DG,max,k,t}$ 为第 k 台分布式电源有功出力最大值; $P_{TR,max,t}$ 为主网输送功率的最大限值。

5) 储能系统参数

本文以蓄电池为例对储能系统参数进行说明。

$$E_{h,t} = E_{h,t-1} + P_{ESS,h,t-1} \Delta t \quad (16)$$

式中: $E_{h,t}$ 和 $E_{h,t-1}$ 分别为第 h 台蓄电池在 t 时刻和 $t-1$ 时刻的电池容量; $P_{ESS,h,t-1}$ 表示 $t-1$ 时刻第 h 台蓄电池的充放电功率。

蓄电池充放电功率限制:

$$-P_{ESS,max,h} \leq P_{ESS,h,t} \leq P_{ESS,max,h} \quad (17)$$

式中, $P_{ESS,max,h}$ 为第 h 台蓄电池最大充电功率。

蓄电池容量限制:

$$E_{min,h} \leq E_{h,t} \leq E_{max,h} \quad (18)$$

式中, $E_{max,h}$ 和 $E_{min,h}$ 分别为第 h 台蓄电池容量最大值和最小值。

6) 空调负荷 VPP 约束

假设温度调整方案在配网调度决策前给出, 并且空调设备温度设定值不能连续调节。则 VPP 的出力为离散变量。根据式(4)~式(6), 就可以计算出 VPP 可能提供的出力值。

3 模型求解

上述所建模型属于一个非线性的、多时段的多目标优化问题。在多目标优化问题中, 最优解之间的关系通常是非支配的, 很少出现某个最优解支配其他所有可行解的情形, 因此优化问题的最优解通常是一个解的集合, 称为非支配解集或 Pareto 最优解集。粒子群算法是 Kennedy 等在 1995 年提出的一种群智能计算方法, 能够很好地处理非线性混合问题, 跟其他算法相比收敛速度较快且参数设置简洁。为了利用粒子群算法求解以上提出的多目标优化模型, 本文基于 Pareto 最优原理和模糊决策方法, 引入外部存档的思想, 形成一种适合解决以上模型的多目标粒子群算法。

3.1 多目标模型

多目标优化问题一般可以表述成如下模型。

$$\min f = (f_1(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x}), \dots, f_M(\mathbf{x})) \quad (19)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x} \in \Omega_n \quad (20)$$

式中: \mathbf{x} 为 n 维决策变量; Ω_n 为决策变量可行解空间; $f_m(\mathbf{x})$ 为第 m 维目标函数; M 为目标函数总维度。

假设 \mathbf{x}_1 和 \mathbf{x}_2 是多目标优化的两种可行解。假设当前模型为多目标最小化问题, 那么当且仅当满足以下两个公式时, 称 \mathbf{x}_1 支配 \mathbf{x}_2 。

$$f_m(\mathbf{x}_1) < f_m(\mathbf{x}_2), \exists m = 1, 2, \dots, M \quad (21)$$

若 x_a 为多目标优化的可行解, 且对于任意目标 m 不存在 $x \in \Omega_n$, 使得 $f_m(x) < f_m(x_a)$, 则称 x_a 为该多目标优化的 Pareto 最优解。所有 Pareto 最优解的集合称为 Pareto 最优解集。

3.2 多目标粒子群算法

在标准粒子群算法中, 优化问题的解被看作是搜索空间中无质量的粒子, 通过速度和位置的迭代找到问题的最优解。在迭代过程中, 粒子根据下面两个公式, 更新自己的位置和速度。

$$v_{id,k+1} = wv_{id,k} + c_1 \text{rand}() (p_{\text{best},id,k} - x_{id,k}) + c_2 \text{rand}() (g_{\text{best},id,k} - x_{id,k}) \quad (22)$$

$$x_{id,k+1} = x_{id,k} + v_{id,k+1} \quad (23)$$

式中: $v_{id,k}$ 和 $v_{id,k+1}$ 分别为第 k 次迭代和第 $k+1$ 次迭代时的第 i 个粒子速度向量的第 d 个分量; $x_{id,k}$ 和 $x_{id,k+1}$ 分别为 k 次迭代和第 $k+1$ 次迭代时的第 i 个粒子位置向量的第 d 个分量; w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为加速常数; k 为迭代次数; $\text{rand}()$ 为在区间 $[0,1]$ 均匀分布的随机数; $p_{\text{best},id,k}$ 为第 k 次迭代时的第 i 个粒子的个体局部最优位置, 记作 P_{best} ; $g_{\text{best},id,k}$ 为第 k 次迭代时的第 i 个粒子的全局最优位置, 记作 G_{best} 。

粒子群算法可以处理多目标优化问题的关键在于如何合理确定针对于模型的非支配解并保持解集的多样性, 最终通过粒子群算法得到一组 Pareto 最优解集。本文根据个体间的支配关系利用外部档案存储并输出 Pareto 最优解集, 利用模糊决策方法选取最优的调度方案。

1) 拥挤距离

解的多样性是衡量解集完整性以及收敛特性的一个重要指标, 因此通过何种方式去有效地使得解的分布更加均匀更加分散对于多目标优化算法是一个关键的点。拥挤距离是根据当前个体相邻个体的适应度去计算的一种距离分布指标, 具体计算公式如式(24)。

$$d_i = \sum_{j=1}^M \left(\frac{f_{i+1,j} - f_{i-1,j}}{f_{j\max} - f_{j\min}} \right) \quad (24)$$

式中: d_i 为第 i 个粒子的拥挤距离; M 为目标个数总数; $f_{i+1,j}$ 和 $f_{i-1,j}$ 分别为第 $i+1$ 个粒子和第 $i-1$ 个粒子的第 j 个目标值; $f_{j\max}$ 和 $f_{j\min}$ 分别为第 j 个目标的适应度值的最大和最小值。对于边界个体的拥挤距离一般是用一个较大的数去设置成定值, 保证边界个体不会被删选掉来保证种群的多样性。

通过式(24)可以发现: 当前个体的相邻个体的适应度越接近, 拥挤距离越小并且此时个体越集中; 相反的, 拥挤距离越大则反映出当前个体之间相距

较远较分散, 种群具有更好的多样性。

2) 外部档案的维护

多目标粒子群算法是通过外部档案来保存迭代过程中已经找到的 Pareto 最优解^[18-19], 同时在迭代过程中不断维护更新外部档案中的解。

初始化: 将初始化好的种群依次加入到外部档案中, 根据支配关系去除被支配的个体, 保留下来的非支配解作为初始的外部档案。

维护更新: 将进行位置更新后的种群依次加入外部档案并判断支配关系, 如新加入的个体支配外部档案中的个体, 则加入该个体并删除被支配个体。

多样性更新: 外部档案中也设置了一个较小的概率允许被支配个体加入外部档案之中, 这样被支配个体经过速度和位置的迭代后可能会出现更优的全新支配个体, 以防止陷入局部最优。

当新解加入到档案中后, 外部档案中解的数目大于规定值时, 根据外部档案中解的支配关系以及拥挤距离进行删除。

3) 全局最优与个体最优的更新

个体最优解 P_{best} 的更新仍然是根据支配关系对每一个最优个体进行比较, 保留处于支配地位的个体。即如果粒子的当前位置支配 P_{best} , 则 P_{best} 更新为粒子的当前个体最优位置; 如果 P_{best} 支配粒子的当前位置, 则 P_{best} 保持不变; 如果二者不存在支配关系, 则随机选择其中之一。

全局最优位置是利用轮盘赌方法, 根据各最优解的拥挤距离从外部存档中随机选择。

4) 最优折衷解的选取

本文采用模糊决策方法从 Pareto 最优解集中选取最优折衷解。第 i 个 Pareto 解的第 j 个目标值的隶属函数 u_{ij} 为

$$u_{ij} = \frac{f_{j\max} - f_{ij}}{f_{j\max} - f_{j\min}}, j=1,2,3 \quad (25)$$

式中, f_{ij} 为第 i 个 Pareto 解的第 j 个目标值。则对于第 i 个 Pareto 解, 其标准化的隶属度函数^[20] u_i 为

$$u_i = \frac{\sum_{j=1}^M u_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^M u_{ij}} \quad (26)$$

式中, I 为 Pareto 解的个数。选择隶属度函数 u_i 值最大的解为最优折衷解。

3.3 计算步骤

基于 Pareto 最优解的多目标粒子群算法步骤如下。

1) 定义输入数据。输入风电、光伏和负荷预测

数据, 储能设备、燃气轮机、空调虚拟电厂和电网结构参数以及粒子群算法参数。

2) 初始化粒子种群。设置种群数 pop 以及最大迭代次数 $maxit$, 根据约束关系随机生成初始位置 X_0 和初始速度 V_0 , 并根据式(8)~式(10)计算每个粒子的目标函数, 粒子的局部最优位置初始化为 $P_{best}=X_0$, 外部档案 $Archive$ 为空, 设置边界最大拥挤距离为 inf 。

3) 初始化 $Archive$ 。将 X_0 依次加入 $Archive$ 并保留支配解作为 $Archive$ 中的初始解集。

4) 迭代开始, $k=1$ 。根据式(24)计算 $Archive$ 中所有个体的拥挤距离, 并采用轮盘赌方法从中选择一个个体作为 G_{best} 。

5) 根据式(22)和式(23)更新粒子的位置 X 和速度 V , 根据边界关系对位置 X 和速度 V 的值进行限定并重新计算种群中所有个体的适应度。

6) 用当前粒子群中的非支配解更新外部档案, 若外部档案中解的数目大于规定值时, 根据外部档案中解的拥挤距离进行删除。

7) 更新粒子的 P_{best} 。若满足最大迭代次数, 则停止搜索, 根据外部精英解集输出Pareto最优前沿, 利用模糊决策方法找到最优折衷解; 否则 $k=k+1$, 转步骤4)。

4 算例仿真

4.1 基本数据

本文采用改进的 IEEE 33 节点配网系统对上述所建的多目标优化调度模型进行仿真分析。改进后的 IEEE 33 节点系统如图 3 所示。该配网系统的电压等级为 12.66 kV, 各节点电压上下限分别取 1.05 倍和 0.95 倍的额定电压, 支路容量最大值为 5 300 kVA^[21]。调度时长为 24 h, 时间间隔为 15 min。如图 3 所示, 风电安装在 7、30 号节点上, 各节点总装机容量均为 1.5 MW, 假设各节点风电出力预测曲线相同, 如图 4 红色曲线所示; 光伏安装在 10、24 号节点上, 各节点总装机容量均为 1.5 MW, 同样假设各节点光伏出力预测曲线相同, 如图 4 绿色曲线所示; 微型燃气轮机安装在 17、19 号节点上, 有功出力范围为 0~0.4 MW; 储能安装在 9、31 号节点上, 各节点总充放电功率上限为 0.6 MW, 容量上限为 4.5 MWh, 初始容量为 1.0 MWh。节点 13、21、25、28 上接有可参与系统调度的空调负荷 VPP。由于空调负荷具有分布分散特性, 为将空调负荷资源纳入配网调度中, 可将同一节点具有相似参数的空调负荷群等效成一个 VPP。空调负荷的优化控制策略并不是本文的研究重点, 因此, 算例仿真分析

中, 假设空调负荷群能立即响应调度指令, 没有响应延迟。

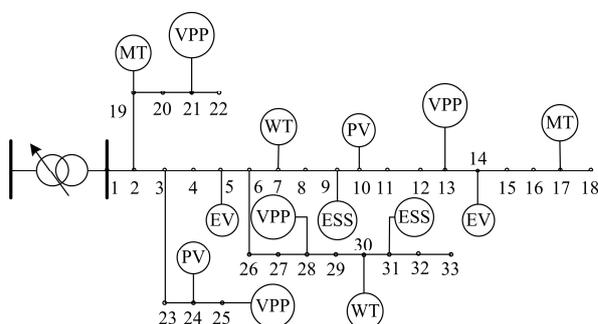


图 3 IEEE 33 节点系统
Fig. 3 IEEE 33-bus system

图 4 中的蓝色曲线代表系统夏季高温天气下的日负荷曲线。如图 4 所示, 18:30—20:30 为负荷最高峰时段, 在这个时段, 系统需要空调负荷参与到调度运行中, 发挥其削峰的作用。我们假设室外温度在此时段变化很小, 基本保持不变, 并设定此时段室外温度为 36 °C。表 1 显示了连接这 4 个节点的 VPP 的空调负荷参数, 其中 T_s 为空调负荷初始温度设定值, 并假设这四类空调负荷的设定温度区间均为 2 °C。

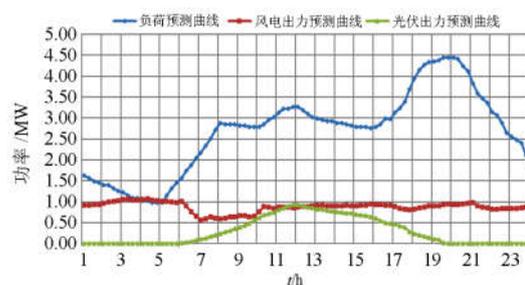


图 4 负荷、风电出力和光伏出力预测曲线

Fig. 4 Forecast curves of load, wind outputs and photovoltaic outputs

表 1 6 个 VPP 的空调参数

Table 1 Parameters of six VPP

参数	$R/(^{\circ}\text{C}/\text{kW})$	$C/(\text{kWh}/^{\circ}\text{C})$	P_{AC}/kW	η	N_{AC}	$T_s/(^{\circ}\text{C})$
VPP1	2.6	12.6	3.0	2.6	860	23
VPP2	2.5	13.4	2.8	2.4	980	24
VPP3	3.1	13.8	3.6	2.7	920	25
VPP4	2.7	11.8	2.9	2.5	908	24

根据第 2 节的内容, 可以得出空调设备温度设定值调整的幅度越大, 所能提供的负荷削减量就越大, 空调用户的舒适度将随之降低, 用户能承受这种不舒适感的时长也随之减少。综上, 本文提出三种空调设备温度设定值调整方案。

1) 方案 1: 温度设定值升高 1 °C, 相应的最大

持续时长为 90 min;

2) 方案 2: 温度设定值升高 2 °C, 相应的最大持续时长为 60 min;

3) 方案 3: 温度设定值升高 3 °C, 相应的最大持续时长为 30 min。根据第 2 节内容, 可以计算出每个 VPP 在这三种温度调整方案下的出力, 如表 2 所示。

表 2 不同温度调整方案下的 VPP 出力

Table 2 Outputs of VPP under different temperature regulation schemes

温度调整方案	VPP1 出力/kW	VPP2 出力/kW	VPP3 出力/kW	VPP4 出力/kW
方案 1	59.69	73.72	61.53	65.57
方案 2	119.40	147.48	123.1	131.17
方案 3	179.14	221.29	184.73	196.81

根据我国分布式电源上网电价政策, 取风电和光伏的上网电价分别为 0.6 元/kWh 和 0.88 元/kWh。从主网购电的电价为 0.55 元/kWh; 微型燃气轮机的上网电价为 0.5 元/kWh^[22]; 储能设备运行成本设定为 0.05 元/kWh; 空调负荷虚拟电厂的成本系数设定为 0.025 元/kWh。

4.2 优化结果分析

本文在 Matlab 仿真平台上利用多目标粒子群算法对所提模型进行仿真分析。设定迭代次数为 1 000, 粒子种群大小为 200, 惯性权重为 0.5, 加速常数 c_1 和 c_2 均为 2。

为了揭示储能设备和空调 VPP 在配网调度中的协调作用, 按照本文所提的调度模型, 分别对以下 4 个调度场景进行仿真分析: 1) 不考虑储能和空调 VPP 参与系统运行; 2) 只考虑储能参与系统运行; 3) 只考虑空调 VPP 参与系统运行; 4) 同时考虑储能和空调 VPP 参与系统运行。4 个调度场景下的 Pareto 前沿解集分别如图 5—图 8 所示。图 5—图 8 所示的解集均有较好的分布性。解集中的所有解都是最优解, 在实际中决策者可以根据配网运行的具体期望要求决定最终的优化方案。本文采用模糊决策方法对优化结果进行分析。

图 9 显示了不考虑储能和空调设备的配网各分布式电源和主网的出力曲线。仿真结果表明, 在 1:00—6:15 以及 10:00—16:15 这两个时段, 存在部分弃风和弃光现象, 总的可再生能源削减量为 6.25 MWh; 其余时段, 可再生能源出力不能满足用户的用电需求, 配网需要从主网购电并调用燃气轮机来满足系统供能。

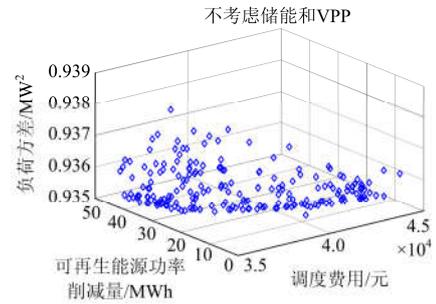


图 5 不考虑储能设备和空调 VPP 的 Pareto 前沿解集

Fig. 5 Pareto fronts without considering energy storage equipment and VPP for air conditioning loads

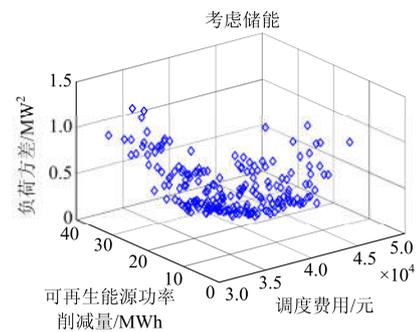


图 6 考虑储能设备的 Pareto 前沿解集

Fig. 6 Pareto fronts considering energy storage equipment

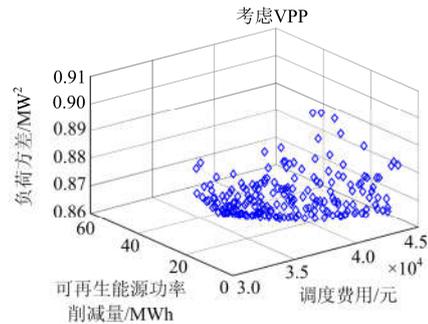


图 7 考虑空调 VPP 的 Pareto 前沿解集

Fig. 7 Pareto fronts considering VPP for air conditioning loads

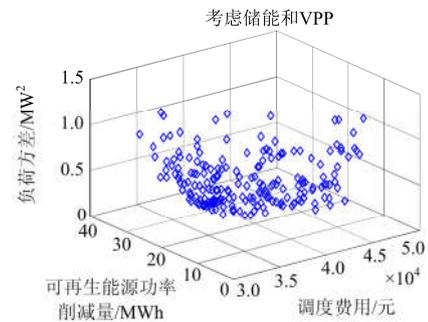


图 8 考虑储能设备和空调 VPP 的 Pareto 前沿解集

Fig. 8 Pareto fronts considering energy storage equipment and VPP for air conditioning loads

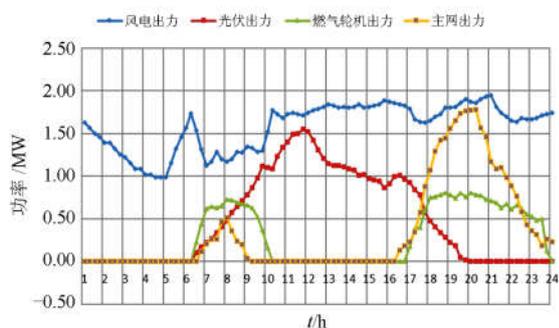


图 9 不考虑储能设备和空调 VPP 的调度结果

Fig.9 Simulation results without considering energy storage equipment and VPP for air conditioning loads

考虑储能的配网各分布式电源和主网的出力曲线以及优化后的系统负荷曲线如图 10 所示。可以得出, 在储能设备的充放电作用下, 可再生能源的功率削减量降为 2.9 MWh, 弃风和弃光时段缩短为 1:00—5:15 及 10:00—15:45。同时, 优化后的负荷曲线峰谷差明显降低, 与原始负荷曲线相比, 更加平坦。考虑空调 VPP 的配网各分布式电源和主网的出力曲线以及优化后的系统负荷曲线如图 11 所示。仿真结果表明, 在负荷高峰时段 18:30—20:30, 系统调用空调 VPP 来降低高峰时段负荷用电量, 负荷曲线峰谷差有所缩小。但是, 弃风和弃光现象并没有得到改善。



图 10 考虑储能设备的调度结果

Fig.10 Simulation results considering energy storage equipment

图 12 显示了储能系统和空调 VPP 参与配网调度运行后, 配网各分布式电源和主网的出力曲线以及优化后的系统负荷曲线。如图 12 所示, 由于储能和虚拟电厂的参与, 可能生能源消纳能力显著提升, 配网从主网的购电比率及燃气轮机出力比率明显降低, 负荷趋于平坦。其储能和 VPP 的作用主要表现为: 1) 在可再生能源出力富余时段, 储能设备利用过剩功率进行充电, 使得弃风和弃光时段有所缩短 (1:00—5:15 及 10:00—15:45 时段, 仍存在弃风和弃光现象), 可再生能源功率削减量明显下降, 降为

2.82 MWh; 2) 在负荷高峰时段, 储能设备向配网放电, 空调负荷响应调度指令, 削减空调负荷功率, 进而达到降低配网高峰负荷, 缩小负荷峰谷差的目的。表 3 显示了负荷高峰时段 4 个空调 VPP 在各时刻的出力及每时刻总的负荷削减量。从表 3 可以得出, 空调用户在高峰时段贡献的负荷削减量的均值为 260.58 kW, 达到了峰荷的 5.9%。上述数据表明, 空调负荷参与到配电网的调度和运行过程中能够有效地削减峰荷。

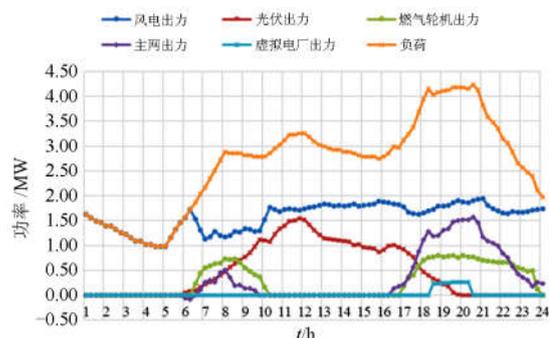


图 11 考虑空调 VPP 的调度结果

Fig. 11 Simulation results considering VPP for air conditioning loads

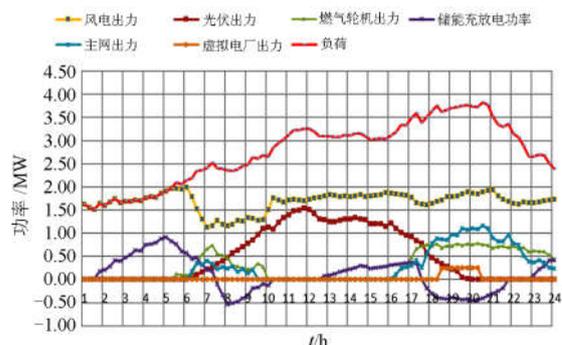


图 12 考虑储能设备和空调 VPP 的调度结果

Fig.12 Simulation results considering energy storage equipment and VPP for air conditioning loads

表 3 VPP 在 18:30 到 20:30 的出力情况

Table 3 Outputs of VPP from 18:30 to 20:30

时段	18:30—19:00	19:00—19:30	19:30—20:00	20:00—20:30
VPP1	0	0	119.40	119.40
出力/kW				
VPP2	0	0	147.48	147.48
出力/kW				
VPP3	123.10	123.10	0	0
出力/kW				
VPP4	131.17	131.17	0	0
出力/kW				
总的	254.27	254.27	266.88	266.88
出力/kW				

表 4 给出了 4 个不同调度场景下 3 个目标函数值。通过 4 个场景调度结果的对比分析,可以得出:

1) 由于储能设备参与配网运行,场景 2 和场景 4 的可再生能源削减量显著降低,而空调 VPP 对提升可再生能源消纳能力的作用不大。

2) 场景 2 和场景 4 与场景 1 和场景 3 相比,运行费用有所升高,其主要原因为:随着可再生能源消纳能力的提升,风电和光伏总出力明显增加,主网和燃气轮机总出力相应减少,而风电和光伏的上网电价均比主网购电电价和燃气轮机的上网电价高,导致运行费用的升高;其次,调用储能设备,需要配网提供相应的运行费用。此外,通过场景 4 与场景 2 相比,可以看出,空调 VPP 参与调度,能够降低配网的运行费用。

3) 由于考虑储能和空调 VPP,场景 2、3、4 与场景 1 相比,负荷方差都明显降低,其中,场景 4 的负荷方差值最小。

表 4 不同场景的调度结果对比分析
Table 4 Comparison of scheduling results
under different scenarios

场景编号	调度场景	可再生能源功率 削减量/MWh	调度 费用/元	负荷 方差/MW ²
1	不考虑储能 和 VPP	6.25	39 616.69	0.94
2	考虑储能	2.90	41 598.52	0.51
3	考虑 VPP	6.21	39 365.93	0.87
4	考虑储能和 VPP	2.82	41 451.73	0.46

5 结论

为了提升配网中可再生能源的消纳能力,缩小负荷峰谷差,本文考虑储能设备和空调负荷为可调度资源,提出了一种以可再生能源的功率削减量最小、配网运行费用最小和负荷曲线方差最小为目标的主动配电网多目标优化调度模型。采用多目标粒子群算法对所提模型进行求解,仿真结果表明:

1) 将储能系统和空调 VPP 纳入到配网调度运行中,通过“源储荷”协同优化,可以有效地提升可再生能源的消纳能力,缩小负荷峰谷差。

2) 随着可再生能源削减量的减少,一定程度上会增加配网的运行费用。

3) 空调负荷可以有效地降低配网峰荷,具有较高的削峰潜力。

参考文献

[1] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources- a review[J]. Protection & Control of Modern Power Systems, 2017,

2(2): 294-310. DOI: 10.1186/s41601-017-0061-1.

[2] 张旭升, 李瑞生, 黄利军, 等. 基于分层储能的主动配电网需求响应控制策略研究及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 40-49.

ZHANG Xusheng, LI Ruisheng, HUANG Lijun, et al. Research and application on demand response based on hierarchical power storage[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 40-49.

[3] 吴丽珍, 蒋力波, 郝晓弘. 基于最优场景生成算法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 152-159.

WU Lizhen, JIANG Libo, HAO Xiaohong. Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 152-159.

[4] 蒲天骄, 陈乃仕, 王晓辉, 等. 主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 17-23.

PU Tianjiao, CHEN Naishi, WANG Xiaohui, et al. Application and architecture of multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 17-23.

[5] GOLSHANNAVAZ S, AFSHARNIA S, AMINIFAR F. Smart Distribution Grid: Optimal Day-Ahead Scheduling With Reconfigurable Topology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5):2402-2411.

[6] Safdarian A, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. A Stochastic Framework for Short-Term Operation of a Distribution Company[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4712-4721.

[7] 肖浩, 裴玮, 孔力. 含大规模电动汽车接入的主动配电网多目标优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S2): 179-189.

XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li. Multi-Objective optimization scheduling method for active distribution network with large scale electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 179-189.

[8] 王健, 谢桦, 孙健. 基于机会约束规划的主动配电网能量优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 45-52.

WANG Jian, XIE Hua, SUN Jian. Study on energy dispatch strategy of active distribution network using chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 45-52.

[9] 高亚静, 李瑞环, 梁海峰, 等. 考虑间歇性电源与负荷不确定性情况下基于多场景技术的主动配电系统两步优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1657-1665.

GAO Yajing, LI Ruihuan, LIANG Haifeng, et al. Two step

- optimal dispatch based on multiple scenarios technique considering uncertainties of intermittent distributed generations and loads in the active distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1657-1665.
- [10] 杨永标, 颜庆国, 徐石明, 等. 公共楼宇空调负荷参与电网虚拟调峰的思考[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 103-107.
YANG Yongbiao, YAN Qingguo, XU Shiming, et al. Thinking of public building air-conditioning load participating in grid with virtual peak clipping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 103-107.
- [11] 高赐威, 李倩玉, 李扬. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1546-1555.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555.
- [12] MOLINA A, GABALDON A, FUENTES J A, et al. Implementation and assessment of physically based electrical load models: Application to direct load control residential programmes[J]. IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(1):61-66.
- [13] LU N. An Evaluation of the HVAC Load Potential for Providing Load Balancing Service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.
- [14] BRUNING S F. A New Way to Calculate Cooling Loads[J]. Ashrae Journal, 2004, 46(1): 20-25.
- [15] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167.
SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 158-167.
- [16] 王庆泽, 陈星莺, 颜庆国, 等. 分时电价环境下的办公建筑空调负荷双层柔性优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 43-50.
WANG Qingze, CHEN Xingying, YAN Qingguo, et al. Two-layer flexible optimal strategy for air-conditioning of office building under TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 43-50.
- [17] 周磊, 李扬, 高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5579-5589.
ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.
- [18] 张子泳, 仇梦林, 李莎. 基于多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 1-10.
ZHANG Ziyong, ZHANG Menglin, LI Sha. Environmental/economic power dispatch based on multi-objective particle swarm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 1-10.
- [19] 卢锦玲, 苗雨阳, 张成相, 等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 26-30.
LU Jinling, MIAO Yuyang, ZHANG Chengxiang, et al. Power system optimal dispatch considering wind farms based on improved multi-objective particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 26-30.
- [20] AGHAJANI G R, SHAYANFAR H A, SHAYEGHI H. Presenting a multi-objective generation scheduling model for pricing demand response rate in micro-grid energy management[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 106: 308-321.
- [21] 宋文. 含分布式发电的配电网优化规划研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
SONG Wen. Research on optimal planning of the distribution network with distributed generation[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.
- [22] 曾鸣, 彭丽霖, 王丽华, 等. 主动配电网下分布式能源系统双层双阶段调度优化模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 108-115.
ZENG Ming, PENG Lilin, WANG Lihua, et al. Two-stage dual-level dispatch optimization model of distributed energy system in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 108-115.

收稿日期: 2018-01-05; 修回日期: 2018-02-25

作者简介:

韩笑(1987—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化调度, 需求响应等; E-mail: hanxiao1118@126.com

周明(1967—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行、电力市场、电力系统规划与可靠性等; E-mail: zhouting@ncepu.edu.cn

李庚银(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统、电能质量、新型输配电技术等。E-mail: ligy@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)