

DOI: 10.7667/PSPC170102

# 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略

王甜婧, 许阔, 朱永强

(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:** 考虑到主动配电网具有多级管控的特点, 提出了一种基于博弈论的源-网-荷多层博弈经济调度方法。为协调微网、配网和负荷的关系, 将调度策略划分为三层, 分别为微网与配网之间的合作博弈、配网与负荷之间的合作博弈以及负荷之间的非合作博弈。微网与配网的相互备用构成其合作关系, 同时最优化可平移负荷使负荷之间的博弈达到纳什均衡, 并引入顺序变量描述调度优先级。建立了以发电运行成本最小、网损最小和电压偏移合格率最高为目标的多目标优化调度模型, 运用综合定权法将其化为单目标, 并采用改进微分进化算法对其求解。算例证明, 所提方法能够提高主动配电网对可再生能源的消纳能力, 提升系统经济性。

**关键词:** 主动配电网; 经济调度; 博弈论; 微网; 纳什均衡

## Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game

WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Taking into account the characteristics of multi-level management in active distribution network, this paper proposes an economic scheduling method of source-network-load multi-layer game based on game theory. In the active distribution network with multi-microgrids, in order to coordinate the relationship among the microgrids, distribution network and load, scheduling strategy is divided into three layers, which includes a cooperative game between microgrid and distribution network, a cooperative game between distribution network and a non-cooperative game between load and load respectively. The mutual reserve between the microgrid and the distribution network makes their cooperation be formed. The optimization of translational load can make the game among the load reach the Nash equilibrium. And the order variable is introduced to describe the scheduling priority. The multi-objective optimization scheduling model is established, which takes the minimum generation cost, minimum network loss and the maximum voltage deviation as the objectives. It is translated into a single objective based comprehensive weighting method, and the improved differential evolution algorithm is used to solve the problem. An example shows that the proposed method can improve the capacity of active distribution network to consume the renewable energy and the economy of system.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA0501022).

**Key words:** active distribution network; economic dispatch; game theory; microgrid; Nash equilibrium

## 0 引言

随着环境危机与能源紧缺的日益加剧, 可再生能源(Renewable Energy, RE)以其绿色环保等特点得到越来越广泛的关注<sup>[1]</sup>。但传统配电网被动地控制

和管理不利于高渗透率分布式能源(Distributed Energy Resource, DER)的接入<sup>[2]</sup>。主动配电网(Active Distribution Network, ADN)技术以其对分布式电源、储能以及柔性负荷的主动控制和管理, 可以实现分布式能源的高效消纳和系统的优化运行<sup>[3-6]</sup>。因此, 对主动配电网中分布式电源、储能以及柔性负荷的高效控制策略有必要深入研究。

目前, 关于主动配电网的优化调度方法研究已

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA0501022)

成为一个热点。文献[5]计及储能和柔性负荷的时空联系以及网络潮流的影响, 构建了多目标主动配电网优化调度模型, 并通过设定各发电单元的调度优先级量化了其协同作用; 文献[7]考虑了风电与光伏的不确定性, 运用随机模拟技术和惩罚函数, 基于机会约束规划建立了主动配电网能量调度模型; 文献[8]提出了三层控制结构, 将主动配电网进行区域划分, 并在每个区域中配置协调控制器进行区域自治控制; 文献[9]建立了多类型柔性负荷分级优化的调度模型, 缓解了风力发电导致的运行调度难度; 文献[10]计及了分布式电源出力、储能充放电功率和电容器组投切等决策变量, 建立了辐射状配电网有功-无功协调调度模型; 文献[11]建立了基于对代理系统的能量协调控制策略, 通过 Agent 实现兼顾分布式电源个体目标和系统整体目标的主动配电网全局优化。

微网是分布式电源接入电网的最佳形式之一。目前, 含多微网的主动配电网运行优化策略的研究较少。文献[4]采用双层规划策略, 引入主动配电网和微网的备用容量机制, 构造了微网间互动备用博弈矩阵, 分析了多微网与配网之间的运行行为, 但没有考虑微网与配网之间互为备用的关系和柔性负荷的响应; 文献[12]将微网间的调度问题分为跨时段决策和实时调度决策, 建立了基于效用函数的经济优化调度模型, 得到智能配电网的最佳运行方式, 但缺乏微网与配电网之间的互动配合。针对以上问题, 本文将含多微网的主动配电网运行优化问题分为三层, 并充分利用博弈论的思想, 结合互动备用模式, 提出了主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略。建立了以包含微网和配网的运行经济性和稳定性最优为目标的调度模型, 求解得到最优的调度策略。

## 1 含多微网的主动配电网多层系统搭建

### 1.1 含多微网的主动配电网多层系统结构

含多微网的主动配电网多层系统结构如图 1 所示。该系统包含多层结构, 包括微网层、配网层、DG 层、负荷层以及主电网。

### 1.2 微网与配电网互动备用模式

在整个系统中存在四层关系, 包括多微网之间、微网与配电网之间、配电网与负荷之间以及各负荷之间的关系。要实现主动配电网的经济调度, 必须协调好这四层关系。本文提出微网与配网的互动备用模式来协调源-网-荷的关系。该互动备用包括微网之间相互备用和微网与配网相互备用, 并基于合作博弈来制定相互备用的策略。该方案可加强系统可再生能源的消纳能力, 有效提高系统的经济性。

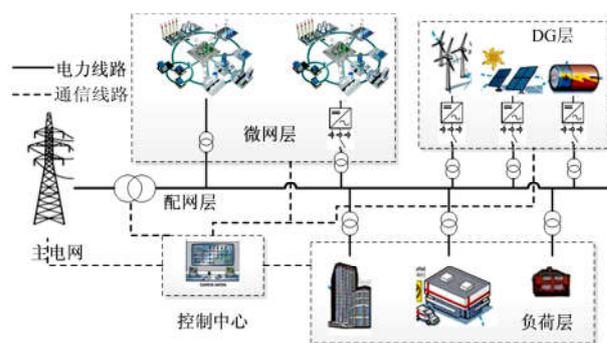


图 1 含多微网的主动配电网多层系统结构

Fig. 1 Multi-layer system structure of active distribution network with multiple microgrids

## 2 调度策略

针对含多微网的主动配电网调度问题, 可调度变量较多, 关系较复杂, 其中包括配电网和微网的各种电源、负荷和储能及其相互之间的关系。本文的调度目标是经济性最优, 对于微网和配电网, 其具有整个系统运行经济性最优的共同目标, 因而微网与配网之间是一种合作博弈关系。对于配电网和负荷, 配电网应配合负荷, 并考虑经济性进行各电源的调配, 两者同样是一种合作博弈关系。对于负荷, 用户均以追求自身的收益最大为目标, 是一种非合作博弈关系。考虑到以上因素, 本文将该调度策略规划问题划分为三层, 分别为微网与配网之间的合作博弈策略、配网与负荷之间的合作博弈策略和负荷之间的非合作博弈策略。

### 2.1 微网与配网之间的合作博弈策略

当一个微网自身不能满足功率需求时, 需要调用配电网以及其他微网的电源来供电。但含微网的配电网中电源种类与数目较多, 按何种顺序来调用这些电源是该调度问题的关键。本文采用顺序博弈并运用 0-1 变量和顺序变量来解决该调度问题。为了提升可再生能源的消纳量, 应首先考虑微网自身的微源, 再考虑外部的微源, 最后引入主网。对于相同类型的电源, 用顺序变量来决定调度顺序; 对于电源的控制, 用 0-1 变量来决定调度指令。0-1 变量的值由当前发电量和负荷量决定, 顺序变量由系统经济性优化决定。

综上, 对于微网  $i$ , 电源调度优先级为: 第一级为微网  $i$  的可再生分布式电源(Renewable Distributed Power Supply, RDPS)、除风光外其他电源、储能, 第二级为外部微网或配网的 RDPS、除风光外其他电源、储能, 第三级为主网。其中, 微网和配网中始终有一个光伏作为当地恒供电源, 不作为系统的备用。所建立的网间互动备用模型如下(微网自身的

电源调度和主网电能调度不计入其中)。

网间互动备用容量包括微网或配网的分布式电源(DG)发电量和微网或配网的储能充电量。则第  $i$  个电网  $t$  时刻的网间互动备用容量  $P_{Si}^t$  可以表示为

$$P_{Si}^t = \alpha_i^t X_i^t [P_{rdgs}^{i,t}]^{\varepsilon_1} + \beta_i^t Y_i^t [P_{dgs}^{i,t}]^{\varepsilon_2} + \sigma_i^t Z_i^t [P_{egs}^{i,t}]^{\varepsilon_3} \quad (1)$$

$$\alpha_i^t = \begin{cases} 1, & P_{mL}^{i,t} > \sum_{j=1}^{D_i} P_{dg}^{i,j,t} \\ 0, & P_{mL}^{i,t} \leq \sum_{j=1}^{D_i} P_{dg}^{i,j,t} \end{cases} \quad (2)$$

$$\beta_i^t = \begin{cases} 1, & P_{mL}^{i,t} > \sum_{j=1}^{D_i} P_{dg}^{i,j,t} + \sum_{l=1}^{DR_i} P_{rdgsmax}^{i,l,t} \\ 0, & P_{mL}^{i,t} \leq \sum_{j=1}^{D_i} P_{dg}^{i,j,t} + \sum_{l=1}^{DR_i} P_{rdgsmax}^{i,l,t} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma_i^t = \begin{cases} 1, & P_{mL}^{i,t} > \sum_{j=1}^{D_i} P_{dg}^{i,j,t} + \sum_{l=1}^{DR_i} P_{rdgsmax}^{i,l,t} + \sum_{m=1}^{DS_i} P_{dgsmax}^{i,m,t} \\ 0, & P_{mL}^{i,t} \leq \sum_{j=1}^{D_i} P_{dg}^{i,j,t} + \sum_{l=1}^{DR_i} P_{rdgsmax}^{i,l,t} + \sum_{m=1}^{DS_i} P_{dgsmax}^{i,m,t} \end{cases} \quad (4)$$

$$X_{i,\omega}^t = \begin{cases} 1, & \xi_{i,\omega}^t = \max \left( \bigcup_{p=1}^{DR_i} \xi_{p,\omega}^t \right) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$Y_{i,\omega}^t = \begin{cases} 1, & \zeta_{i,\omega}^t = \max \left( \bigcup_{p=1}^{DS_i} \zeta_{p,\omega}^t \right) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$Z_{i,\omega}^t = \begin{cases} 1, & \tau_{i,\omega}^t = \max \left( \bigcup_{p=1}^{ES_i} \tau_{p,\omega}^t \right) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \xi_{i,\omega}^t = \delta E_{rgl,i,\omega}^t + \varphi P_{rgloss,i,\omega}^t \\ \zeta_{i,\omega}^t = \delta E_{gr,i,\omega}^t + \varphi P_{gloss,i,\omega}^t \\ \tau_{i,\omega}^t = \delta E_{ei,\omega}^t + \varphi P_{eloss,i,\omega}^t \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $X_i^t = [X_{i,1}^t, X_{i,2}^t, \dots, X_{i,Dz}^t]$ ,  $Y_i^t = [Y_{i,1}^t, Y_{i,2}^t, \dots, Y_{i,Ez}^t]$ ,  $Z_i^t = [Z_{i,1}^t, Z_{i,2}^t, \dots, Z_{i,Ez}^t]$ ,  $P_{rdgs}^{i,t} = [P_{rdgs}^{i,t,1}, P_{rdgs}^{i,t,2}, \dots, P_{rdgs}^{i,t,Dz}]^T$ ,  $P_{dgs}^{i,t} = [P_{dgs}^{i,t,1}, P_{dgs}^{i,t,2}, \dots, P_{dgs}^{i,t,Dz}]^T$ ,  $P_{egs}^{i,t} = [P_{egs}^{i,t,1}, P_{egs}^{i,t,2}, \dots, P_{egs}^{i,t,Ez}]^T$ ;  $\alpha_i^t$ 、 $\beta_i^t$  和  $\sigma_i^t$  分别为 RDPS、除风光外其他电源和储能发电一级决策变量;  $X_i^t$ 、 $Y_i^t$  和  $Z_i^t$  分别为 RDPS、除风光外其他电源和储能的发电二级决策变量;  $P_{rdgs}^{i,t}$ 、 $P_{dgs}^{i,t}$  和  $P_{egs}^{i,t}$  分别为 RDPS、除风光外其他电源和储能的发电量;  $P_{mL}^{i,t}$  为微网  $i$  的负荷量;  $P_{dg}^{i,j,t}$  为微网  $i$  中第  $j$  个分布式电源发电量;  $D_i$  为微网  $i$

中分布式电源总数;  $DR_i$ 、 $DS_i$  和  $ES_i$  为配网和微网中除微网  $i$  的可再生能源总数、除风光外其他微源总数和储能总数;  $P_{rdgsmax}^{i,l,t}$  为第  $l$  个 RDPS 的最大发电量;  $P_{dgsmax}^{i,m,t}$  为第  $m$  个除风光外其他电源的最大发电量;  $\xi_{i,\omega}^t$ 、 $\zeta_{i,\omega}^t$  和  $\tau_{i,\omega}^t$  分别表示第  $i$  个微网相对于外界配电网(或其他微网)中 RDPS、除风光外其他电源和储能的容量-位置的权衡量;  $\delta$  和  $\varphi$  为权衡因子, 且满足  $\delta + \varphi = 1$ ;  $E_{rgl,w}^t$ 、 $E_{gr,w}^t$  和  $E_{ei,w}^t$  分别为外界配电网(或其他微网)中 RDPS、除风光外其他电源和储能的容量;  $P_{rgloss,i,w}^t$ 、 $P_{gloss,i,w}^t$  和  $P_{eloss,i,w}^t$  分别为外界配电网(或其他微网)中 RDPS、除风光外其他电源和储能对微网  $i$  的传输损耗;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_3$  分别为 RDPS、除风光外其他电源和储能的调度顺序变量。

## 2.2 配网与负荷之间的合作博弈策略

对于配网负荷的供电, 同样需先调用配网或微网中的可再生能源。因此, 同微网与配网之间的合作博弈策略类似, 配网中电源为负荷供电的优先级为: 第一级为配网或微网中可再生能源(风、光)、微网中除风光外其他微源、储能, 第二级为主网。则荷网互动容量  $P_D^t$  表示为

$$P_D^t = M^t [P_{rdgs}^t]^{\varepsilon_1} + a^t L^t [P_{dgs}^t]^{\varepsilon_2} + b^t N^t [P_{egs}^t]^{\varepsilon_3} \quad (9)$$

式中:  $M^t = [M_1^t, M_2^t]$ ,  $M_1^t$  恒为 1,  $M_2^t = \begin{cases} 1, & P_L^t > P_{rdg}^t(1) \\ 0, & P_L^t \leq P_{rdg}^t(1) \end{cases}$ , 其他各元素的取值与 2.1 节中的

类似, 具体见附录 1;  $a^t$ 、 $b^t$  分别为除风光外其他电源和储能的发电一级决策变量;  $M^t$ 、 $L^t$  和  $N^t$  分别为 RDPS、除风光外其他电源和储能的发电二级决策变量;  $P_{rdgs}^t$ 、 $P_{dgs}^t$  和  $P_{egs}^t$  分别为配网和微网中 RDPS、除风光外其他电源和储能的发电量;  $P_L^t$  为配电网的负荷量。

## 2.3 考虑需求响应的负荷之间的非合作博弈策略

电源供电和负荷需求往往不能一致, 用户参与和需求响应可有效减缓这种情况的弊端。优化可平移负荷, 可实现需求响应。假设每个用户都安装有智能电表且可以获取控制中心发来的信息, 并能知道当前的用电成本。用户均以追求自身的收益最大为目标, 则各用户之间是非合作博弈关系。该博弈是否存在唯一的纳什均衡, 取决于收益函数即用户的用电成本。

用户的用电成本即配电网发电成本与配电网的常规电源发电成本、DG 发电成本、储能运行成本以及微网中的各电源发电成本等有关, 成本计算

较为复杂。本文将主网购电成本  $C_{\text{mg}}^t$ 、分布式电源发电成本  $C_{\text{dg}}^t$  和储能放电成本  $C_{\text{eg}}^t$  的和作为配电网总发电成本  $C_{\text{g}}^t$ ：

$$C_{\text{g}}^t = C_{\text{mg}}^t + C_{\text{dg}}^t + C_{\text{eg}}^t \quad (10)$$

对于一定的负荷, 分布式电源发电成本与储能放电成本也是一定的, 单位成本不随负荷的变动而变化。因此, 对  $t$  时间段的负荷  $L^t$ , 对应分布式电源发电成本  $C_{\text{dg}}^t$  与储能放电成本  $C_{\text{eg}}^t$  分别为

$$\begin{cases} C_{\text{dg}}^t(L_{\text{d}}^t) = c_{\text{d}}L_{\text{d}}^t \\ C_{\text{eg}}^t(L_{\text{e}}^t) = c_{\text{e}}L_{\text{e}}^t \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $c_{\text{d}}$  和  $c_{\text{e}}$  分别为分布式电源发电和储能放电的单位成本;  $L_{\text{d}}^t$  和  $L_{\text{e}}^t$  分别为分布式电源发电和储能放电的消纳负荷。

从主网的购电成本  $C_{\text{mg}}^t$  可由二次多项式模型<sup>[13]</sup>表示。

$$C_{\text{mg}}^t(L_{\text{m}}^t) = aL_{\text{m}}^t{}^2 + bL_{\text{m}}^t + c \quad (12)$$

$$L_{\text{m}}^t = L^t - L_{\text{d}}^t - L_{\text{e}}^t \quad (13)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为主网发电成本多项式参数;  $L_{\text{m}}^t$  为主网发电消纳负荷。

则由式(12)、式(13)可得:

$$C_{\text{g}}^t(L^t) = aL_{\text{m}}^t{}^2 + bL_{\text{m}}^t + c_{\text{d}}L_{\text{d}}^t + c_{\text{e}}L_{\text{e}}^t + c \quad (14)$$

由于对  $t$  时间段的负荷  $L^t$ , 其中分配给分布式电源发电的消纳负荷  $L_{\text{d}}^t$  和储能放电的消纳负荷  $L_{\text{e}}^t$  是确定的, 因此, 式(14)可以化简为

$$C_{\text{g}}^t(L_{\text{m}}^t) = aL_{\text{m}}^t{}^2 + bL_{\text{m}}^t + c' \quad (15)$$

其中

$$c' = c_{\text{d}}L_{\text{d}}^t + c_{\text{e}}L_{\text{e}}^t + c \quad (16)$$

博弈存在唯一纳什均衡的充要条件是博弈的收益函数为连续可微的严格凸函数。明显, 式(15)中配电网总发电成本  $C_{\text{g}}^t(L^t)$  的求解函数为严格凸函数, 因此该博弈存在唯一的纳什均衡。

负荷之间的非合作博弈的具体实施步骤为<sup>[14]</sup>:

1) 用户接收主网发电成本函数和相关参数, 并根据文献[14]计算可平移负荷  $L_{\text{s}}^t$ 。

2) 系统控制中心接收所有用户的负荷预测值和 DG 发电预测值, 计算主网消纳负荷, 并发送给每个用户, 各用户再根据配电网总发电成本函数  $C_{\text{g}}^t(L^t)$ , 以其购电成本最小化为目标优化可平移负荷, 得到  $L_{\text{s}}^t$ 。

3) 对比  $L_{\text{s}}^t$  和  $L_{\text{s}}^t$ , 若相等, 则结束流程; 不相等

则用  $L_{\text{s}}^t$  代替  $L_{\text{s}}^t$ , 重复以上步骤。

通过以上步骤, 用户间的博弈便达到了纳什均衡, 并得到了最优可平移负荷。

### 3 经济调度模型

#### 3.1 目标函数

该调度问题涉及到微网、配电网、负荷多方面的利益, 本文采用多目标优化来实现各方利益的均衡。

1) 目标一: 系统发电运行成本最小

系统发电运行成本  $C_{\text{RZ}}$  包括微网运行成本  $C_{\text{Rmicro}}$ 、网间互动运行成本  $C_{\text{Rs}}$  以及配网运行成本  $C_{\text{Rdis}}$  :

$$C_{\text{RZ}} = C_{\text{Rmicro}} + C_{\text{Rs}} + C_{\text{Rdis}} \quad (17)$$

$$\begin{cases} C_{\text{Rmicro}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{j=1}^{D_i} (c_{\text{fuel}}^j + c_{\text{om}}^j) P_{\text{dg}}^{i,j,t} + c_{\text{e}} P_{\text{eg}}^{i,t} \right] + \\ \quad c_{\text{m}} (P_{\text{mL}}^{i,t} - \sum_{j=1}^{D_i} P_{\text{dg}}^{i,j,t} - P_{\text{eg}}^{i,t} - P_{\text{Si}}^t) \\ C_{\text{Rs}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [c_{\text{s}} P_{\text{Si}}^t + c_{\text{m}} (P_{\text{mL}}^{i,t} - \sum_{j=1}^{D_i} P_{\text{dg}}^{i,j,t} - P_{\text{eg}}^{i,t} - P_{\text{Si}}^t)] \\ C_{\text{Rdis}} = \sum_{i=1}^T [c_{\text{s}} P_{\text{D}}^t + c_{\text{m}} (P_{\text{L}}^t - \sum_{j=1}^{\text{RZ}} P_{\text{rdg}}^{j,t} - \sum_{j=1}^{\text{DZ}} P_{\text{dg}}^{j,t} - \sum_{j=1}^{\text{EZ}} P_{\text{eg}}^{j,t})] \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $N$  为配网中微网总数;  $T$  为系统总运行时段;  $c_{\text{fuel}}^j$  为第  $j$  种 DG 的燃料成本(风光发电的燃料成本为 0);  $c_{\text{om}}^j$  为第  $j$  种 DG 的单位运行维护成本;  $c_{\text{e}}$  为单位储能运行成本;  $c_{\text{m}}$  为市场电价;  $c_{\text{s}}$  为单位互动运行成本, 该参数综合考虑各种电源的发电成本。

2) 目标二: 配电网的电网损耗最小

配电网网损包括输电线路损耗、变压器和变流器损耗以及其他设备的损耗。本文仅计入输电线路损耗、变压器和变流器损耗, 由于变流器和变压器的损耗计算较复杂, 本文采用转换效率来描述其损耗, 则配电网的网损  $W_{\text{loss}}$  为

$$W_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (P_{\text{lloss}}^{i,t} + P_{\text{closs}}^{i,t}) + \sum_{i=1}^T (P_{\text{lloss}}^t + P_{\text{closs}}^t) N_l \quad (19)$$

$$\begin{cases} P_{\text{lloss}}^{i,t} = \sum_{l=1}^{N_l} ((P_l^{i,t})^2 + (Q_l^{i,t})^2) r_l \\ P_{\text{closs}}^{i,t} = \sum_{v=1}^{N_v} (1 - \eta_{\text{trans}}) P_v^{i,t} + \sum_{w=1}^{N_w} (1 - \eta_{\text{conv}}) P_w^{i,t} \end{cases} \quad (20)$$

式中: 第一项表示微网与配网传输功率的损耗; 第二项表示配网传输功率的损耗;  $P_{\text{lloss}}^{i,t}$  和  $P_{\text{closs}}^{i,t}$  分别为微网和配电网对第  $i$  个微网提供备用时的线路损耗

和变压器及变流器损耗； $P_{\text{loss}}^i$  和  $P_{\text{closs}}^i$  分别为各电源对配网负荷供电时的线路损耗和变压器及变流器损耗； $P_l^{i,l}$  和  $Q_l^{i,l}$  分别为微网  $i$  中线路  $l$  末端等效的有功和无功负荷值； $r_l$  是线路的等效电阻； $N_i$  是微网  $i$  中的线路总数； $P_v^{i,v}$  和  $P_w^{i,w}$  分别为微网  $i$  中流过第  $v$  个变压器和第  $w$  个变流器的有功功率； $\eta_{\text{trans}}$  和  $\eta_{\text{conv}}$  分别为变压器和变流器的平均转换效率； $N_v$  和  $N_w$  分别为第  $i$  个微网中变压器总数和变流器总数。

3) 目标三：配电网各节点电压偏移合格率最大

本文以电压偏移合格率<sup>[15]</sup>作为配电网电压的评价标准，合格的电压偏移是指 10 kV 线路的电压偏移在额定电压的 $\pm 7\%$ 之内，将电压偏移合格的节点所占的比例定义为电压偏移合格率  $\mu_V$ ，可以表示为

$$\mu_V = n_{\text{qua}} / n_{\text{total}} \quad (21)$$

式中： $n_{\text{qua}}$  为电压合格的节点数； $n_{\text{total}}$  为配网中节点总数。

### 3.2 多目标化作单目标

本文综合考虑了系统发电运行成本、配电网的电网损耗和各节点电压偏移合格率。对于这个多目标优化问题，其最优解与各子目标的最优解密切相关，但子目标之间往往相互矛盾，很难同时到达最优解<sup>[16-18]</sup>。通过对各目标赋权并相加得到一个正系数的单目标函数是多目标求解的有效方法之一。赋权方法分为主观赋权法和客观赋权法，层次分析法是一种基于人的经验和判断的主观赋权法，主成分分析与熵权法则是根据数据本身的联系计算权值的客观赋权法。本文将主成分分析法<sup>[19]</sup>、层次分析法(AHP)和熵权法相结合，综合各种赋权法的主观性和客观性。采用 Delphi 法<sup>[20]</sup>将三种赋权法结合，得到一种综合权值  $\rho_i (i=1, 2, 3)$ ：

$$\rho_i = \phi_1 \rho_{\text{fuz},i} + \phi_2 \rho_{\text{ahp},i} + \phi_3 \rho_{\text{ew},i} \quad (22)$$

式中： $\rho_{\text{fuz},i}$ 、 $\rho_{\text{ahp},i}$  和  $\rho_{\text{ew},i}$  分别为第  $i$  个子目标对应主成分分析、层次分析法和熵权法的权重； $\phi_1$ 、 $\phi_2$  和  $\phi_3$  分别为重要度系数，且满足  $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ 。

对于重要度系数的确定，基于博弈论的思想在可能的权重向量中找到最优的权重向量。该问题可以转化为对重要度系数  $\phi_j$  的优化，优化目标为最优权重与各权重  $\rho_{wi}$  的离差最小值<sup>[21]</sup>：

$$\min \left\| \sum_{j=1}^3 \phi_j \rho_{wj}^T - \rho_{wi}^T \right\| (i=1, 2, 3) \quad (23)$$

式中， $\rho_{wi}$  为第  $i$  种赋权法的权重向量。

式(23)最优解的一阶导数条件为

$$\sum_{j=1}^3 \phi_j \times \rho_{wj} \times \rho_{wj}^T = \rho_{wi} \times \rho_{wi}^T \quad (24)$$

根据式(24)求得  $\phi_j$ ，代入式(23)，再对  $\rho_i$  进行归一化处理：

$$\rho_i^* = \rho_i / \sum_{j=1}^3 \rho_j \quad (25)$$

并对子目标函数进行无量纲处理，得到的目标函数为

$$F = \min[\rho_1^* (\frac{C_{\text{RZ}}}{C_{\text{RZmax}}}) + \rho_2^* (\frac{W_{\text{loss}}}{W_{\text{lossmax}}}) + \rho_3^* (1 - \mu_V)] \quad (26)$$

式中， $C_{\text{RZmax}}$  和  $W_{\text{lossmax}}$  分别为各场景中最大发电运行成本和最大网损。

### 3.3 约束条件

1) 配网中功率与电压限制

$$\begin{cases} P_{\min} \leq P^t \leq P_{\max} \\ Q_{\min} \leq Q^t \leq Q_{\max} \\ U_{\min} \leq U^t \leq U_{\max} \end{cases} \quad (27)$$

式中， $P_{\max}$  与  $P_{\min}$ 、 $Q_{\max}$  与  $Q_{\min}$ 、 $U_{\max}$  与  $U_{\min}$  分别为配网中传输有功功率、无功功率以及节点电压的上、下限。

2) 潮流约束<sup>[4]</sup>

$$\begin{cases} P_{\text{gz}}^t - P_{\text{L}}^t - P_{\text{S}}^t = U_i^t \sum U_j^t (G_{i,j} \cos \theta_{i,j}^t + B_{i,j} \sin \theta_{i,j}^t) \\ Q_{\text{gz}}^t - Q_{\text{L}}^t - Q_{\text{S}}^t = U_i^t \sum U_j^t (G_{i,j} \sin \theta_{i,j}^t + B_{i,j} \cos \theta_{i,j}^t) \end{cases} \quad (28)$$

式中： $P_{\text{gz}}^t$  和  $Q_{\text{gz}}^t$  分别为 DG 总发电有功功率和无功功率； $P_{\text{S}}^t$  和  $Q_{\text{S}}^t$  为交换有功和无功功率； $U_i^t$  和  $U_j^t$  为相邻两节点  $i$ 、 $j$  的电压； $\theta_{i,j}^t$  为相邻两节点  $i$ 、 $j$  的电压相角差。

3) DG 功率约束

$$\begin{cases} P_{\text{dgs min}} \leq P_{\text{dgs}}^t \leq P_{\text{dgs max}} \\ Q_{\text{dgs min}} \leq Q_{\text{dgs}}^t \leq Q_{\text{dgs max}} \end{cases} \quad (29)$$

4) 储能功率与容量约束

$$\begin{cases} P_{\text{eg min}} \leq P_{\text{eg}}^t \leq P_{\text{eg max}} \\ S_{\text{OC min}} \leq S_{\text{OC}}^t \leq S_{\text{OC max}} \end{cases} \quad (30)$$

式中： $S_{\text{OC}}^t$  为储能的当前荷电状态； $S_{\text{OC max}}$  和  $S_{\text{OC min}}$  为储能荷电状态的上、下限。

5) DG 的爬坡约束<sup>[4]</sup>

$$\begin{cases} P_{\text{dgi}}^t - P_{\text{dgi}}^{t-1} \leq r_{\text{dgi}}^{\text{up}} \\ P_{\text{dgi}}^{t-1} - P_{\text{dgi}}^t \leq r_{\text{dgi}}^{\text{down}} \end{cases} \quad (31)$$

式中， $r_{\text{dgi}}^{\text{up}}$  和  $r_{\text{dgi}}^{\text{down}}$  分别为第  $i$  种 DG 上、下爬坡约束。

## 6) 备用容量约束

$$P_{S_i}^i \leq P_{S_{\max}} \quad (32)$$

式中,  $P_{S_{\max}}$  为最大网间互动备用容量, 此约束为保证全网备用容量的均衡。

## 4 求解算法

本文以同类型电源调度的顺序为变量, 以上述多目标函数为目标, 优化配电网系统的运行情况。其中存在三个顺序变量, 分别为可备用的 RDPS、除风光外其他电源以及储能的调度顺序  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_3$ 。待求问题可用式(33)表示。

$$P = F\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3\} \quad (33)$$

该模型的求解为多决策变量的非线性问题, 采用改进微分进化(Improved Differential Evolution, IDE)算法对其进行求解, 具体改进如下:

## 1) 参数的动态调整

微分进化算法中, 缩放因子  $F$  选取的适当与否直接影响算法的收敛性能。当  $F > 1$  时, 算法的收敛速度会明显下降, 更大时甚至可能造成收敛困难; 但  $F$  过小时, 个体变化较小, 不利于保证种群多样性, 一般  $F$  的选取范围是(0.4,0.9)。  $F$  在搜索前期取值越大越有利于个体多样性, 在后期取值越小越有利于收敛。种群个体前期比较分散, 后期比较集中于最优个体附近。因此对  $F$  的动态调整<sup>[22]</sup>如下。

$$F = \max(F_{\min}, 1 - S_{\min}^k / S_{\max}^k) \quad (34)$$

式中:  $F_{\min}$  为 0.4;  $S_{\max}^k$  和  $S_{\min}^k$  分别为种群中最优个体和最差个体的适应度。

交叉因子  $C_R$  在搜索前期越小越有利于增强算法的局部搜索能力, 在后期越大越能防止算法陷入的局部最优。因此, 对  $C_R$  的动态调整如下:

$$C_R = \max(C_{R_{\min}}, S_{\min}^k / S_{\max}^k) \quad (35)$$

式中,  $C_{R_{\min}}$  为  $C_R$  的下界, 取为 0.3。

2) 局部增强算子<sup>[23]</sup>

在变异、交叉和选择得到新种群后, 以  $P_m$  ( $0 < P_m < 1$ ) 概率随机选择新种群中的个体, 使该部分个体接近当前种群最优解, 缩小寻优范围, 增强局部收敛能力。从而引入局部增强算子:

$$x_{i,G+1}^* = x_{\text{best},G+1} + (x_{r_1,G+1} - x_{r_2,G+1}) / \text{gen} \quad (36)$$

式中:  $x_{i,G+1}^*$  为局部增强后的新个体;  $x_{\text{best},G+1}$  为种群中的最优个体;  $x_{r_1,G+1}$  和  $x_{r_2,G+1}$  是种群中随机选取的个体, 满足  $r_1 \neq r_2 \neq i$ ,  $\text{gen}$  为迭代次数。

具体求解过程如图 2 所示。

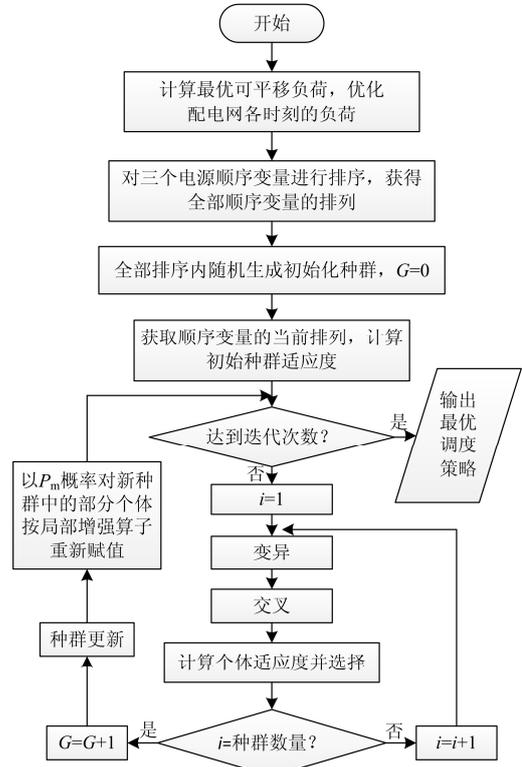


图 2 模型求解过程

Fig. 2 Model solving process

## 5 算例分析

## 5.1 基础数据

本研究采用改进的 IEEE33 节点配电网系统作为算例, 原始系统参数见文献[24], 在原始配电网系统中加入 4 个微电网、2 个风电、2 个光伏、2 个储能, 具体分布见图 3。系统的额定电压为 12.66 kV, 总有功负荷为 8949 kW, 总无功负荷为 2356 kvar。配网的负荷类型包括酒店、写字楼和居民楼, 数据参考文献[14]。配电网中风机的额定功率为 200 kW; 光伏的额定功率为 200 kW。

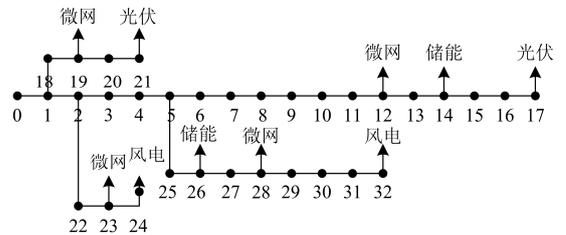


图 3 改进的 IEEE33 节点配电网系统

Fig. 3 Improved IEEE33 node distribution network system

各个微网的典型日负荷曲线和每个微网的配置参数见附录 2。式(12)中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别取 0.0006、0.15

和 $0^{[14]}$ ,容量-位置权衡因子 $\delta$ 和 $\varphi$ 分别取0.5和0.5, $\eta_{trans}$ 和 $\eta_{conv}$ 分别取96.5%和98%<sup>[25]</sup>。根据本文所提出的综合定权法,得到一组权重值: $\rho_1 = 0.38$ , $\rho_2 = 0.36$ , $\rho_3 = 0.26$ 。微分进化算法中,种群大小设为20,个体长度设为20,交叉因子设为0.5,变异因子设为0.4。配网系统中其他参数<sup>[26-28]</sup>如表1所示。

表1 系统参数

Table 1 Value of system parameters

序号	系统参数	数值
1	MT的燃料成本/元	3.10
2	光伏单位运维成本/元	0.054
3	风电单位运维成本/元	0.067
4	MT单位运维成本/元	0.04
5	储能单位运行成本/元	0.05
6	市场电价/元	0.65
7	单位互动运行成本/元	0.17

在三种顺序变量中,第一个顺序变量(可备用的风电或光伏)有7个元素,分别是4个微网风电、1个配网光伏和2个配网风电;第二个顺序变量(微网的MT)有4个元素,分别为4个微网MT;第三个顺序变量有6个元素,包括4个微网储能和2个配网储能。

## 5.2 结果分析

### 5.2.1 仿真结果

本文通过分析几种不同的场景来对比体现本方法独特的优势,在上述数据相同的情况下,考虑以下几种场景:1)不考虑需求响应,且微网与配网不互相备用;2)考虑需求响应,但微网与配网不互相备用;3)不考虑需求响应,但微网与配网相互备用;4)本方法既考虑需求响应,且微网与配网相互备用。

图4为各个节点不同时刻的有功功率,图5为两种场景下不同电源节点的有功出力,节点1~6分别对应改进33节点配网中微网1的风电(节点12)、配网的风电(节点24)、微网2的MT(节点19)、微网3的储能(节点23)、配网的储能(节点14)和主网(节点0)。可以观察到,场景1的风电和MT出力较大,场景4的主网出力较大。

表2为不同场景下配网运行指标,场景4相对于其他场景在各个指标下都是最优的。场景1相对于场景2的发电运行总成本高2.56%,主要由于没有考虑需求响应,导致可再生能源较大时需求较小;场景1相对于场景3的发电运行总成本高13.34%,主要由于微网和配网没有相互备用导致主网供电量太大。

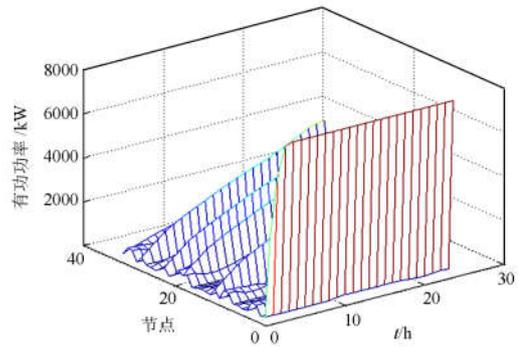


图4 各个节点不同时刻的有功功率

Fig. 4 Active power of each node at different time

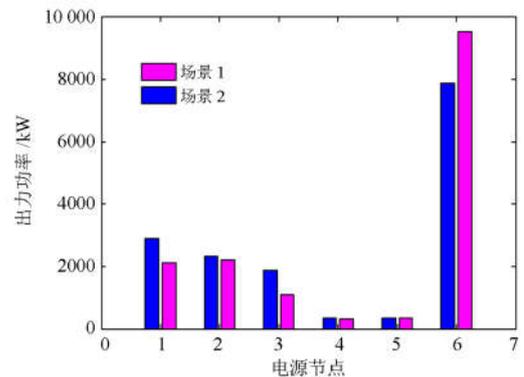


图5 两种场景下不同电源节点的有功出力

Fig. 5 Active power of different power source nodes in two scenario

表2 不同场景下配网运行指标

Table 2 System related parameters in different scenarios

	系统发电运行 总成本/万元	配网网损/ kWh	电压偏移 合格率/%	目标函数值
场景1	18.01	556.06	95	0.8728
场景2	17.56	498.15	96	0.8584
场景3	15.89	456.98	96	0.7688
场景4	15.07	441.6	96	0.7296

### 5.2.2 对可再生能源的消纳能力

定义配电网中可再生能源的利用率为可再生能源发电量占总电源发电量的比重。由图6可知,场景4即本方法下的可再生能源利用率始终较高,最高可达60.27%,而场景1的可再生能源利用率最高只能达到40.35%,说明所提出的方法可有效提高配电网对可再生能源的消纳能力。

### 5.2.3 综合定权-IDE 的优势

图7为综合定权-IDE法、熵权-IDE法、AHP-IDE法以及综合定权-DE法下系统的发电运行总成本对比图。可知,四个场景中多数场景下,AHP-IDE法对应的总成本最高,综合定权-DE法和熵权-IDE法次之,综合定权-IDE法最小。因为层次分析法的主

观性较强, 赋权效果一般, 传统 DE 算法寻优能力较弱。而综合定权-IDE 法同时考虑主观判断和客观因素, 并结合寻优能力更好的改进 DE 算法, 所得到的优化结果更好。

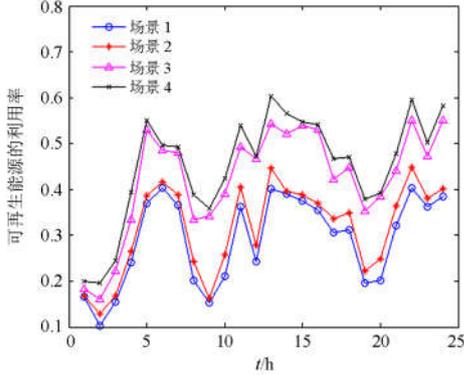


图 6 不同场景下可再生能源的利用率

Fig. 6 Utilization ratio of renewable energy in different scenarios

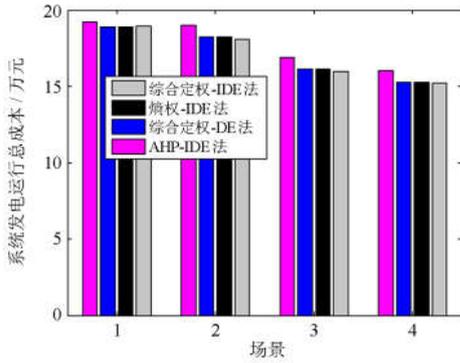


图 7 不同方法下系统发电运行总成本对比图

Fig. 7 Comparison of total cost of power generation operation under different methods

#### 5.2.4 权衡因子 $\delta$ 和 $\varphi$ 取值对结果的影响

由于  $\delta + \varphi = 1$ , 只需考虑  $\delta$  对结果的影响。由图 8 可知, 随权衡因子  $\delta$  的增加, 目标函数逐渐变

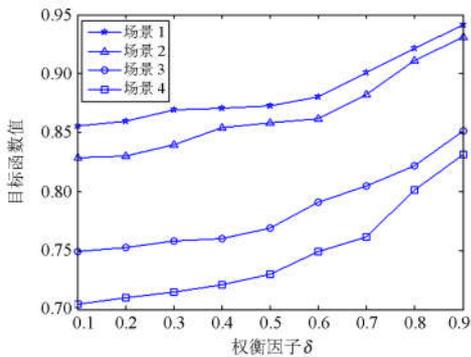


图 8 不同权衡因子  $\delta$  下目标函数值对比图

Fig. 8 Comparison of objective function values under different weighing factors  $\delta$

大, 说明位置对系统线损的影响较大,  $\delta$  越小系统的经济性越好。但  $\delta$  过小, 会导致近距离备用使用过量, 使系统备用容量的不平衡。且当  $\delta$  在  $[0.1, 0.5]$  时, 目标函数随  $\delta$  的变化并不大。为保证系统备用的平衡, 同时减少线路损耗, 应使  $\delta$  在  $[0.3, 0.5]$  内取值。

## 6 结论

本文通过博弈论与备用机制构造了主动配电网的多层调度策略, 并以各电源调度的顺序为变量, 以由发电运行成本、网损和电压偏移合格率构成的系统综合评价指标最小为目标, 建立了主动配电网的多目标经济调度模型, 利用改进微分进化算法对其求解, 得到了以下结论:

1) 考虑需求响应和配网与微网相互备用, 可以提高主动配电网对可再生能源的消纳能力, 且相互备用相对于需求响应对系统运行经济性影响更大;

2) 采用结合主成分分析法、层次分析法和熵权法的综合定权指标, 并结合改进 DE 算法对系统调度策略进行优化, 可有效提升系统的经济性。

### 附录 1

$$a^t = \begin{cases} 1, & P_L^t > \sum_{j=1}^{RZ} P_{rdg\ max}^{j,t} \\ 0, & P_L^t \leq \sum_{j=1}^{RZ} P_{rdg\ max}^{j,t} \end{cases} \quad (I)$$

$$b^t = \begin{cases} 1, & P_L^t > \sum_{j=1}^{RZ} P_{rdg\ max}^{j,t} + \sum_{i=1}^{DZ} P_{dgs\ max}^{i,t} \\ 0, & P_L^t \leq \sum_{j=1}^{RZ} P_{rdg\ max}^{j,t} + \sum_{i=1}^{DZ} P_{dgs\ max}^{i,t} \end{cases} \quad (II)$$

$$L_{\omega}^t = \begin{cases} 1 & \lambda_{\omega}^t = \max(\bigcup_{p=1}^{DZ} \lambda_{p,\omega}^t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (III)$$

$$N_{\omega}^t = \begin{cases} 1 & \theta_{\omega}^t = \max(\bigcup_{p=1}^{EZ} \theta_{p,\omega}^t) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (IV)$$

式中:

$$L_i^t = [L_{i,1}^t, L_{i,2}^t, \dots, L_{i,DZ}^t], \quad N_i^t = [N_{i,1}^t, N_{i,2}^t, \dots, N_{i,EZ}^t],$$

$$P_{rdg}^{j,t} = [P_{rdg}^{j,t,1}, P_{rdg}^{j,t,2}, \dots, P_{rdg}^{j,t,EZ}]^T, \quad P_{dg}^{i,t} = [P_{dg}^{i,t,1}, P_{dg}^{i,t,2}, \dots, P_{dg}^{i,t,DZ}]^T,$$

$$P_{eg}^{p,t} = [P_{eg}^{p,t,1}, P_{eg}^{p,t,2}, \dots, P_{eg}^{p,t,EZ}]^T, \quad RZ、DZ \text{ 和 } EZ \text{ 分别为配网和微网中可再生能源(风、光)、微网中除风}$$

光外其他微源和储能的总数。

附录 2

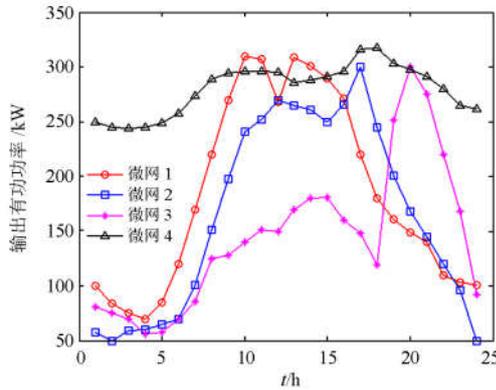


图 1 各个微网的典型日负荷曲线

Fig. 1 Typical daily load curve of each microgrid

表 1 微网参数

Table 1 Parameters of microgrids

	光伏 功率/kW	风机 功率/kW	储能 功率/kW	储能 容量/kWh	MT 功率/kW
微网 1	160	150	80	300	100
微网 2	160	120	80	300	150
微网 3	150	100	80	250	100
微网 4	200	200	100	300	100

参考文献

[1] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网储能系统的多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 46-52.  
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi objective optimal placement of energy storage systems in active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 46-52.

[2] YAO D L, CHOI S S, TSENG K J, et al. Determination of short-term power dispatch schedule for a wind farm incorporated with dual-battery energy storage scheme[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 74-84.

[3] 胡勇. 主动配电网用户侧能量管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 149-155.  
HU Yong. Design and implementation of user energy management system on active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 149-155.

[4] 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.

[5] 沙熠, 邱晓燕, 宁雪姣, 等. 协调储能与柔性负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1394-1399.  
SHA Yi, QIU Xiaoyan, NING Xuejiao, et al. Multi-objective optimization of active distribution network by coordinating energy storage system and flexible load[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1394-1399.

[6] 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.

[7] 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 of active distribution network using chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 45-52.

[8] 钟清, 张文峰, 周佳威, 等. 主动配电网分层分布控制策略及实现[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1511-1517.  
ZHONG Qing, ZHANG Wenfeng, ZHOU Jiawei, et al. Hierarchical and distributed control strategy for active distribution network & its implementation[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1511-1517.

[9] 邱晓燕, 沙熠, 宁雪姣, 等. 大规模风电接入的智能电网多类型柔性负荷分级优化调度[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2084-2091.  
QIU Xiaoyan, SHA Yi, NING Xuejiao, et al. Hierarchical optimization of multi-type flexible load in smart grid with large-scale wind generation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2084-2091.

[10] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.  
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.

[11] 蒲天骄, 刘克文, 李焱, 等. 基于多代理系统的主动配电网自治协同控制及其仿真[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1864-1874.  
PU Tianjiao, LIU Kewen, LI Ye, et al. Multi-agent system based simulation verification for autonomy-cooperative optimization control on active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1864-1874.

[12] 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.
- [13] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S, JATSKEVICH J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 320-331.
- [14] 马丽, 刘念, 张建华, 等. 自动需求响应模式下光伏用户群的优化运行模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3422-3432.  
MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Optimal operation model of user group with photovoltaic in the mode of automatic demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3422-3432.
- [15] 马丽叶, 卢志刚, 胡华伟. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.  
MA Liye, LU Zhigang, HU Huawei. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171.
- [16] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 57-66.  
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 57-66.
- [17] 谭兴国, 王辉, 张黎, 等. 微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 7-14.  
TAN Xingguo, WANG Hui, ZHANG Li, et al. Multi-objective optimization of hybrid storage and assessment indices in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 7-14.
- [18] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-1088.  
LIU Wenyong, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [19] 韩小孩, 张耀辉, 孙福军, 等. 基于主成分分析的指标权重确定方法[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(10): 124-126.  
HAN Xiaohai, ZHANG Yaohui, SUN Fujun, et al. Index weight determination method based on principal component analysis[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012, 33(10): 124-126.
- [20] 胡振华, 黎春秋, 熊勇清. 基于“AHP-IE-PCA”组合赋权法的战略性新兴产业选择模型研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2011, 32(7): 104-110.  
HU Zhenhua, LI Chunqiu, XIONG Yongqing. Research on selection model of strategic emerging industries based on combination weights: AHP-IE-PCA[J]. Science of Science and Management of S & T, 2011, 32(7): 104-110.
- [21] 山成菊, 董增川, 樊孔明, 等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 622-628.  
SHAN Chengju, DONG Zengchuan, FAN Kongming, et al. Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(6): 622-628.
- [22] 李国庆, 冀瑞芳, 张健, 等. 基于改进微分进化算法的可用输电能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 22-27.  
LI Guoqing, JI Ruifang, ZHANG Jian, et al. Study of available transfer capability based on improved differential evolution algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 22-27.
- [23] 赵光权. 基于贪婪策略的微分进化算法及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
ZHAO Guangquan. Differential evolution algorithm with greedy strategy and its applications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [24] GOSWAMI S K, BASU S K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484-1491.
- [25] ANAND S, FERNANDES B G. Optimal voltage level for DC microgrids[C] // IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, November 7-10, 2010, Glendale, USA: 3034-3039.
- [26] GARCIA-TORRES F, BORDONS C. Optimal economical schedule of hydrogen-based microgrids with hybrid storage using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 5195-5207.
- [27] BOCKLISCH T. Hybrid energy storage approach for renewable energy applications[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 8: 311-319.
- [28] 黄伟, 黄婷, 周欢, 等. 基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 211-217.  
HUANG Wei, HUANG Ting, ZHOU Huan, et al. Dynamic economic dispatch for microgrid based on improved differential evolution algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 211-217.

收稿日期: 2017-01-18; 修回日期: 2017-03-23

作者简介:

王甜婧(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为主动配电网与储能的优化调度; E-mail: 18810303378@163.com

许阔(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为主动配电网与保护控制; E-mail: xu\_kuo@126.com

朱永强(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电与智能电网。E-mail: zyq@ncepu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)