

基于元模型辅助粒子群算法的主动配电网最优经济运行

唐 佳¹, 王 丹¹, 贾宏杰¹, 张 逸², 熊 军³, 黄仁乐⁴

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072;

2. 国网福建省电力公司电力科学研究院, 福建省福州市 350007;

3. 国网厦门供电公司, 福建省厦门市 361004; 4. 国网北京市电力公司, 北京市 100031)

摘要: 主动配电网的优化运行研究是主动配电网实现经济、可靠运行的关键技术。建立了主动配电网的最优经济运行模型并以周期内系统总运行成本最低为目标函数来调度。在该模型中, 综合考虑了主动配电网中的多种可调资源, 例如分布式电源、储能设备、调压器、可投切电容器组及可中断负荷。针对所建立的主动配电网最优经济运行模型, 提出了一种考虑约束处理机制的 Kriging 元模型与改进模糊粒子群算法相结合的混合求解算法, 实现了对上述复杂问题的求解。算例的仿真结果验证了所提出的模型及求解算法的有效性。

关键词: 主动配电网; 经济运行; Kriging 元模型; 粒子群优化

0 引言

为了缓解日益突出的环境污染、传统能源紧缺的问题, 以风力发电、光伏发电为代表的可再生清洁能源接入电网的比例日益增高, 有效解决大规模新能源接入电网引入的功率波动特性将是一份十分艰巨的任务^[1-2]。传统配电网的简单控制无法有效解决系统对可再生能源的消纳能力、电动汽车渗透率的问题。在此背景下, 主动配电网(active distribution network, ADN)技术应运而生, 其核心是在先进的信息通信、电力电子及自动化技术的基础上, 充分利用配电系统中的可控资源(分布式发电单元、储能设备、联络开关、可控负荷等), 通过 ADN 的“源-网-荷”协调控制, 实现可再生能源的规模化接入、提高配电网运行的经济性、保障用户用电质量和供电可靠性^[3-5]。

ADN 的优化运行策略研究是 ADN 相关技术研究的核心和热点^[6-10]。在 ADN 中, 控制变量既有连续变量(分布式发电单元出力、储能设备充放电功率等), 又有离散变量(调压器抽头位置、可投切电容器组投切状态等); 既包含线性约束(功率上下限约束等), 又包含非线性约束(潮流等式约束、节点电压

约束等)。因此, ADN 的优化运行是一个复杂的混合整数非线性规划(MINLP)问题。由于基于传统内点法的求解效果不甚理想, 不依赖梯度、适应性更广的智能算法得到了广泛的应用。文献[11]利用遗传算法(GA), 实现了有载调压开关(OLTC)和电容器组的日前最优调度, 降低了系统网损; 文献[12]建立了 ADN 优化调度模型, 采用智能单粒子优化算法(PSO), 降低了系统的运行成本; 文献[13]利用混合的 GA 和蚁群算法(ACO), 实现了配电系统的经济运行; 文献[14]建立了配电系统的多目标电压/无功优化模型, 提出了一种混合 ACO 和粒子群算法(PSO)的求解方法, 有效降低了系统运行成本和网损。

智能算法虽然在 ADN 的优化运行求解当中得到了广泛的研究与应用, 但是存在以下问题: ①缺乏有效的约束处理机制, 导致求解效率降低; ②由于智能算法需要进行大量的潮流仿真计算, 尤其针对三相建模的复杂配电网, 降低了求解速度。基于上述研究背景, 本文针对典型的配网资源设备, 如分布式发电单元、储能设备、调压器和可投切电容器组及可中断负荷, 建立 ADN 最优经济运行模型。针对建立的优化模型, 提出了一种带约束处理机制的 Kriging 元模型与模糊改进粒子群算法相结合的混合求解算法(hybrid algorithm of Kriging model and modified fuzzy particle swarm optimization, HA-KMFPSO)进行求解。最后, 通过算例仿真分析并与传统算法相比较, 验证了本文建立的模型及求解算法的有效性。

收稿日期: 2017-06-30; 修回日期: 2017-10-13。

上网日期: 2018-01-03。

国家自然科学基金资助项目(51407125); 国家电网公司科技项目“集成大规模柔性负荷的智能配电网规划关键技术研究”; 天津市 131 创新团队支持项目。

1 ADN 最优经济运行数学模型

1.1 目标函数

本文建立的 ADN 最优经济运行的目标函数如下:

$$\min(f(x)) = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_{\text{sub}}} C_{i,t}^b P_{i,t}^b \Delta t + \sum_{i=1}^{N_{\text{dg}}} C_i^{\text{dg}} P_{i,t}^{\text{dg}} \Delta t + \sum_{i=1}^{N_{\text{bat}}} (s_{i,t}^c C_i^c P_{i,t}^{\text{bat}} + s_{i,t}^d C_i^d |P_{i,t}^{\text{bat}}|) \Delta t + \sum_{i=1}^{N_{\text{IL}}} C_i^{\text{IL}} P_{i,t}^{\text{IL}} \Delta t + \sum_{i=1}^{N_{\text{tap}}} C_i^{\text{tap}} \min(1, |L_{i,t} - L_{i,t-1}|) + \sum_{i=1}^{N_{\text{cap}}} C_i^{\text{cap}} \min(1, |U_{i,t} - U_{i,t-1}|) \right\} \quad (1)$$

式中: T 为完整的调度周期, 调度周期间隔为 Δt ; $N_{\text{sub}}, N_{\text{dg}}, N_{\text{bat}}, N_{\text{IL}}, N_{\text{tap}}, N_{\text{cap}}$ 分别为变电站、分布式发电单元、储能电池设备、可中断负荷、调压器及可投切电容器组的数目; $s_{i,t}^c$ 和 $s_{i,t}^d$ 分别为储能单元的充电和放电状态; $C_{i,t}^b, C_i^{\text{dg}}, C_i^{\text{IL}}, C_i^{\text{tap}}, C_i^{\text{cap}}$ 分别为外网购电电价、分布式发电单元单位发电成本、可中断负荷中断补偿费用及调压器和可投切电容器组的单次操作费用; C_i^c 和 C_i^d 分别为储能单元充放电的折算成本费用; $P_{i,t}^b$ 为变电站主馈线有功功率; $P_{i,t}^{\text{dg}}$ 为分布式发电单元的有功出力大小; $P_{i,t}^{\text{IL}}$ 为可中断负荷的中断功率大小; $L_{i,t}$ 为调压器抽头位置; $U_{i,t}$ 为可投切电容器组的投切状态。

ADN 的运行费用主要包含以下 6 项: 外网购电费用、分布式发电单元发电成本费用、储能电池充、放电成本费用、可中断负荷中断补偿费用、调压器及可投切电容器组的操作费用。

1.2 约束条件

ADN 优化经济运行的约束如式(2)至式(10)所示:

1) 三相不平衡潮流等式约束

$$\begin{cases} P_{i,t}^{G,p} - P_{i,t}^{L,p} = V_{i,t}^p \sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}} \sum_m V_{j,t}^m (G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij,t}^{pm} + B_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij,t}^{pm}) \\ Q_{i,t}^{G,p} - Q_{i,t}^{L,p} = V_{i,t}^p \sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}} \sum_m V_{j,t}^m (G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij,t}^{pm} - B_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij,t}^{pm}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 和 m 为相位, 取 a, b, c; $P_{i,t}^{G,p}$ 和 $P_{i,t}^{L,p}$ 分别为节点发电有功功率和负荷功率; $Q_{i,t}^{G,p}$ 和 $Q_{i,t}^{L,p}$ 分别为节点发电无功功率和无功负荷; $V_{j,t}^m$ 和 $V_{i,t}^p$ 分别为节点 j 相位 m 和 p 的电压幅值; $\theta_{ij,t}^{pm}$ 为相角差; G_{ij}^{pm} 和 B_{ij}^{pm} 分别为节点导纳矩阵的实部与虚部。

2) 线路传输功率约束

$$S_{l,t} \leq S_l^{\text{upp}} \quad \forall l \in N_1 \quad (3)$$

式中: $S_{l,t}$ 为线路传输视在功率; S_l^{upp} 为线路传输视在功率上限; N_1 为线路数目。

3) 节点电压约束

$$\underline{V}_i^p \leq V_{i,t}^p \leq \bar{V}_i^p \quad \forall i \in N_{\text{bus}} \quad (4)$$

式中: \bar{V}_i^p 和 \underline{V}_i^p 分别为节点电压的上下限, 本文取 $\underline{V}_i^p = 0.95$, $\bar{V}_i^p = 1.05$; N_{bus} 为节点数目。

4) 分布式发电单元有功/无功出力约束

$$\begin{cases} \underline{P}_i^{\text{dg}} \leq P_{i,t}^{\text{dg}} \leq \bar{P}_i^{\text{dg}} \\ \underline{Q}_i^{\text{dg}} \leq Q_{i,t}^{\text{dg}} \leq \bar{Q}_i^{\text{dg}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: \bar{P}_i^{dg} 和 \bar{Q}_i^{dg} 分别为分布式发电单元 i 有功出力和无功出力的上边界约束; $\underline{P}_i^{\text{dg}}$ 和 $\underline{Q}_i^{\text{dg}}$ 分别为分布式发电单元 i 有功出力和无功出力的下边界约束; $Q_{i,t}^{\text{dg}}$ 为分布式发电单元的无功出力大小。

5) 储能约束

$$\begin{cases} \Delta s_i \leq \Delta s_{i,t} \leq \Delta \bar{s}_i \\ \underline{S}_i \leq S_{i,t} \leq \bar{S}_i \\ S_{i,t} = S_{i,0} + \sum_{j=1}^t \Delta s_{i,j} \\ \Delta \bar{s}_i = \frac{\eta_i^c \bar{P}_i^{\text{bat}} \Delta t}{B_i} \\ \Delta \underline{s}_i = \frac{P_i^{\text{bat}} \Delta t}{\eta_i^d B_i} \end{cases} \quad (6)$$

式中: \bar{P}_i^{bat} 和 P_i^{bat} 分别为储能充放电功率上下边界; $S_{i,t}$ 为储能单元 i 在 t 时刻的荷电状态(SOC)大小, $S_{i,0}$ 为初始时刻储能 SOC 大小; $\Delta s_{i,t}$ 为储能单元 i 相邻时间段的 SOC 变化量; $\Delta s_{i,j}$ 为相邻时段的 SOC 变化量; $\Delta \bar{s}_i$ 和 $\Delta \underline{s}_i$ 分别为相邻时段 SOC 变化率的上下限值; η_i^c 和 η_i^d 分别为储能单元 i 的充、放电效率; B_i 为储能单元 i 的电池容量。

6) 调压器抽头约束

$$\underline{L}_i \leq L_{i,t} \leq \bar{L}_i \quad L_{i,t} \in \mathbf{Z} \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T \min(1, |L_{i,t} - L_{i,t-1}|) \leq M_{T,i} \quad (8)$$

式中: \bar{L}_i 和 \underline{L}_i 分别为调压器 i 抽头位置的最大、最小值; $M_{T,i}$ 为调压器 i 抽头在调度周期 T 内最大允许动作次数。

7) 可投切电容器组约束

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T \min(1, |U_{i,t} - U_{i,t-1}|) \leq M_{C,i} \\ U_{i,t} = 0 \text{ 或 } 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $M_{C,i}$ 为电容器组 i 在调度周期 T 内最大允许动作次数。

8)可中断负荷约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{IL}} \leq \bar{P}_{i,t}^{\text{IL}} \\ \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{IL}} \Delta t \leq M_{\text{IL},i} \end{cases} \quad \forall i \in N_{\text{IL}} \quad (10)$$

式中: $\bar{P}_{i,t}^{\text{IL}}$ 为可中断负荷 i 在 t 时刻的最大中断功率; $M_{\text{IL},i}$ 为可中断负荷 i 在调度周期 T 内最大允许中断电量。

2 ADN 最优经济运行求解算法

由本文第 1 节建立的 ADN 经济运行模型中,既有连续控制变量(分布式电源处理出力、储能设备充放电功率等),又有离散控制变量(调压器抽头位置、电容器组投切状态),其本质上是一个 MINLP 问题。对于该类问题,传统的基于梯度的优化算法,比如内点法、序列二次规划算法等,求解效果不理想^[15]。因此,不依赖于梯度、适应性更广的智能算法正受到越来越多的关注。PSO 以其简单、快速收敛特性在求解 MINLP 问题中得到了广泛的运用^[16-17]。但是,PSO 虽然衍生出了许多改进算法^[18-24],依然存在以下问题没有得到有效解决:①求解过程中需要频繁地调用潮流仿真程序,降低求解速度;②缺乏有效的约束处理方法。

针对上述优化问题的求解,本文基于参考文献[22]中的改进模糊粒子群优化算法(modified fuzzy particle swarm optimization, MFPSO),提出了一种带约束处理机制的 HA-KMFPSO。

2.1 Kriging 元模型

所谓元模型,即指在分析和优化设计过程中用于近似代替复杂和费时的“黑箱”系统的数学模型^[25]。通过元模型的引入,可以降低优化问题的难度,有效提高求解效率。在当前,多种元模型技术在工程领域得到了广泛的应用,比如,响应面模型、径向基函数模型、Kriging 模型、支持向量回归模型等^[26]。在上述元模型中,Kriging 元模型因其对于复杂非线性系统具有较高的近似精度及独特的误差估计功能,正得到广大研究人员的高度关注。因此,为了提高优化求解算法的速度,本文采用 Kriging 元模型对 ADN 的潮流进行近似计算。文献[27]对 Kriging 元模型的基本原理进行了详细的介绍,本文不再赘述。本文采用基于 MATLAB 的 DACE 工具箱^[27]构造 Kriging 元模型。

基于元模型的优化方法主要可以分为两类:静态元模型优化(static surrogate-based optimization, SSBO)与动态元模型优化(dynamic surrogate-

based optimization, DSBO)。所谓 SSBO,即在优化求解过程中,元模型不再进行更新,优化结果很大程度上依赖初始元模型的近似精度;所谓 DSBO,即在优化求解过程中,元模型通过有选择地新加入样本点进行更新,提高了元模型的近似精度,保证了优化求解结果的正确性。文献[26]通过大量的数值仿真指出,在求解复杂优化问题时,DSBO 比 SSBO 具有更好的求解效果。因此,为了保证求解结果的正确性,本文提出了一种优化过程中 Kriging 元模型的动态更新机制。DSBO 的基本框架如图 1 所示。

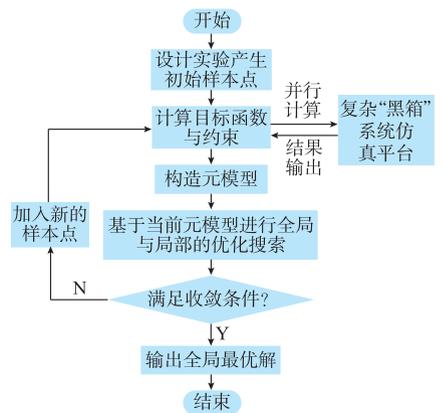


图 1 动态元模型优化流程图
Fig.1 Flow chart of DSBO

2.2 基本 PSO 算法

为了便于约束处理机制的论述,现将 PSO 算法基本原理做简单介绍^[19],如式(11)和式(12)所示:

$$\mathbf{v}_i^{(k+1)} = \omega \mathbf{v}_i^{(k)} + c_1 \mathbf{r}_{\text{and}_1} (\mathbf{p}_{\text{best}_i} - \mathbf{s}_i^{(k)}) + c_2 \mathbf{r}_{\text{and}_2} (\mathbf{g}_{\text{best}} - \mathbf{s}_i^{(k)}) \quad (11)$$

$$\mathbf{s}_i^{(k+1)} = \mathbf{s}_i^{(k)} + \mathbf{v}_i^{(k+1)} \quad (12)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N_{\text{swarm}}$,其中 N_{swarm} 为种群粒子的数目; $\mathbf{s}_i^{(k)}$ 为粒子 i 在第 k 次迭代时的空间位置; $\mathbf{v}_i^{(k)}$ 和 $\mathbf{v}_i^{(k+1)}$ 为粒子 i 在第 k 次和第 $k+1$ 次迭代时的飞行速度; $\mathbf{p}_{\text{best}_i}$ 为粒子 i 在当前迭代过程中找到的最好的解; \mathbf{g}_{best} 为所有粒子在当前迭代过程中找到的最好的解; $\mathbf{r}_{\text{and}_1}$ 和 $\mathbf{r}_{\text{and}_2}$ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; ω, c_1, c_2 为算法的控制参数。

2.3 约束处理机制

在 PSO 粒子更新过程中,粒子的位置是随机产生的,如式(11)和式(12)所示。当优化问题存在等式或者不等式约束的时候,随机产生的粒子满足约束的概率很低。这将导致 PSO 算法在不可行域进行大量搜索,降低了求解效率^[24]。因此,本文提出了基于 PSO 算法的约束处理机制(constraint handling technique, CHT),其基本思想为:在最小干预 PSO 位置更新过程的前提下,对违反约束的粒子的位置进行修正,使其尽可能满足约束。本文提

出的 CHT 的基本原理如下所述。

如式(11)所示,在粒子速度更新过程中,存在两个在区间 $[0, 1]$ 之间分布的随机数 r_{and_1} 和 r_{and_2} , 因此,在第 k 次迭代时,粒子 i 的第 j 维飞行速度的变化范围为 $[\underline{v}_{i,j}^{\min,(k)}, \bar{v}_{i,j}^{\max,(k)}]$, 计算方法如下:

$$\underline{v}_{i,j}^{\max,(k)} = \min \cdot \left(\max \left(\omega^{(k)} \underline{v}_{i,j}^{(k-1)} + \lambda \left[\begin{array}{l} c_1 (p_{\text{best}_{i,j}} - x_i^{(k-1)}) \\ c_2 (g_{\text{best}_j} - x_i^{(k-1)}) \end{array} \right], \bar{v}_{i,j}^{(k)} \right) \right) \quad (13)$$

$$\underline{v}_{i,j}^{\min,(k)} = \max \cdot \left(\min \left(\omega^{(k)} \underline{v}_{i,j}^{(k-1)} + \lambda \left[\begin{array}{l} c_1 (p_{\text{best}_{i,j}} - x_i^{(k-1)}) \\ c_2 (g_{\text{best}_j} - x_i^{(k-1)}) \end{array} \right] \right) \right) \quad (14)$$

式中: $\forall \lambda \in \{[0, 0], [0, 1], [1, 0], [1, 1]\}$; $\bar{v}_{i,j}^{(k)}$ 和 $\underline{v}_{i,j}^{(k)}$ 分别为粒子 i 的第 j 维变量的飞行速度在第 k 次迭代时的上下边界值; $x_{i,j}^{(k-1)}, v_{i,j}^{(k-1)}$ 分别为粒子 i 的第 j 维变量在 $k-1$ 次迭代时的空间位置、飞行速度; $p_{\text{best}_{i,j}}$ 为粒子 i 历史最优解的第 j 维变量值; g_{best_j} 为种群历史最优解的第 j 维变量值。

由式(11)、式(14)和式(15)可以得出,粒子 i 的第 j 维变量的变化区间 $[x_{i,j}^{\min,(k)}, x_{i,j}^{\max,(k)}]$ (本文称为“飞行区间”)为:

$$x_{i,j}^{\max,(k)} = \min(x_{i,j}^{(k-1)} + v_{i,j}^{\max,(k)}, \bar{x}_{i,j}) \quad (15)$$

$$x_{i,j}^{\min,(k)} = \max(x_{i,j}^{(k-1)} + v_{i,j}^{\min,(k)}, \underline{x}_{i,j}) \quad (16)$$

式中: $\bar{x}_{i,j}$ 和 $\underline{x}_{i,j}$ 分别为粒子 i 的第 j 维变量的上、下边界约束。

由于在 PSO 更新过程中,粒子的每一维度都存在一个“飞行区间”,意味着粒子更新的位置存在一个“可行空间”。本文提出的 CHT 的中心思想为:尽可能在粒子位置的“可行空间”内修正粒子的空间位置,使得粒子从不可行域进入可行域。为了进一步论述本文提出的 CHT 基本原理,以一个 2 维优化问题为例。

如图 2 所示,黑色圆点代表 $k-1$ 次迭代时粒子 i 的空间位置。根据式(11)和式(12),第 k 次迭代时,粒子 i 的位置如图中红色圆点所示。可以看出,更新后的粒子位置位于可行域之外。为了最少干扰 PSO 算法中粒子位置的更新过程,在可行空间中,通过对粒子位置的修正,可使得粒子从不可行域进入可行域空间,如图中蓝色圆点所示。

2.3.1 储能约束处理

当随机产生的粒子位置违反储能约束式(6)的时,该粒子中关于储能的状态变量需要进行修正。粒子 i 的第 j 台储能设备的控制变量向量为:

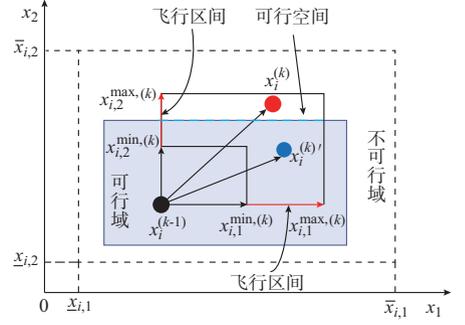


图 2 约束处理机制示意图

Fig.2 Schematic diagram of the proposed CHT based on PSO

$$\Delta s_{i,j}^{(k)} = [\Delta s_{i,j,1}^{(k)}, \Delta s_{i,j,2}^{(k)}, \dots, \Delta s_{i,j,T}^{(k)}] \quad (17)$$

在 PSO 算法寻优过程中,当粒子 i 的位置根据式(11)和式(12)更新之后,储能单元 j 的 SOC 约束将会从 $t=1$ 至 $t=T$ 逐时检验。当 SOC 某一时刻违反 SOC 约束时,储能控制变量将会进行修正。为了简化叙述过程, SOC 约束可以简化表示为:

$$\underline{H}_{i,j} \leq H_{i,j,t}^{(k)} \leq \bar{H}_{i,j} \quad t=1,2,\dots,T \quad (18)$$

其中,变量 $H_{i,j,t}^{(k)}$ 的定义如下:

$$\begin{cases} H_{i,j,t}^{(k)} = H_{i,j,t-1}^{(k)} + \Delta s_{i,j,t}^{(k)} \\ \bar{H}_{i,j} = \bar{S}_{i,j} - S_{i,j,0} \\ \underline{H}_{i,j} = S_{i,j} - S_{i,j,0} \\ H_{i,j,0}^{(k)} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\bar{H}_{i,j}$ 和 $\underline{H}_{i,j}$ 分别为变量 $H_{i,j,t}^{(k)}$ 的上下边界; $\bar{S}_{i,j}, S_{i,j}, S_{i,j,0}$ 分别为粒子 i 储能单元 j 的 SOC 上下边界和初始 SOC 值; $\Delta s_{i,j,t}^{(k)}$ 为粒子 i 储能单元 j 在 k 次迭代时, t 时段 SOC 变化量。

在 t 时刻,当 $H_{i,j,t}^{(k)}$ 违反上边界约束的时候,储能的控制变量将会进行如下调整。

正如前文所述,每一维的控制变量都有一个“飞行区间”,由此可以推导出 $H_{i,j,t}^{(k)}$ 的“飞行区间” $[H_{i,j,t}^{\min,(k)}, H_{i,j,t}^{\max,(k)}]$ 为:

$$H_{i,j,t}^{\min,(k)} = \max(\underline{H}_{i,j}, H_{i,j,t-1}^{\min,(k)} + \Delta s_{i,j,t}^{\min,(k)}) \quad (20)$$

$$H_{i,j,t}^{\max,(k)} = \min(\bar{H}_{i,j}, H_{i,j,t-1}^{\max,(k)} + \Delta s_{i,j,t}^{\max,(k)}) \quad (21)$$

式中: $\Delta s_{i,j,t}^{\min,(k)}$ 和 $\Delta s_{i,j,t}^{\max,(k)}$ 分别为粒子 i 储能单元 j 在 k 次迭代时, t 时段 SOC 变化量的“飞行区间”上、下边界值。

如图 3 所示,红色圆点表示超过上边界约束的 $H_{i,j,t}^{(k)}$, 超出量为 $\Delta E_{i,j,t}^{(k)} = \bar{H}_{i,j} - H_{i,j,t}^{(k)}$; $\Delta s_{i,j,t}^{(k)}$ 与 $H_{i,j,t-1}^{(k)}$ 分别如图 3 中的蓝色、黑色圆点所示。为了消除 $H_{i,j,t}^{(k)}$ 越上限约束的情况, $H_{i,j,t-1}^{(k)}$ 与 $\Delta s_{i,j,t}^{(k)}$ 需要适当地减少。在各维控制变量的“飞行区间”内,

$H_{i,j,t}^{(k)}$ 的最大可减少量 $M_{i,j,t}^{(k)}$ 为:

$$\begin{cases} M_{i,j,t}^{(k)} = H_{i,j,t}^{(k)} - H_{i,j,t}^{\min,(k)} = \Delta H_{i,j,t-1}^{\max,(k)} + \Delta q_{i,j,t}^{\max,(k)} \\ \Delta H_{i,j,t-1}^{\max,(k)} = H_{i,j,t-1}^{(k)} - H_{i,j,t-1}^{\min,(k)} \\ \Delta q_{i,j,t}^{\max,(k)} = \Delta s_{i,j,t}^{(k)} - \Delta s_{i,j,t}^{\min,(k)} \end{cases} \quad (22)$$

对于粒子 i 控制变量的修正,本文根据 $M_{i,j,t}^{(k)}$ 与 $\Delta E_{i,j,t}^{(k)}$ 的大小关系,分以下两种情况进行讨论。

1) 情况 1: $M_{i,j,t}^{(k)} \geq \Delta E_{i,j,t}^{(k)}$

该情况下,粒子 i 的各维度变量在各自“飞行区间”内进行修正即可消除 SOC 约束违反的情况。 $H_{i,j,t-1}^{(k)}$ 与 $\Delta s_{i,j,t}^{(k)}$ 按照线性分配的原则减少一定的值,如下所示:

$$\Delta q_{i,t}^{(k)} = \Delta E_{i,j,t}^{(k)} \frac{\Delta q_{i,j,t}^{\max,(k)}}{M_{i,j,t}^{(k)}} \quad (23)$$

$$\Delta s_{i,j,t}^{(k)'} = \Delta s_{i,j,t}^{(k)} - \Delta q_{i,j,t}^{(k)} \quad (24)$$

$$\Delta H_{i,j,t-1}^{(k)} = \Delta E_{i,j,t}^{(k)} - \Delta q_{i,j,t}^{(k)} \quad (25)$$

式中: $\Delta q_{i,j,t}^{(k)}$ 为储能控制变量的修正大小; $\Delta s_{i,j,t}^{(k)'}$ 为修正后的粒子 i 第 j 台储能设备在 t 时段的控制变量值。当得到 $\Delta s_{i,j,t}^{(k)'}$ 和 $\Delta H_{i,j,t-1}^{(k)}$ 之后, $\Delta s_{i,j,t-1}^{(k)'}$ 与 $\Delta H_{i,j,t-2}^{(k)}$ 的值可以使用上述同样的方法得到。重复上述步骤(式(23)至式(25))直到 $\Delta s_{i,j,1}^{(k)'}$ 更新完毕。

2) 情况 2: $M_{i,j,t}^{(k)} < \Delta E_{i,j,t}^{(k)}$

在该情况下,粒子 i 的各个维度变量无法实现在各自“飞行区间”内调节消除 SOC 上边界越限的情况,为了解决该情况,各维度变量的调节范围必须扩展至上下边界。在上下边界范围之内, $H_{i,j,t}^{(k)}$ 最大减少量为 $M_{i,j,t}^{(k)'}$ 。

$$\begin{cases} M_{i,j,t}^{(k)'} = H_{i,j,t}^{(k)} - \underline{H}_{i,j} = \Delta \bar{H}_{i,j,t-1}^{(k)} + \Delta \bar{q}_{i,j,t}^{(k)} \\ \Delta \bar{H}_{i,j,t-1}^{(k)} = H_{i,j,t-1}^{(k)} - \underline{H}_{i,j} \\ \Delta \bar{q}_{i,j,t}^{(k)} = \Delta s_{i,j,t}^{(k)} - \underline{\Delta s}_{i,j} \end{cases} \quad (26)$$

同情况 1 所述, $\Delta s_{i,j,t}^{(k)}$ 和 $H_{i,j,t-1}^{(k)}$ 的削减量可由下述公式计算。

$$\Delta q_{i,t}^{(k)'} = \Delta E_{i,j,t}^{(k)} \frac{\Delta \bar{q}_{i,j,t}^{(k)}}{M_{i,j,t}^{(k)'}} \quad (27)$$

$$\Delta s_{i,j,t}^{(k)'} = \Delta s_{i,j,t}^{(k)} - \Delta q_{i,j,t}^{(k)'} \quad (28)$$

$$\Delta H_{i,j,t-1}^{(k)'} = \Delta E_{i,j,t}^{(k)} - \Delta q_{i,j,t}^{(k)'} \quad (29)$$

储能各维度变量的削减量 $\Delta q_{i,j,t-1}^{(k)'}$, $\Delta q_{i,j,t-2}^{(k)'}$, \dots , $\Delta q_{i,j,1}^{(k)'}$ 可以通过式(27)至式(29)不断迭代得到。

通过上述方法,储能单元 j 在 t 时刻的 SOC 越限情况得到了消除。检查 $t+1$ 时刻的储能约束,重复上述步骤,直到所有时刻的约束越限情况都处理完毕。

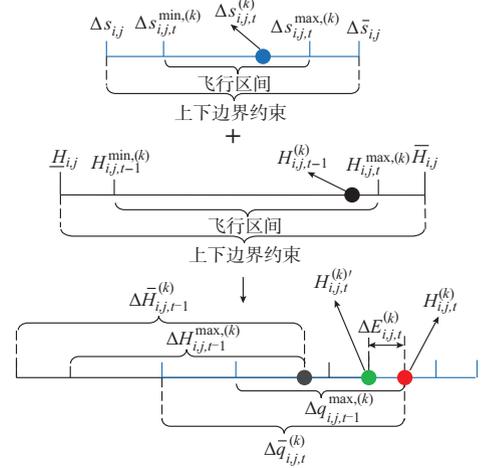


图 3 储能约束处理示意图

Fig.3 Diagram of handling technique for SOC constraint

2.3.2 其他设备约束处理

其余设备(调压器、可投切电容器组、可中断负荷)的约束处理方法和储能设备的处理方法类似,本文不再赘述。

2.3.3 潮流约束处理

不同于设备的控制变量约束,ADN 的潮流约束具有高维度、非线性的特点。因此,不能通过上述直接的处理方法消除潮流约束的违反情况。本文采用文献[24]提出的动态罚函数方法间接处理潮流约束。

2.4 元模型辅助改进 PSO 算法

本文提出一种带约束处理机制的元模型辅助混合粒子群优化方法用于求解建立的 ADN 最优经济运行问题。对于基本粒子群算法的改进,相关研究人员已经做了大量的工作,本文采用参考文献[22]提出的 MFPSO 用于自适应的调节 ω, c_1, c_2 参数的大小,提高 PSO 算法的求解性能。

其次,考虑到初始 Kriging 元模型预测精度不够的问题,本文提出了一种 Kriging 元模型的动态更新方法:在每次迭代过程中,利用当前 Kriging 元模型计算完目标函数值之后,在更新全局最优解之前,当前种群的最优粒子将会被潮流仿真软件精确计算;如果该粒子的预测相对误差超过了预设的阈值 $\epsilon_{\max}^{(k)}$,该粒子将会被选入 Kriging 模型的样本点集用于更新元模型。在优化过程中,本文提出的 Kriging 元模型动态更新机制方法的具体步骤如下。

步骤 1:利用当前 Kriging 元模型计算当前种群粒子的目标函数值。

步骤 2:选择当前种群中目标函数值最小的粒子 $\mathbf{x}_{\text{best}}^{(k)}$ 进行潮流仿真,获得的实际的目标函数值为 $f_{\text{best}}^{(k)}$ 。假设当前求解算法找到的全局最优解为

$f_{opt}^{(k)}$, 如果满足 $f_{best}^{(k)} < f_{opt}^{(k)}$ 并且 $x_{best}^{(k)}$ 满足所有的约束, 则进入步骤 3, 否则进入步骤 4。

步骤 3: 更新当前求解算法找到的最优解与最优位置: $x_{opt}^{(k)} \leftarrow x_{best}^{(k)}, f_{opt}^{(k)} \leftarrow f_{best}^{(k)}$ 。

步骤 4: 计算粒子 $x_{best}^{(k)}$ 的最大预测相对误差 ϵ ; 如果满足 $\epsilon \geq \epsilon_{max}^{(k)}$, 则将该点加入 Kriging 元模型采样点集; 计数器 $N_{new} = N_{new} + 1$ 。

步骤 5: 如果满足 $N_{new} = N_{new}^{max}$, 则利用当前最新的采样点集更新 Kriging 元模型, 并且重置计数器 $N_{new} = 0$ 。

由步骤 1 至步骤 5 可以看出, 在迭代寻优过程中, 元模型不断地进行更新, 从而避免了由于 Kriging 元模型预测误差过大导致的寻优结果错误

的问题。考虑到过于频繁地更新 Kriging 模型将降低求解速度的问题, 本文设定 $N_{new} = 5$ 。此外, 预测相对误差的阈值 $\epsilon_{max}^{(k)}$ 设为线性递减函数:

$$\epsilon_{max}^{(k)} = 0.001 + (0.005 - 0.001) \frac{i_{ter} - k}{i_{ter} - 1} \quad (30)$$

式中: i_{ter} 为最大的迭代次数。

综上所述, 根据本文提出的基于粒子群的约束处理技术、Kriging 元模型动态更新机制, 本文提出的 HA-KMFPSO 求解算法的总体流程见图 4。

由图 4 可以看出, 在 HA-KMFPSO 算法中, Kriging 元模型用于快速近似计算配电网的潮流, 加快了优化求解的速度; 违反约束的粒子位置进行了相应处理, 提高的优化算法的搜索效率。

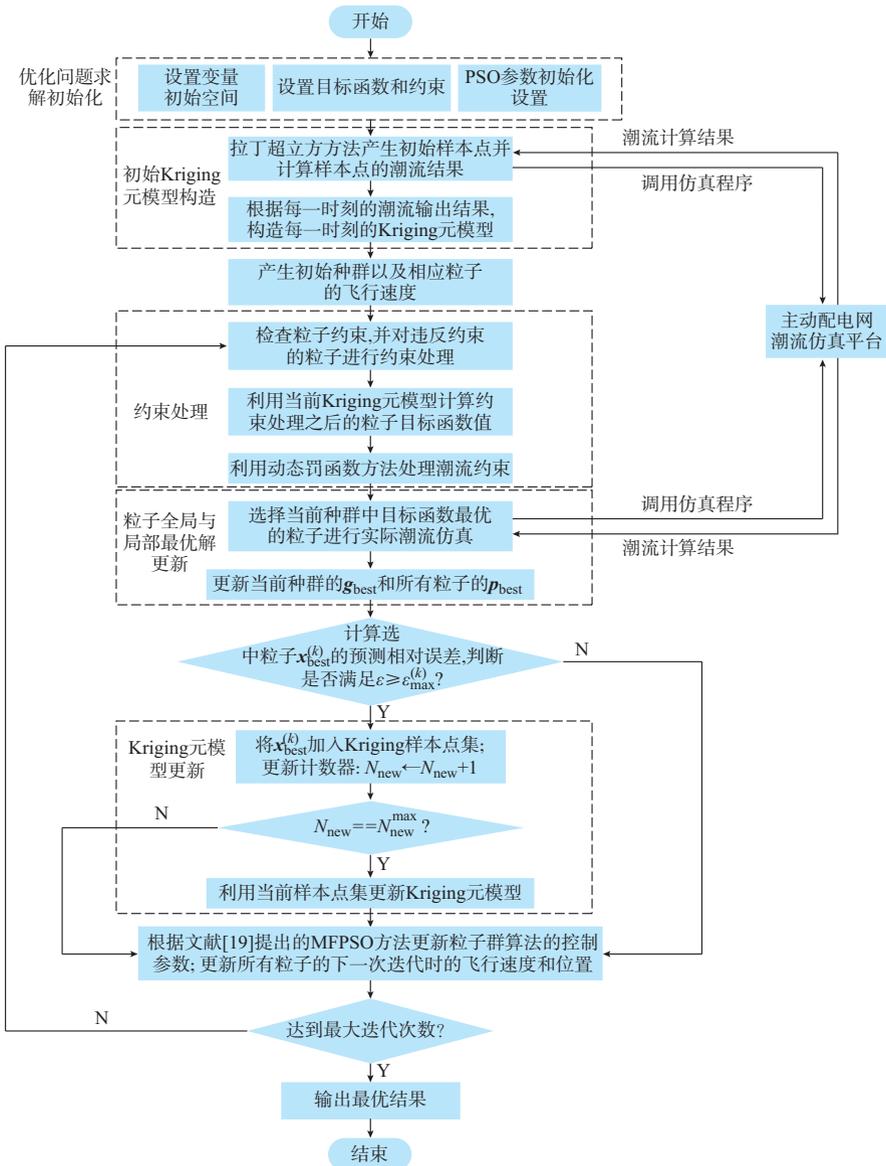


图 4 HA-KMFPSO 算法总体流程图
Fig.4 Flow chart of the proposed HA-KMFPSO

3 算例仿真

3.1 基本算例设置

为了验证本文建立的 ADN 最优经济运行模型及求解算法的有效性,本文利用新型配电系统仿真软件 GridLAB-D^[28],搭建 IEEE 37 节点算例系统^[29]对其进行验证。修改后的 IEEE 37 节点测试系统拓扑结构如附录 A 图 A1 所示。测试算例中,所有负荷使用 ZIP 模型,负荷的 ZIP 系数在附录 A 表 A1 中给出。假设所有节点电压都为额定值时,该系统的三相基准负荷曲线如附录 A 图 A2 所示;ADN 一天电价曲线如附录 A 图 A3 所示;调压器、可投切电容器组、分布式电源、储能设备、可中断负荷的参数分别见附录 A 表 A2 至附录 A 表 A6。

3.2 Kriging 元模型预测精度

由于每个调度时刻(1 h)配电网的状态都不尽相同且潮流计算独立,Kriging 元模型的构造时间随着输入输出变量维度的增加呈指数上升趋势,为了减少 Kriging 元模型的构造时间,本文为每一个调度区间分别构造一个 Kriging 元模型,可利用并行操作减少构造时间,输入即为某一调度区间的所有控制变量,输出即为相对应的节点电压、联络母线功率大小。根据每一调度区间的潮流计算结果,计算出当天的运行成本。

本文选取不同数量的样本点(N)构造 Kriging 元模型,再通过随机产生 500 个测试点(对应集合 N_{test})对 Kriging 模型的精度进行计算,计算指标如下。

1)最大相对误差(R_{MAE})为:

$$R_{\text{MAE}} = \max \left(\left| \frac{(f_i - \hat{f}_i)}{f_i} \right| \right) \quad i \in N_{\text{test}} \quad (31)$$

式中: f_i 为真实值,即节点电压或者联络线功率; \hat{f}_i 为 Kriging 模型对于节点电压或者联络线功率的近似计算值。

2)平均相对误差(R_{AAE})为:

$$R_{\text{AAE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(f_i - \hat{f}_i)}{f_i} \right| \quad i \in N_{\text{test}} \quad (32)$$

Kriging 元模型预测值精度的统计结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,Kriging 模型对于配电网的潮流计算具有较高的预测精度,并且精度随着样本点的增加而增加。此外,在 IEEE 37 测试算例中,Kriging 模型对于节点电压、联络线功率的预测相对误差低于 0.1%,因此 Kriging 模型可以在粒子群算法优化过程中用于近似计算潮流结果。

表 1 IEEE 37 节点系统 Kriging 模型精度测试统计结果
Table 1 Statistical results of accuracy of Kriging model for IEEE 37-bus system

N 的取值	指标	节点电压	联络线功率
50	R_{MAE}	6.5×10^{-4}	2.4×10^{-3}
	R_{AAE}	4.2×10^{-5}	0.8×10^{-3}
100	R_{MAE}	6.2×10^{-4}	2.1×10^{-3}
	R_{AAE}	3.9×10^{-5}	0.6×10^{-3}
200	R_{MAE}	5.2×10^{-4}	1.5×10^{-3}
	R_{AAE}	3.2×10^{-5}	0.4×10^{-3}

3.3 算法求解结果

在 HA-KMFPSO 中,最大迭代次数和种群规模分别设置为 500,500;原始的 Kriging 模型构造初始样本点的数量为 50。运用本文提出的 HA-KMFPSO 算法随机测试 50 次,求得的最优解为 2 341.2 美元。部分控制变量的优化结果如附录 B 图 B1 至附录 B 图 B3 所示。附录 B 图 B1 表示各个分布式电源的有功出力情况,可以发现,分布式电源的出力情况基本和电价的变化情况相一致,当电价较高时,所有分布式发电单元都倾向于发电,如图中 12:00—14:00,20:00—22:00 所示;反之,当电价较低时,发电成本较高的发电单元将会停止发电,如图中 01:00—07:00 时所示。附录 B 图 B2 表示储能单元的充放电情况,从图中可以看出,为了降低运行成本,储能单元选择在低电价时刻(01:00—05:00)进行充电,高电价的时刻(13:00—14:00,20:00—22:00)进行放电控制。附录 B 图 B3 表示可中断负荷 IL1,IL2,IL3 的中断情况,图中可以看出,考虑到中断负荷的补偿成本,可中断负荷一般在电价较高时段被调用,如图中的 13:00 和 20:00—22:00 时刻。

为了进一步验证 HA-KMFPSO 算法的有效性,本文将 HA-KMFPSO 与仅采用罚函数约束处理方法的 MFPSO^[22],PSO-LDIW^[18],ACO^[30],GA^[7]等智能算法进行了对比,不同算法的设置参数如附录 C 表 C1 所示。为了验证本所提求解算法的鲁棒性,每种求解算法从同一初始可行解运行 50 次,每种算法的统计结果如表 2 所示,最优解的收敛曲线如图 5 所示。

表 2 不同算法求解统计结果
Table 2 Statistical simulation results for different algorithms

求解算法	最优解/ 美元	最差解/ 美元	平均值/ 美元	仿真平台 调用次数	平均求解 时间/s
HA-KMFPSO	2 341.2	2 348.4	2 344.5	550	518.2
FMPSO	2 372.7	2 378.9	2 375.3	250 000	3 196.4
PSO-LDIW	2 374.2	2 385.3	2 379.2	250 000	3 256.3
ACO	2 379.4	2 397.2	2 388.8	250 000	3 619.2
GA	2 412.3	2 493.2	2 351.3	250 000	3 705.1

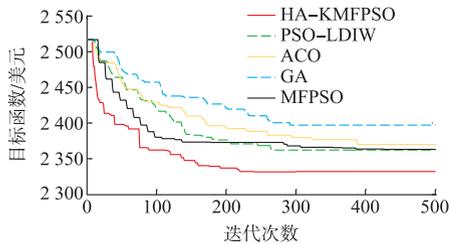


图5 最优值情况下不同算法收敛曲线
Fig.5 Convergence curves of different algorithms for the best values

从上述仿真结果可以看出,运用本文提出的HA-KMFPSO方法能够在保证求解精度的前提下,减少潮流仿真调用次数,加快了求解速度。此外,加入了约束处理机制的HA-KMFPSO方法,与本文对比的方法相比,具有更快的收敛速度。综上所述,HA-KMFPSO具有良好的求解精度和收敛速度,具有一定的工程实际意义。

4 结语

本文建立了ADN最优经济运行模型,该模型综合考虑了ADN中的可控资源:分布式发电单元、储能设备、调压器、可投切电容器组、可中断负荷。针对建立的最优数学模型,本文提出了考虑约束处理机制的Kriging元模型与粒子群算法的混合求解方法HA-MFPSO,有效提高了优化算法的求解效率。最后本文通过算例结果分析,验证了本文建立的模型和求解方法的有效性。但是,本文的优化结果是基于预测值100%准确的前提下得到的,在实际运行过程中,由于预测存在误差,必然会对优化结果产生不利影响。由于ADN中存在大量的分布式电源、电动汽车等具有一定随机性的资源,基于预测结果的优化值实际上并不能保证是最优的,甚至有可能是违反约束的解。因此,在未来的研究工作中,十分有必要将分布式发电、负荷侧等资源的不确定性考虑进来,将确定性优化扩展到随机优化。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 李惠玲,白晓民,谭闻,等.电动汽车与分布式发电入网的协调控制研究[J].电网技术,2013,37(8):2108-2115.
LI Huiling, BAI Xiaomin, TAN Wen, et al. Coordination control for grid-connection of plug-in hybrid electric vehicles and distributed generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2108-2115.
- [2] 邢海军,程浩忠,张沈习,等.主动配电网规划研究综述[J].电网技术,2015,39(10):2705-2711.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Shenxi, et al.

- Review of active distribution network planning [J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2705-2711.
- [3] 尤毅,刘东,于文鹏,等.主动配电网技术及其进展[J].电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [4] 赵波,王财胜,周金辉,等.主动配电网现状与未来发展[J].电力系统自动化,2014,38(18):125-135. DOI: 10.7500/AEPS20131218007.
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135. DOI: 10.7500/AEPS20131218007.
- [5] 张建华,曾博,张玉莹,等.主动配电网规划关键问题与研究展望[J].电工技术学报,2014,29(2):13-23.
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [6] ARGHANDEHA R, WOYAK J, ONEN A. Economic optimal operation of community energy storage systems in competitive energy markets[J]. Applied Energy, 2014, 135: 71-80.
- [7] NIKNAM T, RANJBAR A M, SHIRANI A R. Volt/var control in distribution networks with distributed generation[J]. Scientia Iranica, 2005, 36(20): 547-552.
- [8] HU Z, LI F. Cost-benefit analyses of active distribution network management: Part I annual benefit analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1067-1074.
- [9] MARVASTI A K, FU Y, DORMOHAMMAD S. Optimal operation of active distribution grids: a system of systems framework[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1228-1237.
- [10] GILL S, KOCKAR I, AULT G W. Dynamic optimal power flow for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 121-131.
- [11] HU Z, WANG X, CHEN H. Volt/VAR control in distribution systems using a time-interval based approach [J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2003, 150(5): 548-554.
- [12] 尤毅,刘东,钟清,等.主动配电网优化调度策略研究[J].电力系统自动化,2014,38(9):177-183. DOI: 10.7500/AEPS20130804001.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network [J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(9): 177-183. DOI: 10.7500/AEPS20130804001.
- [13] BARR J, MAJUMDER R. Integration of distributed generation in the Volt/VAR management system for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 576-586.
- [14] NIKNAM T. A new HBMO algorithm for multiobjective daily Volt/Var control in distribution systems considering distributed generators [J]. Applied Energy, 2011, 88(3): 778-788.
- [15] FEINBERG E, HU J, YUAN E. A stochastic search algorithm for voltage and reactive power control with switching costs and ZIP load model [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 133: 328-337.

- [16] LUO Y, YUAN X, LIU Y. An improved PSO algorithm for solving non-convex NLP/MINLP problems with equality constraints[J]. Computers & Chemical Engineering, 2007, 31(3): 153-162.
- [17] KAUR S, KUMBHAR G, SHARMA J. A MINLP technique for optimal placement of multiple DG units in distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63(12): 609-617.
- [18] ARASOMWAN M, ADEWUMI A. On the performance of linear decreasing inertia weight particle swarm optimization for global optimization[J/OL]. The Scientific World Journal[2017-04-20]. <http://dx.doi.org/10.1155/20131860289>.
- [19] YOSHIDA H, KAWATA K, FUKUYAMA Y. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1232-1239.
- [20] NICKABADI A, EBADZADEH M M, SAFABAKHSH R. A novel particle swarm optimization algorithm with adaptive inertia weight[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(4): 3658-3670.
- [21] JUANG Y T, TUNG S L, CHIU H C. Adaptive fuzzy particle swarm optimization for global optimization of multimodal functions [J]. Information Sciences, 2011, 181(20): 4539-4549.
- [22] NIKNAM T. A new fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimization algorithm for non-linear, non-smooth and non-convex economic dispatch problem[J]. Applied Energy, 2010, 87(1): 327-339.
- [23] MANBACHI M, FARHANGI H, PALIZBAN A, et al. Smart grid adaptive energy conservation and optimization engine utilizing particle swarm optimization and fuzzification [J]. Applied Energy, 2016, 174: 69-79.
- [24] MEZURA M E, COELLO C A C. Constraint-handling in nature-inspired numerical optimization: past, present and future[J]. Swarm & Evolutionary Computation, 2011, 1(4): 173-194.
- [25] QUEIPO N V, HAFTKA R T, WEI S, et al. Surrogate-based analysis and optimization[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(1): 1-28.
- [26] WANG G G, SHAN S. Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization [J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 129(4): 370-380.
- [27] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3197-3225.
- HAN Zhonghua. Kriging surrogate model and its application to design optimization: a review of recent progress [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3197-3225.
- [28] CHASSIN D P, SCHNEIDER K, GERKENSMEYER C. Grid LAB-D: an open-source power systems modeling and simulation environment [C]// IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 21-24, 2008, Chicago, USA: 1-5.
- [29] IEEE Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE radial test feeders[EB/OL]. [2004-11-05]. <http://www.Ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>.
- [30] NIKNAM T. A new approach based on ant colony optimization for daily Volt/Var control in distribution networks considering distributed generator [J]. Energy Conversion & Management, 2008, 49(12): 3417-3424.

唐 佳(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向:主动配电网、电动汽车 V2G 控制和智能优化计算。E-mail: tangjia1992@126.com

王 丹(1981—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:综合能源系统分析,智能配电系统分析、需求侧响应。E-mail: wangdantjuee@tju.edu.cn

贾宏杰(1973—),男,博士,教授,主要研究方向:大电网稳定性分析、综合能源系统、电网规划、新能源集成。E-mail: hjjia@tju.edu.cn

(编辑 孔丽蓓 鲁尔姣)

Optimal Economic Operation of Active Distribution Networks Based on Hybrid Algorithm of Surrogate Model and Particle Swarm Optimization

TANG Jia¹, WANG Dan¹, JIA Hongjie¹, ZHANG Yi², XIONG Jun³, HUANG Renle⁴

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Corporation, Fuzhou 350007, China;

3. State Grid Xiamen Power Supply Company, Xiamen 361004, China;

4. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: Optimal operation of active distribution network is the key technology for its economic and reliable operation. The optimal economic operation model of active distribution network is established for dispatch in order to minimize overall operation cost during the schedule period. Firstly, a variety of adjustable resources in the active distribution network are generally considered in the established model, such as distributed generators, energy storage devices, voltage regulators, switchable capacitor bank and interruptible loads. Then, a hybrid solving algorithm is proposed according to the established model based on Kriging surrogate model and a modified fuzzy particle swarm optimization algorithm, which realizes the solution to the complex problems mentioned above. Finally, the simulation results demonstrate the validity of the established optimal economic operation model and solving algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407125), State Grid Corporation of China and "131" Talent & Innovative Team of Tianjin City.

Key words: active distribution network; economic operation; Kriging surrogate model; particle swarm optimization