

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190786

考虑分布式电源和电动汽车不确定性的双层动态配网重构

谢琳宇, 唐忠, 黄星宇, 薛佳诚, 盛锐

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 分布式电源(Distributed Generation, DG)和电动汽车(Electric Vehicle, EV)的广泛应用对主动配电网的优化运行提出了更高的要求, 配电网重构是其关键技术之一。考虑 DG、EV 和其他负荷的不确定性, 通过拉丁超立方采样(Latin Hypercube Sampling, LHS)产生随机变量并考虑其相关性。然后分别以最小化综合运行成本和系统节点电压差为目标函数, 建立双层优化模型。最后采用基于化整为零策略的改进和声搜索算法(Improved Harmony Search Algorithm, IHSA)进行分时段配网动态重构。通过 IEEE33 节点系统的仿真, 验证了上述方法在提高可再生能源利用率的同时, 可以有效提高配电网运行的经济性和可靠性。

关键词: 分布式电源; 电动汽车; 拉丁超立方采样; 双层优化模型; 配网动态重构

Bi-layer dynamic reconfiguration of a distribution network considering the uncertainty of distributed generation and electric vehicles

XIE Linyu, TANG Zhong, HUANG Xingyu, XUE Jiacheng, SHENG Rui

(College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The widespread application of Distributed Generation (DG) and Electric Vehicles (EVs) puts higher requirements on the optimal operation of an active distribution network, and distribution network reconfiguration is one of the key technologies to cope with this. Considering the uncertainties of DG, EV and other loads, the correlation of random variables generated by Latin Hypercube Sampling (LHS) is considered. Then, a bi-layer optimization model is established by minimizing the integrated operation cost and the system nodes' voltage difference. Finally, the Improved Harmony Search Algorithm (IHSA) based on the strategy of breaking up the whole into parts is used in dynamic reconfiguration of distribution network in different time intervals. Through the simulation of an IEEE33 node system, this paper proves that the above method can effectively improve the economics and reliability of distribution network operation while enhancing the utilization rate of renewable energy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61672337).

Key words: distributed generation; electric vehicle; Latin hypercube sampling; bi-layer optimization model; dynamic reconfiguration of distribution network

0 引言

近年来, 随着世界经济的发展, 环境污染和化石能源枯竭等问题日益严重, 风光等清洁能源的开发利用已成为共识, DG 和 EV 由此得到了越来越广泛的应用。由于二者的并网将在很大程度上影响网络的潮流和可靠性, 因此, 考虑其不确定性对系统优化具有十分重要的意义。

配网优化的重要技术手段之一是重构^[1], 即通过开合线路中的联络开关和分段开关来改变网络拓

扑结构, 从而在满足系统各安全稳定约束条件的前提下, 改善网络潮流分布, 使系统实现降低网损、改善电压水平、平衡负载、提高供电可靠性等目标, 促成配电网的高质量运行。文献[2-4]采用蒙特卡洛抽样方法得到系统所需的随机变量, 该方法虽然简单易行, 但在大规模 DG 接入系统的情况下, 会出现样本容量过大、效率过低等问题。从 DG 和负荷的时序性角度考虑, 配网重构分为静态重构和动态重构。静态重构在国内外已有大量深入的研究, 现有方法主要是基于单个时段内的负荷数据, 如文献[5]以最小化有功损耗为目标在优化周期内进行单目标静态重构。但系统中各节点的负荷以及 DG

出力时刻变化, 需要随时对不同时刻的拓扑结构进行优化, 因此静态重构往往不能满足实际需求。而动态重构则是考虑优化周期内 DG 和负荷随时间变化的情况, 同时计及开关动作约束、供电可靠性等现实条件进行全局性优化, 因此动态重构可以更好地确保系统的经济优质运行。求解配网重构通常采用数学优化方法和智能算法。传统的数学方法虽然能得到全局最优解, 但在处理系统潮流约束时, 求解难度相对较大, 难以有效地解决 NP-hard 问题。人工智能优化算法则以遗传算法^[6](Genetic Algorithm, GA)、粒子群算法^[7](Particle Swarm Optimization, PSO)等为代表, 但上述方法依然没有很好地解决算法寻优时间长、效率低等问题。

综上, 为了考虑 DG 不确定性和负荷波动性对配网重构的影响, 本文假设风速和光照强度、负荷以及 EV 充电参数分别服从某些特定分布, 采用 LHS 技术生成随机变量, 并利用 Cholesky 分解排序法处理风、光以及负荷之间的相关性; 通过构建双层模型将兼顾经济性和可靠性的问题分层简化求解, 上层目标函数为系统综合成本最小并考虑潮流等约束条件; 下层在满足 DG 出力上下限、节点电压等约束的同时, 最小化系统节点电压差; 为了更符合实际工程应用, 本文采用动态重构, 通过引入指标 E 并定义其为网损下降量来评价系统在某一时段的运行状态, 进而利用改进的半梯形隶属度函数法划分重构时段。最后通过化整为零策略将开关编码处理, 结合 IHSA 对上述模型进行求解, 从而达到避免不可行解和提高寻优效率的目的。

1 不确定性建模和抽样

本部分主要是对不确定性参量进行建模, 基本模型包括风力发电模型、光伏发电模型、EV 充电功率模型以及负荷随机模型。针对上述模型, 本文利用 LHS 技术对不确定性随机变量进行抽样。

1.1 风力发电随机模型

目前, 较为常用的风速模型是双参数 Weibull 分布模型^[8], 该模型可以很好地描述风速的概率分布, 其概率密度函数可以表示为

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

式中: v 为风速; k 和 c 分别为 Weibull 分布的形状参数和尺度参数, 可以根据历史风速数据计算获得。

再由式(2)可得到风机的输出功率^[6]为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{ci}, v > v_{co} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{WT} 为风机的输出功率; v_{ci} 、 v_{co} 和 v_r 分别为风机的启动风速、切出风速和额定风速; P_r 为风机的额定容量。

1.2 光伏发电随机模型

光伏发电的输出功率受太阳的光照强度影响最大, Beta 分布^[6]是应用最广泛的描述光照强度的概率模型, 可以表示为

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{max}}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式中: $\Gamma(\bullet)$ 表示 Gamma 函数; r 和 r_{max} 分别是实际光照强度和最大光照强度; α 和 β 为 Beta 分布的形状参数, 同样可以利用历史数据计算得到。

光伏出力表达式为^[6]

$$P_{PV} = r \times \sum_{k=1}^K A_k \eta_k \quad (4)$$

式中: P_{PV} 为光伏出力; K 为光伏电池板的数量; A_k 和 η_k 分别为第 k 个太阳能电池板的面积和光电转换效率。

本文假设在配电网中, 功率因数达式 $\cos \varphi$ 恒定, 则风、光发电的无功出力可以表示为

$$Q = \frac{P}{\tan \varphi} \quad (5)$$

式中, $\varphi = \arcsin(0.9)$ ^[9]。

1.3 电动汽车随机模型

在本文中, 假设仅考虑 EV 的负荷特性, 其日行驶里程满足对数正态分布^[10], 概率密度函数为

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi d \sigma_d}} \exp\left[-\frac{(\ln d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (6)$$

式中: d 表示电动汽车的日行驶里程; μ_d 和 σ_d 分别为日行驶里程的期望值与标准差。

开始充电时刻用正态分布^[10]描述, 概率密度函数为

$$f(S) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s}} \exp\left[-\frac{(S - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & \mu_s - 12 < S \leq 24 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s}} \exp\left[-\frac{(S + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & 0 < S \leq \mu_s - 12 \end{cases} \quad (7)$$

式中: S 表示电动汽车的开始充电时刻; μ_s 和 σ_s 分别为开始充电时刻的期望值与标准差。

EV 的充电时长为

$$T_{cd} = \frac{d \times H}{100 \times P_d \times \eta} \quad (8)$$

式中: T_{cd} 表示电动汽车的充电时长; H 为每百公里的耗电量; P_d 为 EV 充电功率; η 为充电效率。

1.4 负荷随机模型

负荷具有时序性, 其有功功率和无功功率分别服从正态分布^[11], 概率密度函数分别为

$$f(P_{load}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(P_{load} - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right] \quad (9)$$

$$f(Q_{load}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Q} \exp\left[-\frac{(Q_{load} - \mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}\right] \quad (10)$$

式中: P_{load} 和 Q_{load} 分别表示有功负荷与无功负荷; μ_p 和 σ_p 分别为有功负荷的期望值与标准差; μ_Q 和 σ_Q 分别为无功负荷的期望值与标准差。

1.5 拉丁超立方采样

LHS 是一种多维分层采样技术, 能在较小的采样规模中保证采样点能够覆盖所有采样区域, 与蒙特卡洛抽样方法相比, 这种采样方法提高了采样效率, 改善了计算精度, 降低了迭代次数, 并具有良好的鲁棒性^[11]。LHS 主要包括采样和排序^[12]两个部分。

1) 采样

假设要抽取 M 种随机变量, 样本容量是 N , X_m ($m=1,2,\dots,M$) 表示任意一个变量, $Y_m = F_m(X_m)$ 为累积概率分布函数, 如图 1 所示。

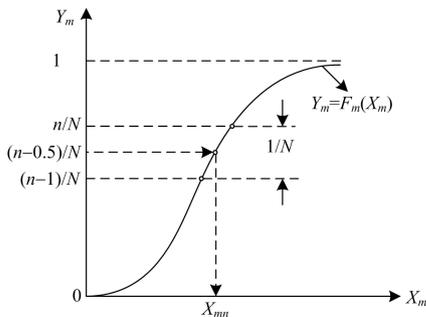


图 1 LHS 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of LHS

如图 1 所示, 将区间 $[0,1]$ 等分成 N 个小区间, 在每个小范围内选取随机值 Y_m (通常选择区间中点值), 则通过计算反函数可以得到其对应的采样值,

如图中的 $X_{mn} = F_m^{-1}\left(\frac{n-0.5}{N}\right)$, $m=1,2,\dots,M$; $n=1,2,\dots,N$ 。通过对 M 种随机变量抽样可以得到一个 $M \times N$ 阶样本矩阵 A_0 。

$$A_0 = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1N} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{M1} & X_{M2} & \cdots & X_{MN} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2) 排序

当系统中含有多个随机变量时, 若采用蒙特卡洛方法进行抽样, 相关计算的精确度不仅由样本值决定, 还与每种随机变量间的相关性有关^[13], 且精度与相关性呈现负相关。因此, 需要对 A_0 进行排序以减少各随机变量之间存在的相关性并提高抽样的精确度, 本文采用 Cholesky 分解排序法^[14]来实现。定义 ρ_0 是 M 个随机变量间的相关系数阵, 则按以下步骤进行排序。

① 生成一个每行元素由 $1,2,\dots,N$ 任意排列组成的 $M \times N$ 阶矩阵 L , 计算其相关系数阵 ρ_L 。显然 ρ_L 为正定对称阵, 利用 Cholesky 法可将其分解:

$$\rho_L = QQ^T \quad (12)$$

其中, Q 为下三角矩阵。

② 消除 L 的相关性:

$$G = Q^{-1}L \quad (13)$$

此处, G 的相关系数矩阵为单位阵。

③ 分解 ρ_0 :

$$\rho_0 = PP^T \quad (14)$$

其中, P 为下三角矩阵。

④ 通过下式使 G_u 的相关系数矩阵与 ρ_0 近似相等:

$$G_u = PG = PQ^{-1}L \quad (15)$$

⑤ 更新 A_0 : 根据 G_u 中每行元素的大小顺序对 A_0 中相应行元素重新排列, 直到更新后 A_0 的相关系数矩阵 ρ_0 满足特定要求。

由上述步骤, 根据风、光伏发电和负荷的概率密度函数, 利用 LHS 可以得到计及各 DG 之间相关性和负荷随机波动性的采样矩阵:

$$A_0 = [v_i, r_j, L^p, L^Q]^T \quad (16)$$

其中

$$\begin{cases} v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{i1}, \dots, v_{iN}] \\ r_j = [r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{j1}, \dots, r_{jN}] \\ L^p = [L_1^p, L_2^p, \dots, L_1^p, \dots, L_N^p] \\ L^Q = [L_1^Q, L_2^Q, \dots, L_1^Q, \dots, L_N^Q] \end{cases} \quad (17)$$

式中: $i=1,2,\dots,m_{WT}$, $j=1,2,\dots,m_{PV}$, m_{WT} 和 m_{PV} 分别为风机、光伏发电系统的并网接入点数量; v_{ij} 、 r_{ij} 、 L_{ij}^P 和 L_{ij}^Q 分别为风速、光照强度、有功负荷以及无功负荷的第 i 次抽样数据。

得到采样矩阵后, 利用风速和光照强度分别计算出风机出力和光伏出力, 再根据系统参数对配电网进行前推回代潮流计算, 进一步得到配电网在该运行工况下的潮流分布, 这样就能够优化过程中充分考虑各 DG 和负荷的相关性, 使结果更加精确。

2 配网重构的数学模型

由于 DG 和 EV 的接入, 其不确定性使配电网的潮流和可靠运行受到较大影响, 因而本文需要在保证系统安全稳定运行的前提下降低配电网综合运行成本。

以一个典型日作为优化周期, 将其分成 24 个时段, 每个时间段为 1 h, 提出一个双层分时段动态重构模型。上层作为优化主体将优化目标确定为综合运行成本最小, 决策变量是开关动作情况; 下层在上层拓扑结构确定的情况下, 合理分配各 DG 的出力, 实现系统节点电压差最小化, 再将量化后的 DG 出力返回给上层, 作为拓扑结构优化计算的一部分, 上下迭代。具体模型关系如图 2 所示。

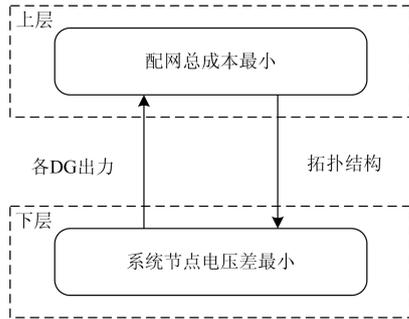


图 2 双层优化模型关系图

Fig. 2 Relationship diagram of bi-layer optimization model

2.1 上层优化模型

2.1.1 目标函数

配网的综合运行成本考虑了网络损耗的成本、开关动作成本以及从 DG 处购电成本。数学模型为

$$\min F = C_{\text{loss}} + C_{\text{sw}} + C_{\text{DG}} \quad (18)$$

各类成本如下。

1) 网损成本 C_{loss}

$$C_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T c_t \left(\sum_{j=1}^b y_j R_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_{ij}^2} \right) \quad (19)$$

式中: T 是时段数; b 表示系统支路数; c_t 代表单位电量的网损成本, 取为 0.65 元/(kW·h); y_j 为支路 j 上的开关状态, 断开为 0, 闭合为 1; R_j 为第 j 条支路电阻; P_{ij} 、 Q_{ij} 和 U_{ij} 分别是 t 时段支路 j 始端的有功功率、无功功率以及节点电压。

2) 开关动作成本 C_{sw}

$$C_{\text{sw}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{m_s} d_j a_{ij} \quad (20)$$

其中: m_s 为开关总数; 与支路数 b 相等; d_j 表示第 j 个开关的状态改变一次的成本, 本文假设为 5 元/次^[4]; a_{ij} 为第 t 个时段第 j 个开关的状态改变情况, 与上个时段相比, 开关状态发生改变为 1, 不改变则为 0。

3) 从 DG 购电成本 C_{DG}

$$C_{\text{DG}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{DG}} \left(\sum_{j=1}^{m_{WT}} P_{j,\text{WT}} + \sum_{j=1}^{m_{PV}} P_{j,\text{PV}} \right) \quad (21)$$

式中: c_{DG} 为单位功率的购电费用, 根据文献[15], 取为 0.41 元/(kW·h); $P_{j,\text{WT}}$ 和 $P_{j,\text{PV}}$ 分别为 t 时段第 j 个风机和光伏的有功出力。

2.1.2 约束条件

1) 潮流约束^[14]

$$P_{Gi,t} + P_{DGi,t} - P_{Li,t} - P_{EVi,t} = V_{i,t} \sum_{j \in \Omega_i} V_{j,t} (G_{ij,t} \cos \delta_{ij,t} + B_{ij,t} \sin \delta_{ij,t}) \quad (22)$$

$$Q_{Gi,t} + Q_{DGi,t} - Q_{Li,t} - Q_{EVi,t} = V_{i,t} \sum_{j \in \Omega_i} V_{j,t} (G_{ij,t} \sin \delta_{ij,t} - B_{ij,t} \cos \delta_{ij,t}) \quad (23)$$

式中: $P_{Gi,t}$ 、 $P_{DGi,t}$ 、 $P_{Li,t}$ 和 $P_{EVi,t}$ 分别为 t 时段在第 i 个节点处电源和 DG 流入以及负荷和 EV 消耗的有功功率; $Q_{Gi,t}$ 、 $Q_{DGi,t}$ 、 $Q_{Li,t}$ 和 $Q_{EVi,t}$ 分别为相应的无功功率; $V_{i,t}$ 和 $V_{j,t}$ 分别为 t 时段节点 i 和 j 的电压幅值; Ω_i 代表与节点 i 相关联的节点集合; $G_{ij,t}$ 和 $B_{ij,t}$ 为 t 时段网络的电导和电纳; $\delta_{ij,t}$ 代表 t 时段节点 i 和 j 的相角差。

2) 开关动作次数

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{m_s} |a_j - a_{j0}| \leq n_{\text{smax}} \\ n_j \leq n_{\text{jmax}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: a_j 和 a_{j0} 分别为第 j 个开关重构前后的开合情况, 断开为 0, 闭合为 1; n_{smax} 为系统允许的开关动作最大次数; n_j 和 n_{jmax} 分别为第 j 个开关的动

作次数和动作次数上限。

3) 网络呈辐射状, 无孤岛。

2.2 下层优化模型

2.2.1 目标函数

下层模型将最小化系统节点电压差作为目标函数, 本文将系统节点电压差定义为所有时段中最大的节点电压差。模型的数学表达式为

$$\min \Delta U = U_{\max} - U_{\min} \quad (25)$$

式中: ΔU 为所有时段中最大的节点电压差; U_{\max} 和 U_{\min} 分别为该时段中整个网络的最大节点电压值和最小节点电压值。

2.2.2 约束条件

1) 节点电压约束

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (26)$$

式中: U_i 为节点 i 的电压幅值; U_{\max} 和 U_{\min} 分别为节点 i 电压幅值的上下限。

2) DG 出力约束

$$P_{DG\min} \leq P_{DGi} \leq P_{DG\max} \quad (27)$$

$$Q_{DG\min} \leq Q_{DGi} \leq Q_{DG\max} \quad (28)$$

式中: P_{DGi} 和 Q_{DGi} 分别为第 i 个 DG 的有功出力和无功出力; $P_{DG\max}$ 、 $P_{DG\min}$ 和 $Q_{DG\max}$ 、 $Q_{DG\min}$ 分别为第 i 个 DG 的有功出力和无功出力上下限。

2.3 时段划分

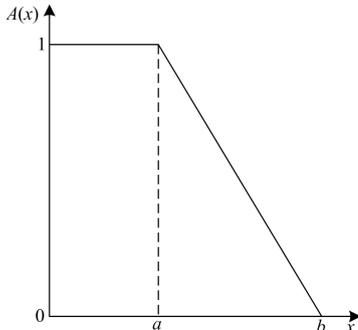
实际配电系统中, 由于 DG 出力、EV 充电功率以及其他负荷是随时间变化的, 尤其是我国负荷的峰谷差较大, 静态重构显然无法满足实际需求。因此本文对配电网进行动态重构, 采用半梯形隶属度函数法, 通过对每个时段的指标 E 及其变化率的计算来进行时段的动态划分。

本文定义系统综合运行指标 E 为系统的降损量大小, 即

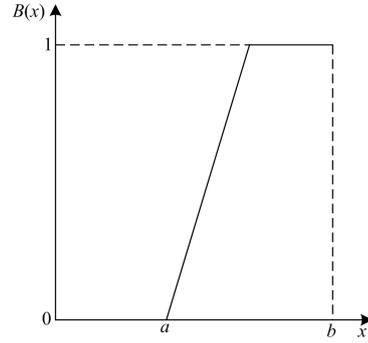
$$E = P_{\text{loss},t0} - P_{\text{loss},t1} \quad (29)$$

式中, $P_{\text{loss},t0}$ 和 $P_{\text{loss},t1}$ 分别为重构前后 t 时段的网损。

常见的隶属函数有两种: 偏小型和偏大型^[16], 如图 3 所示。前者适用于指标越大, 目标函数满意度越低的情况, 后者则相反^[17]。



(a) 偏小型隶属度函数



(b) 偏大型隶属度函数

图 3 常见的隶属度函数

Fig. 3 Common membership functions

由图 3 可得隶属度分别为

$$A(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (30)$$

$$B(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & x > b \end{cases} \quad (31)$$

式中, a 点和 b 点分别表示曲线中的最低谷值点和最高峰值点。

在本文中, 指标 E 越大, 表示降损量越大, 目标满意度越高, 因此采用偏大型隶属度函数计算。假设本文仅计及线性部分, 指标 E 的最大值和最小值分别为 e_{\max} 和 e_{\min} , 其余值为 e_x , 可利用下式计算得到隶属度, 即

$$B(x) = \frac{e_x - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (32)$$

当 $B(x) > 0.5$ 时, 表示该点处于峰段; 当 $B(x) < 0.5$ 时, 表示该点处于谷段。显然, 使用上述公式来划分峰谷段时, 若某个点的隶属度为 0.5 左右(本文指 0.45~0.55), 不能准确地判定其峰谷属性。同时, 若综合指标曲线上的连续点具有相同峰谷特性, 则配电网运行特性基本保持不变, 指标的变化率也较小。因此, 可以利用指标变化率来进一步划分时段。指标变化率 λ 的公式为

$$\lambda = \frac{E(t+1) - E(t)}{E(t+1)} \times 100\% \quad (33)$$

式中, $E(t)$ 和 $E(t+1)$ 分别为 t 时段和 $t+1$ 时段的指标数值。当 $|\lambda|$ 较小时(本文设为 $|\lambda| \leq 50\%$ ^[16]), 表示连续点的峰谷属性一致, 因此, 将 $t+1$ 时段与 t 时段合并; 反之, 则峰谷属性不一致, 不进行时段合并。

3 算法

3.1 编码

鉴于本文采用动态重构方式，必须考虑各时段中开关的动作情况以及周期内整体的组合情况，因此编码较为复杂。如果采用常规的二进制编码方式，即：“0”和“1”分别代表开关状态为断开和闭合，若系统中开关总数为 m_s ， T 是重构时段数，则二进制编码需要 $m_s T$ 位，这会导致变量维数过高，搜索空间剧增，系统寻优效率也大为降低。因此，本文采用文献[18]中的化整为零策略进行开关编码，这不仅大大缩短了编码长度，而且有效地避免了不可行解的产生。

此外，为了使系统重构后拓扑结构呈现辐射状无孤岛，每个环路中应该断开且仅断开 1 个开关，同时同一个开关不能被多次重复断开，并且不在任何环路内的开关不再考虑其编码情况^[19]。

3.2 改进和声搜索算法

和声搜索算法^[20](Harmony Search Algorithm, HSA)作为一种新型智能算法在 2001 年问世。该算法受启发于音乐家不断调节每种乐器的发音以形成一个美妙和声的过程。最终的和声类比于算法最优解，每个乐器的发音相当于变量取值，调音过程即为迭代过程。该算法易于实现，其中仅有 5 个可调参数，分别为：和声库大小(HMS)、和声库搜索概率(HMCR)、微调概率(PAR)、微调带宽(BW)和创作次数(Itr)。

算法的寻优步骤如下：

- 1) 初始化待优化的问题和算法的参数。
- 2) 从解空间中随机生成 HMS 个初始解存入和声库 HM ，并计算每个初始解的目标函数值。
- 3) 产生新和声。随机产生一个数 $rand1 \in [0,1]$ ，当 $rand1 < HMCR$ 时，新解从 HM 内产生，否则从 HM 外的解空间中产生。若新和声是从 HM 中得到的，则需要进行微调：随机产生一个数 $rand2 \in [0,1]$ ，若 $rand2 < PAR$ ，则根据 BW 进行微调，否则不做任何调整。
- 4) 更新 HM 。求解新和声的适应度值，若优于 HM 中最差解的适应度值，则用新和声代替最差解。
- 5) 检查是否满足迭代终止条件。若不满足，则重复步骤 3)和 4)；否则结束计算。

大多数研究将上述 5 个参数值设置为恒定，这限制了算法的全局寻优能力和优化速度。为此，本文采用参数改进的和声搜索算法^[21]，通过对参数 $HMCR$ 和 PAR 的修改以提升算法寻优效率，改进如下：

$$HMCR(Itr) = HMCR^U - \frac{Itr(HMCR^U - HMCR^L)}{Itr_{max}} \quad (34)$$

$$PAR(Itr) = PAR^L + \frac{Itr(PAR^U - PAR^L)}{Itr_{max}} \quad (35)$$

式中： $HMCR^U$ 和 $HMCR^L$ 分别为 $HMCR$ 的上下限，同样， PAR^U 和 PAR^L 分别为 PAR 的上下限； Itr 和 Itr_{max} 分别为当前的迭代次数和最大迭代次数。

具体计算的流程图如图 4 所示。

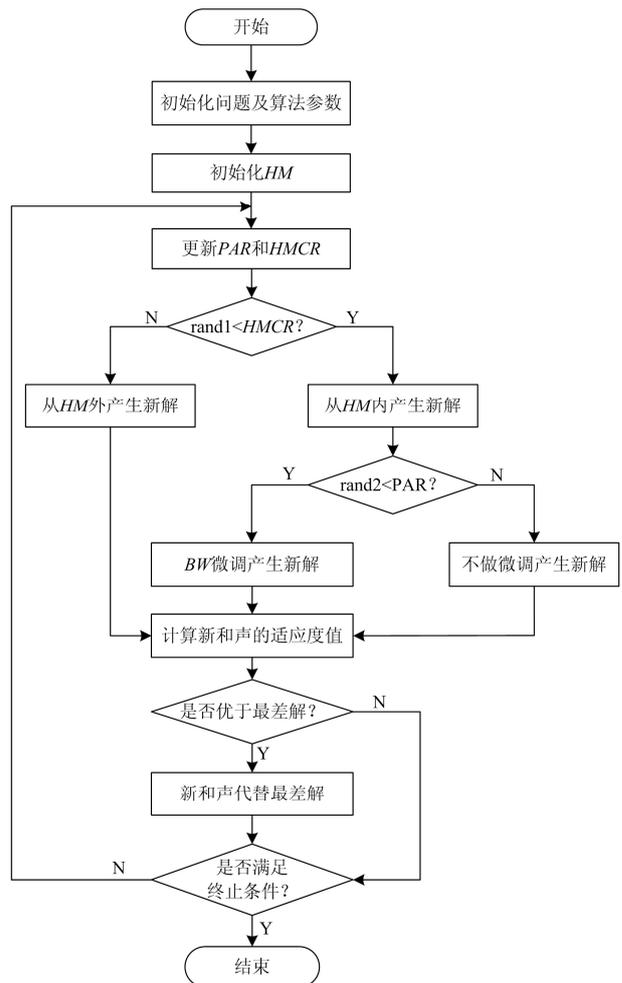


图 4 IHSA 流程图

Fig. 4 Flow chart of IHSA

4 算例分析

4.1 算例参数设置

为了验证本文提出的重构模型和方法的有效性，采用 IEEE33 节点系统作为验证对象，分别在节点 6、28 处加入风机 WT1、WT2，在节点 17、21 处加入光伏阵列 PV1、PV2，在节点 8、22 处各加入 1 组 EV 群。系统结构如图 5 所示。

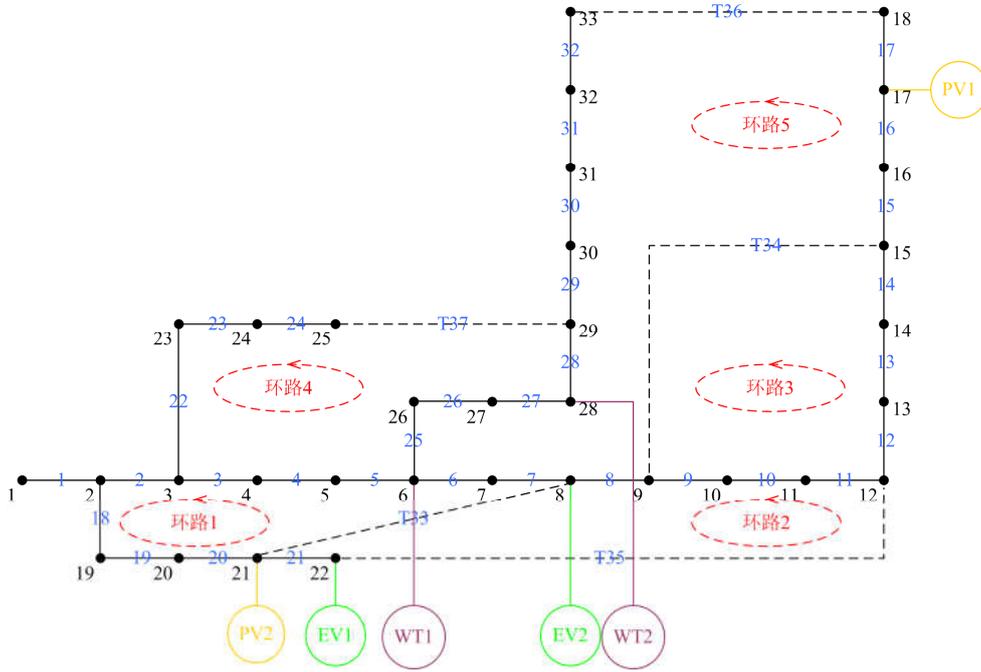


图 5 含 DG 和 EV 的 IEEE 33 节点系统结构

Fig. 5 Structure of IEEE 33-node system with DG and EV

IEEE 33 节点系统的基准电压为 12.66 kV，基准功率为 10 MVA，总负荷为 3.715+j2.3 MVA。参数详见文献[22]。DG、负荷和 EV 的数据如下：

风力发电： $k=1.75$ ， $c=5.92$ ， $v_{ci}=4$ m/s， $v_r=14$ m/s， $v_{\infty}=24$ m/s， $P_r=1$ MW。

光伏发电：由 50 个光伏阵列组成，每个阵列有 100 个组件，单个面积 $A_k=2.16$ m²，光电转换效率 $\eta_k=13.44\%$ ， $\alpha=0.49$ ， $\beta=5.13$ 。

负荷：以给定的负荷功率为期望值，标准偏差为期望值的 5%。

EV：每个 EV 群共 100 辆电动汽车， $\mu_d=3.2$ ， $\sigma_d=0.88$ ， $\mu_s=17.6$ ， $\sigma_s=3.4$ ， $H=15$ (kW·h/100 km)， P_d 假设为恒定值 3.6 kW， $\eta=0.9$ 。

假设开关动作的时刻为时段的开始时刻，每个开关的最大动作次数为 3 次，开关总动作次数低于 15 次^[10]，一个周期内系统最大重构次数为 3 次。算法的参数为： $HMS=100$ 、 $HMCR^U=0.95$ 、 $HMCR_L=0.65$ 、 $PAR^U=0.55$ 、 $PAR_L=0.25$ 、 $BW=1$ 、 $Itr_{max}=50$ 。

4.2 算例仿真结果

通过 LHS 和相关计算，得到的 DG 初始出力数据如图 6 所示。

利用 Matlab 对算例进行仿真所得结果如表 1、表 2 所示。

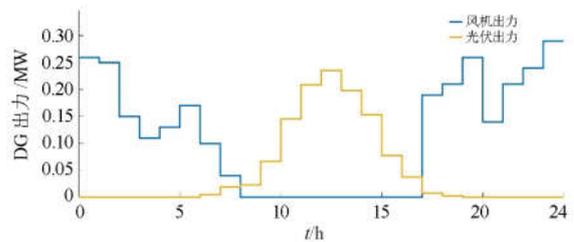


图 6 各时段内 DG 初始出力

Fig. 6 Initial output of DG in each time interval

表 1 重构前后开关动作情况(IEEE 33)

Table 1 Actions of the switches before and after reconstruction (IEEE 33)

| | 时段 | 断开的开关 |
|-----|----|----------------|
| 重构前 | 全天 | 33、34、35、36、37 |
| | 1 | 12、22、31、33、35 |
| 重构后 | 7 | 10、22、31、33、35 |
| | 17 | 9、22、31、33、35 |

表 2 重构前后上下层目标函数对比(IEEE 33)

Table 2 Comparison of upper and lower objective functions before and after reconstruction (IEEE 33)

| | 总成本/ 元 | 有功 总网损/kW·h | 从 DG 处 购电量/kW·h | 节点 电压差/p.u. |
|-----|-----------|----------------|--------------------|----------------|
| 重构前 | 5896.9021 | 4114.4371 | 7859.8 | 0.0849 |
| 重构后 | 4986.6685 | 2473.8484 | 8118.7 | 0.0544 |

本文的隶属度函数法将配网动态重构分成了3个时段, 即: 00:00—06:00, 06:00—16:00 以及 16:00—24:00, 一个周期内开关动作总次数为 10 次。表 1 列出了重构前后开关的具体动作情况。表 2 给出了重构前后上下层目标函数值的对比情况。由表 1、表 2 可以看出, 尽管重构后开关动作次数增加, 但周期内有功总网损和节点电压差明显降低, DG 的利用率也在一定程度上得到提高, 从而使得系统综合运行成本有效减少。仿真结果表明, 本文提出的双层动态配网重构方法不仅能使网络中潮流分布得以改善, 而且在增加配网经济效益、提高新能源利用率方面效果显著, 因此验证了本文所提方法的可行性和有效性。

如表 3 所示, 本文重构后综合运行成本下降了 15.4358%, 明显优于文献[23]的优化结果。因此, 利用本文方法进行配网重构, 可以在降低系统运行成本、提高经济性方面表现出更好的效果。

表 3 与文献[23]重构结果对比(IEEE 33)

Table 3 Comparison with the reconstruction result in reference [23] (IEEE 33)

| 重构后成本下降百分比 | |
|------------|----------|
| 文献[23] | 13.0525% |
| 本文 | 15.4358% |

图 7 为重构前后各时段节点电压最低值曲线。由图 7 可以看出, 重构前节点电压波动性较大, 曲

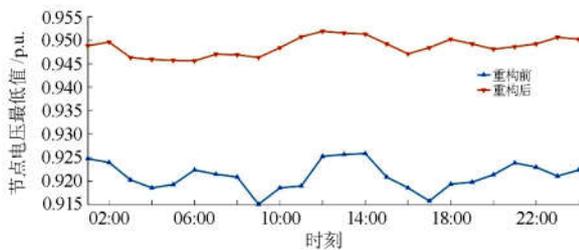


图 7 重构前后各时段节点电压最低值(IEEE 33)

Fig. 7 Minimum node voltage in each time interval before and after reconfiguration (IEEE 33)

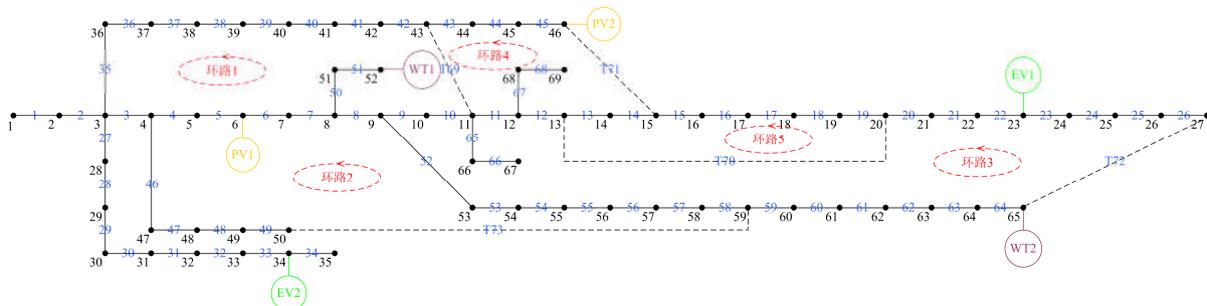


图 9 含 DG 和 EV 的 PG&E 69 节点系统结构

Fig. 9 Structure of PG&E 69-node system with DG and EV

线极差(即最大值与最小值之差)为 0.010 8; 而重构后的曲线较重构前明显更加平缓, 幅值波动较小, 曲线极差为 0.006 3, 相对重构前显著降低。同时, 系统的最小节点电压从 0.915 1 提升至 0.945 6。结合表 2 中系统节点电压差明显下降可知, 电压质量得到显著改善, 因此提高了系统稳定运行能力。

综上, 本文的方法可以在满足运行约束的同时, 既增加可再生能源的利用率, 降低配网成本, 又达到提高系统稳定运行能力的目的。

为证明本文所用的算法与其他算法相比具有更好的性能, 将其与未改进的 HSA 和文献[6]中的 GA 进行比较, 仿真结果如图 8 所示。图 8 中, 3 种方法得到的最优综合运行成本相等; 与 GA 相比, 在迭代初期本文算法能够得到更低的综合运行成本, 这也证明了本文提出的方法在配网重构应用中的有效性。同时本文采用的基于化整为零策略的 IHSA 在第 13 次迭代后出现最优解, 相较于其他两种算法, 本文方法表现出更快的收敛速度以及更少的迭代次数, 其寻优效率明显高于其他两种算法。

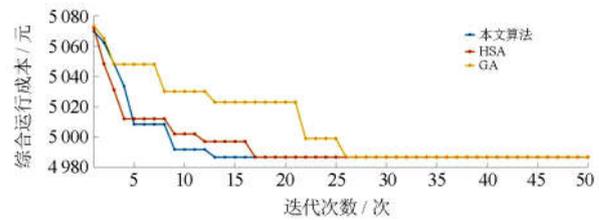


图 8 3 种算法收敛特性曲线

Fig. 8 Characteristic curves of three algorithms

4.3 通用性验证结果

为证明上述方法的通用性, 本文利用美国 PG&E 69 节点系统再次进行仿真, 分别在节点 52、65 处加入风机 WT1、WT2, 在节点 6、46 处加入光伏阵列 PV1、PV2, 在节点 23、34 处各加入 1 组 EV 群。其他参数设置与 4.1 节一致。系统结构如图 9 所示。

PG&E 69 节点系统共有 73 条支路, 其中联络开关有 5 个, 系统基准电压为 12.66 kV, 基准功率为 10 MVA, 总负荷为 $3.802+j2.695$ MVA。参数详见文献[24]。

利用 Matlab 进行仿真后结果如表 4、表 5 所示。

表 4 重构前后开关动作情况(PG&E 69)

Table 4 Actions of the switches before and after

| reconstruction (PG&E 69) | | |
|--------------------------|----|----------------|
| | 时段 | 断开的开关 |
| 重构前 | 全天 | 69、70、71、72、73 |
| | 1 | 14、58、61、69、70 |
| 重构后 | 9 | 13、19、58、61、69 |
| | 20 | 13、16、58、61、69 |

表 5 重构前后上下层目标函数对比(PG&E 69)

Table 5 Comparison of upper and lower objective functions before and after reconstruction (PG&E 69)

| | 总成本/ 元 | 有功 总网损/kW·h | 从 DG 处 购电量/kW·h | 节点 电压差/p.u. |
|-----|-----------|----------------|--------------------|----------------|
| 重构前 | 6035.65 | 4327.8954 | 7859.8 | 0.0909 |
| 重构后 | 5235.0361 | 2340.2417 | 8911.9 | 0.0513 |

表 4 给出了 PG&E 69 节点系统重构前后开关的动作情况。与 IEEE 33 节点系统重构相似, 本文提出的动态重构将 24 h 划分成 3 个时段: 00:00—08:00, 08:00—19:00 以及 19:00—24:00。开关动作总次数为 12 次。表 5 给出了重构前后上下层目标函数值的对比情况。从表 5 可以看出, 重构后有功总网损大大减小, 由重构前的 4 327.895 4 kW·h 降低至 2 340.241 7 kW·h, 综合运行总成本较重构前减少了 13.2648%。此外 DG 消纳率也得到提升, 节点电压差也由 0.090 9 降低至 0.051 3, 电压质量显著改善。

图 10 为重构前后各时段节点电压最低值曲线。由图 10 可知, 重构前曲线极差为 0.015 2; 而重构后的曲线更加平滑, 极差为 0.008 1。同时, 系统的最小节点电压从 0.909 1 提升至 0.948 7, 在一定程度上提高了电压质量, 有利于系统的稳定运行。

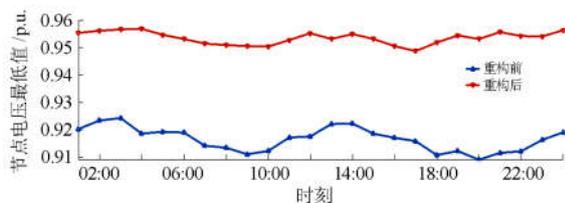


图 10 重构前后各时段节点电压最低值(PG&E 69)

Fig. 10 Minimum node voltage in each time interval before and after reconfiguration (PG&E 69)

综上, 本文提出的双层动态配网重构方法在 IEEE 33 节点系统以及美国 PG&E 69 节点系统中都表现出良好的效果, 系统综合运行成本明显降低, 电压水平显著改善, 因此证明了本文方法在配网重构应用中的有效性和通用性。

5 结论

在大规模 DG 和 EV 并入配电网的情况下, 本文结合 LHS 和改进的半梯形隶属度函数法构建双层动态重构模型, 并通过基于化整为零策略的 IHSA 对模型进行求解。对比重构前后的结果可得到如下结论:

1) 本文提出的模型和方法增加了配网系统对风、光等 DG 的利用率, 充分发挥了其在配电网中的优势, 提高了系统灵活性。

2) 本文构建的双层动态模型, 不仅有效地降低了网络损耗和系统运行成本, 而且改善了网络电压水平, 实现了兼顾经济性和运行安全可靠性的要求。

3) 采用基于化整为零策略的 IHSA, 不仅有效地解决了“维数灾”问题, 还避免了不可行解的产生, 减少了迭代次数, 优化了算法寻优性能。

综上, 在解决计及大规模 DG 和 EV 并网的配网动态重构问题中, 本文提出的方法是可行的并且具有通用性, 对实际的工程应用具有科学的指导意义。

参考文献

- [1] 范心明, 陈锦荣, 吴树鸿, 等. 离散学习优化算法在含分布式电源的配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 156-163.
FAN Xinming, CHEN Jinrong, WU Shuhong, et al. Application of discrete learning optimization algorithm to distribution network reconfiguration considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 156-163.
- [2] 吴变桃, 肖登明. 用改进的蒙特卡罗法模拟 SF₆ 和 CO₂ 混合气体电子崩参数[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 13-16.
WU Biantao, XIAO Dengming. An improved Monte Carlo method for simulation of electron swarm parameters of SF₆ and CO₂ gas mixtures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 13-16.
- [3] 陈文华, 朱海峰, 樊晓燕. 齿轮系统传动误差的蒙特卡罗模拟分析[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 435-437.
CHEN Wenhua, ZHU Haifeng, FAN Xiaoyan. Monte-Carlo simulation analysis of transmission error for gear drive systems[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

- 2004, 25(4): 435-437.
- [4] 何国锋, 谭震宇. 采用等分散抽样法的电力系统概率仿真[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 57-59.
HE Guofeng, TAN Zhenyu. Power system probabilistic simulation using average and scatted sampling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 57-59.
- [5] 王淳. 基于化学反应算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 209-214.
WANG Chun. Distribution network reconfiguration based on chemical reaction optimization[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 209-214.
- [6] 袁沔齐, 邹振宇, 孙凯祺, 等. 基于遗传算法和微分进化算法的分布式电源优化配置[J]. 中国电力, 2013, 46(1): 16-20.
YUAN Mianqi, ZOU Zhenyu, SUN Kaiqi, et al. Optimal allocation of distributed generation based on genetic algorithms and differential evolution algorithm[J]. Electric Power, 2013, 46(1): 16-20.
- [7] 林济铿, 刘阳升, 潘毅, 等. 基于 Mayeda 生成树实用算法与粒子群算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6150-6158.
LIN Jikeng, LIU Yangsheng, PAN Yi, et al. Mayeda spanning tree practical method combined with particle swarm algorithm based distribution system reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6150-6158.
- [8] 王满商, 李正明, 汪洋. 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. Distribution network distributed power supply configuration considering the uncertainties of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 67-72.
- [9] 付丽伟, 王守相, 张永武, 等. 多类型分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 79-84.
FU Liwei, WANG Shouxiang, ZHANG Yongwu, et al. Optimal selection and configuration of multi-types of distributed generators in distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 79-84.
- [10] 李扬, 韦钢, 马钰, 等. 含电动汽车和分布式电源的主动配电网动态重构[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 102-110.
LI Yang, WEI Gang, MA Yu, et al. Dynamic reconfiguration of active distribution network considering electric vehicles and distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 102-110.
- [11] 王玲玲, 王昕, 郑益慧, 等. 计及多个风电机组出力相关性的配电网无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3463-3469.
WANG Lingling, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Reactive power optimization of distribution network considering output correlation of multiple wind turbines[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3463-3469.
- [12] 于晗, 钟志勇, 黄杰波, 等. 采用拉丁超立方采样的电力系统概率潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 32-35, 81.
YU Han, ZHONG Zhiyong, HUANG Jiebo, et al. A probabilistic load flow calculation method with Latin Hypercube Sampling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 32-35, 81.
- [13] 蒋程, 王硕, 王宝庆, 等. 基于拉丁超立方采样的含风电电力系统的概率可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 193-206.
JIANG Cheng, WANG Shuo, WANG Baoqing, et al. Probabilistic reliability assessment of power system containing wind power based on Latin Hypercube Sampling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 193-206.
- [14] 贾清泉, 赵美超, 孙玲玲, 等. 主动配电网中计及时序性与相关性的分布式光伏并网规划[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1719-1728, 1908.
JIA Qingquan, ZHAO Meichao, SUN Lingling, et al. Planning for grid-connection of distributed PVs considering the sequential feature and correlation in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1719-1728, 1908.
- [15] 李振坤, 任昱亮, 王法顺, 等. 基于年时序仿真的增量配电网投资效益评估及敏感性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2163-2171.
LI Zhenkun, REN Yuliang, WANG Fashun, et al. Investment benefit evaluation and sensitivity analysis of incremental distribution network based on annual time series simulation[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2163-2171.
- [16] 张珂, 吕林, 孙宇乐. 基于隶属度时段划分的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 51-57.
ZHANG Ke, LÜ Lin, SUN Yule. Dynamic reconfiguration of distribution network based on membership partition of time intervals[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 51-57.
- [17] 丁宁, 吴军基, 邹云. 基于DSM的峰谷时段划分及分时电价研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 9-12, 16.
DING Ning, WU Junji, ZOU Yun. Research of peak and valley time period partition approach and TOU price on DSM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,

- 25(23): 9-12, 16.
- [18] 周灏, 张冠军, 李剑, 等. 基于化整为零策略和改进二进制差分进化算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 197-203.
ZHOU Quan, ZHANG Guanjun, LI Jian, et al. Distribution network reconfiguration based on strategy of breaking up the whole into parts and improved binary differential evolution algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 197-203.
- [19] 陈春, 汪飒, 刘蓓, 等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 55-60.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. Network reconfiguration based on basic ring matrix and Improved harmony search algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 55-60.
- [20] NAYAK C K, NAYAK M R. Optimal design of battery energy storage system for peak load shaving and time of use pricing[C] // IEEE 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), February 22-24, 2017, Coimbatore, India: 1-7.
- [21] NAYAK C K, NAYAK M R. Optimal battery energy storage sizing for grid connected PV system using IHSA[C] // International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), October 3-5, 2016, Paralakhemundi, India.
- [22] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [23] 吴泓俭, 雷霞, 刘斌, 等. 基于遗传膜算法的含风电机组和电动汽车的配电网分时段动态重构[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 196-205, 220.
WU Hongjian, LEI Xia, LIU Bin, et al. Membrane computing based genetic algorithm for dynamic reconfiguration of distribution network with dividing time and considering electric vehicles and wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 196-205, 220.
- [24] SAVIER J S, DAS D. Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2473-2480.

收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-09-04

作者简介:

谢琳宇(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为含分布式电源的配网优化运行; E-mail: xielinyu1995@163.com

唐忠(1964—), 男, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制、新能源开发利用与节能; E-mail: tangzhong64@163.com

黄星宇(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: 592860862@qq.com

(编辑 姜新丽)