

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191483

考虑动态重构的主动配电网多目标双层优化调度方法

倪识远, 张林垚

(国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350012)

摘要: 提出一种考虑网架动态重构的主动配电网双层优化调度模型。模型上下层的优化目标均为运行费用最小和系统快速电压稳定性最优, 下层优化目标是上层优化目标的组成部分, 通过定义相同目标函数实现上下层决策变量的协同优化。模型上层决策变量是各个重构时段内的网架结构, 采用基于基本环路的网架十进制编码方式, 提高网络重构的求解效率。模型下层的决策变量是各主动管理时段内分布式电源出力、补偿电容器、静态无功补偿器的投切、OLTC 动作情况, 实现主动配电网的最优调度。采用 IEEE 33 节点配电系统验证所提方法的有效性。仿真结果表明, 所提动态重构方法能大大提升网络重构的求解效率, 所提双层优化模型能有效降低配电网运行费用, 同时提升系统电压稳定性。

关键词: 主动配电网; 网架动态重构; 双层优化模型; 优化调度

Multi-objective bi-level optimal dispatch method of an active distribution network considering dynamic reconfigurations

NI Shiyuan, ZHANG Linyao

(Institute of Economic and Technology, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350012, China)

Abstract: A bi-level optimal dispatching model for an active distribution network considering dynamic reconfiguration is put forward. The optimal functions of both levels are lowest operational cost and best fast voltage stability. The optimal function of the lower level is part of that of the upper level. The coordination optimization is realized by defining the same optimal function of the upper and lower levels. The decision variables of the upper level are grid structure in every reconfiguration period. To improve the calculation efficiency, a decimal encoding method based on fundamental loops is employed. The decision variables of the lower level are the power of distribution generation, the reactive power of capacitor banks and static var compensator, and tap position of OLTC to achieve the optimal dispatching of the active distribution network. The IEEE 33 bus system is employed to verify the feasibility of the proposed method. The simulation results suggest that the proposed reconfiguration method can improve calculation efficiency significantly and the proposed bi-level optimal model can reduce the operational cost and improve the voltage stability of the power system simultaneously.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 5400-201956447A-0-0-00).

Key words: active distribution network; grid dynamic reconfigurations; bi-level optimization model; optimal dispatching

0 引言

2008年, CIGRE C6工作组提出了主动配电网的概念, 为配电网(Distribution Network, DN)的发展指明了方向^[1]。主动配电网(Active Distribution Network,

ADN)具备灵活的网络结构, 可通过分布式电源(Distribution Generation, DG)、需求侧管理(Demand Side Management, DSM)等经济调度方式, 深度挖掘配电网潜力, 满足负荷增长需求和分布式电源接入需要^[2]。可见, 网络重构技术和主动管理手段是实现主动配电网优化调度的重要方式。

网络重构技术通过改变配电网中开关的运行状态来改变网络的拓扑结构^[3], 而主动管理手段可以

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5400-201956447A-0-0-00)

主动调节配电网的潮流^[4], 二者相辅相成, 可以极大地降低配电网的网损, 提升配电网运行的经济性。然而, 动态重构和主动管理技术也给配电网的安全稳定运行带来了很大的挑战^[5]。因此, 研究考虑动态重构的主动配电网优化调度方法具有十分重要的现实意义。

国内外众多专家和学者对这一问题进行了深入的研究, 并取得了许多研究成果。文献[6]运用分支定界法, 提出了一种网络静态重构的方法。

在实际的配电网中, DG 和负荷具有一定的不确定性^[7], 为了计及这种不确定性对调度方案的影响, 文献[8]提出了一种基于 DG 和负荷时序模型的分布式电源选址定容方法, 将不确定规划问题转换为若干个时间断面下的确定性规划问题。而文献[9]则直接采用概率模型对 DG 和负荷的不确定性进行模拟, 提出了一种基于概率潮流的网络重构方法。主动配电网和传统配电网相比, 具备很强的主动管理能力, 主动管理主要是通过调节 DG 的有功和无功、投切补偿电容器(Capacitor Banks, CB)和静态无功补偿器(Static Var Compensator, SVC), 以及削减用户负荷等方式实现配电网潮流的优化。文献[10]提出了计及 DG 有功出力的 DG 选址定容方法, 文献[11]综合考虑 DG 和需求侧响应, 提出一种网-源-荷协调规划方法。文献[10-11]只考虑了分布式电源的有功出力, 但文献[12-13]认为风力发电和光伏发电两种分布式电源, 除有功出力外, 还具有很强的无功支撑能力, 并且 DG 的无功出力是可调的。可见, 分布式电源的无功控制同样也是主动管理的重要手段。文献[14]建立了恒功率因数的 DG 控制模型, 提出了一种考虑无功出力的分布式电源规划方法。文献[15]提出了基于改进帝国竞争算法的主动配电网双层双阶段优化调度方法。文献[16]提出了考虑储能的主动配电网分布式电源规划方法。

配电网动态重构和主动管理共同优化配电网, 无法解耦为两个独立的子问题进行求解, 但由于解的空间和形式不同, 二者在优化过程中又是相对独立的。因此, 协同进化算法可适用于配电网动态重构和主动管理共同作用下的配电网规划^[17]。文献[18]提出一种基于协同进化算法的无功优化方法。协同进化算法通过对种群进行合理的划分, 有助于提高大规模优化问题的求解效率。文献[19]基于协同进化思想, 提出了一种考虑负荷和分布式电源时变性的配电网多目标动态重构和 DG 调度方法。将重构问题和主动管理构建为两个独立种群, 种群进化过程互相隔离, 并通过生态系统作用协同进化, 但文献[19]未考虑 CB、SVC、DSM 等主动管理手段。

文献[20]提出了基于多代理技术的配电网重构方法。在此基础上, 文献[21]进一步考虑电动汽车和分布式电源, 提出了含分布式电源及电动汽车的多代理配电网重构。多代理技术需要计算每个代理的最优解, 各代理对自身局部最优解进行评估, 并向相邻代理学习, 实现代理之间的交互, 并最终得到全局最优解。文献[22]利用烟花算法可以考虑解的多样性的特点, 提出了基于烟花算法的主动配电网动态重构和 DG 调度策略。

考虑动态重构的主动配电网优化调度主要需要解决两个重要问题: 一是对于网络重构, 需要研究更高效的求解算法; 二是主动管理技术, 除 DG 的有功出力外, 还需充分考虑 DG 无功调节、OLTC 调节、CB 和 SVC 投切、DSM 等其他主动管理手段。

为解决上述问题, 本文提出了一种考虑动态重构的主动配电网双层优化调度方法, 模型的上层以各重构时段内的网架为决策变量, 下层的决策变量为该时段的 DG 有功和无功出力、OLTC 调节、CB 和 SVC 投切和需求侧管理下负荷削减系数, 通过设置相同的目标函数(目标函数分别是运行费用最小和最优快速电压稳定性)实现配电网重构和主动管理的协同优化。为了提高上层网架重构的计算效率, 本文提出一种基于基本环路的十进制网架编码策略, 同时将辐射式约束作为网架种群进化的条件之一, 保证进化过程中生成的任一网架均满足辐射式约束, 将上层优化转换为无约束优化。在下层主动管理手段中, 本文充分考虑了各种主动调节手段, 不仅考虑了 DG 的有功出力, 还计及了 DG 的无功调节、CB 和 SVC 的投切、DSM 等多种主动调节手段。对改进的 IEEE 33 节点系统进行仿真, 验证了本文所提算法的有效性。

1 主动配电网元件时序建模

1.1 分布式电源时序模型

(1) 风力发电机

风力发电机(Wind Turbine Generator, WTG)输出的有功功率和风速以及 WTG 的切入、切出风速有关, 有功出力如式(1)所示。

$$P_t^{\text{WTG}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_t < v_{ci} \quad v_t \geq v_{co} \\ P_r^{\text{WTG}} \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v_t < v_r \\ P_r^{\text{WTG}} & v_r \leq v_t < v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_{ci} 表示切入风速; v_{co} 表示切出风速; v_r 表示额定风速; P_t^{WTG} 表示 t 时刻 WTG 输出的有功功

率; P_r^{WTG} 表示 WTG 的额定功率。

传统方法认为 WTG 只能输出有功功率, 实际上, WTG 也具备一定的无功输出能力^[23]。

$$(P_t^{\text{WTG}})^2 + (Q_t^{\text{WTG}})^2 \leq (S_r^{\text{WTG}})^2 \quad (2)$$

式中: Q_t^{WTG} 表示 t 时刻 WTG 输出的无功功率; S_r^{WTG} 表示 WTG 额定视在功率。

(2) 光伏发电机(Photovoltaic Generator, PVG)

光照强度通常满足 Beta 分布, 并且光伏发电机出力和光照强度满足如式(3)关系。

$$P_t^{\text{PVG}} = \begin{cases} P_r^{\text{PVG}} \frac{I_t}{I_r} & I_t \leq I_r \\ P_r^{\text{PVG}} & I_t > I_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_t^{PVG} 表示 t 时刻 PVG 的有功输出; I_t 表示 t 时刻的光照强度; I_r 表示额定光照强度; P_r^{PVG} 表示 PVG 的额定有功输出。

由于 PVG 在有功出力较弱的时刻具有很强的无功输出能力^[13], 即

$$(P_t^{\text{PVG}})^2 + (Q_t^{\text{PVG}})^2 \leq (S_r^{\text{PVG}})^2 \quad (4)$$

式中: Q_t^{PVG} 表示 t 时刻 PVG 输出的无功功率; S_r^{PVG} 表示 PVG 额定视在功率。

WTG 和 PVG 有功输出标幺值曲线如文献[20]所示。可以看出, WTG 和 PVG 的有功出力是不受控的, 因此二者是不可控分布式电源。

(3) 微型燃气机

微型燃气机(Micro Turbine Generator, MTG)有功和无功出力在一定范围内可以解耦调节, 因此 MTG 是可控分布式电源。

$$(P_t^{\text{MTG}})^2 + (Q_t^{\text{MTG}})^2 \leq (S_r^{\text{MTG}})^2 \quad (5)$$

式中, P_t^{MTG} 、 Q_t^{MTG} 和 S_r^{MTG} 分别表示 t 时刻 MTG 的有功、无功出力和额定视在功率。

1.2 负荷时序模型

负荷的静态电压幂函数表示形式如式(6)。

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{load}} = P_{i,r}^{\text{load}} \left(\frac{U_{i,t}}{U_r} \right)^\alpha \\ Q_{i,t}^{\text{load}} = Q_{i,r}^{\text{load}} \left(\frac{U_{i,t}}{U_r} \right)^\beta \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{load}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{load}}$ 分别表示 t 时刻节点 i 等效有功和无功负荷; $U_{i,t}$ 表示 t 时刻节点 i 实际电压标幺值; U_r 表示额定电压标幺值, 本文取 1; α 和 β 分别表示负荷的有功和无功特征系数, 本文分别取 0.72 和 2.96; $P_{i,r}^{\text{load}}$ 和 $Q_{i,r}^{\text{load}}$ 分别表示额定电压下节点 i 的有

功和无功负荷, 其中 $P_{i,r}^{\text{load}}$ 的时序标幺值曲线见文献[23]。

负荷的需求侧管理通过可削减负荷实现。

$$\begin{cases} \Delta P_i = \lambda_i P_i^{\text{load}} \\ \Delta Q_i = \lambda_i Q_i^{\text{load}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ΔP_i 和 ΔQ_i 分别表示节点 i 有功负荷和无功负荷的削减量; λ_i 表示节点 i 的负荷削减系数。

1.3 OLTC 时序模型

有载调压变压器(On-Load Tap Changer, OLTC)通过调节分接头位置, 让输出电压可在一定范围内调整。

$$\Delta U_t = \Delta U^{\text{OLTC}} T_t \quad (8)$$

式中: ΔU_t 表示 t 时刻电压变化量标幺值; ΔU^{OLTC} 表示一个档位对应的电压标幺值; T_t 表示 t 时刻分接头所处位置。

2 双层优化调度模型

本文建立了考虑网络动态重构的主动双优化调度模型, 模型上层考虑一个重构时段内联络开关的动作情况, 下层考虑每个主动管理时段内 DG 的有功、无功出力, SVC、CB 的投切情况, OLTC 调节情况和负荷的削减情况。

本文所述双层协调规划模型可以表示为

$$\begin{cases} F_1(x_s^{\text{grid}}) = \min(C_s^0) \\ F_2(x_s^{\text{grid}}) = \min(FVSI_s) \\ \text{s.t. } G(x_s^{\text{grid}}) \leq 0 \\ H(x_s^{\text{grid}}) = 0 \\ f_1(x_{s,t}^{\text{am}}) = \min(C_{s,t}^0) \\ f_2(x_{s,t}^{\text{am}}) = \min(FVSI_{s,t}) \\ \text{s.t. } g(x_{s,t}^{\text{am}}) \leq 0 \\ h(x_{s,t}^{\text{am}}) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_s^{grid} 表示上层网架决策变量; $x_{s,t}^{\text{am}}$ 表示下层主动管理决策变量。

为了实现上层和下层的协同优化, 上下两层设置的优化目标具有相同的物理意义, 分别是运行费用 C^0 和快速电压稳定性^[24](Fast Voltage Stability Index, FVSI)。

2.1 上层优化

2.1.1 目标函数

上层的目标函数为总运行费用 F_1 、系统的快速电压稳定性 F_2 。

$$\begin{cases} F_1 = \min(C_s^0) = \min(\sum_{t \in s} C_{s,t}^0) \\ F_2 = \min(FVSI_s) = \min[\max(FVSI_{s,t})] \end{cases} \quad (10)$$

模型的上下层通过式(10)相互影响, 协同进化。

2.1.2 约束条件

由于上层的决策变量只有 x_s^{grid} , 因此约束条件只有配电网网架的辐射状约束条件^[25]。

条件 1:

$$\sum x_s^{\text{grid}} = N^{\text{node}} - 1 \quad (11)$$

式中, N^{node} 表示网络中的节点数量。

条件 2: 网络中没有孤点和环网。

2.2 下层优化

2.2.1 目标函数

(1) 运行费用

$$C_{s,t}^0 = C_s^{\text{grid}} + C_{s,t}^{\text{loss}} + C_{s,t}^{\text{DGcut}} + C_{s,t}^{\text{DSM}} \quad (12)$$

式中: C_s^{grid} 表示重构成本; $C_{s,t}^{\text{loss}}$ 表示网损费用; $C_{s,t}^{\text{DGcut}}$ 表示 DG 切除费用; $C_{s,t}^{\text{DSM}}$ 表示需求侧管理费用。

$$C_s^{\text{grid}} = 2f^{\text{grid}}N \quad (13)$$

式中: f^{grid} 表示单个重构开关动作费用; N 表示动作的开关数量。

$$C_{s,t}^{\text{loss}} = \sum_{ij \in \Omega^{\text{Line}}} f^{\text{loss}} p_{ij,s,t}^{\text{loss}} \Delta t \quad (14)$$

式中: Ω^{Line} 表示重构网架所包含的线路集合; f^{loss} 表示单位网损电价; $p_{ij,s,t}^{\text{loss}}$ 表示支路 ij 上的有功损耗; Δt 表示采样时长, 为 1 h。

$$\begin{aligned} C_{s,t}^{\text{DG,cut}} = & \sum_{i \in \Omega^{\text{WTG}}} f^{\text{WTG,cut}} p_{i,s,t}^{\text{WTG}} (y_i^{\text{WTG}} - n_{i,s,t}^{\text{WTG}}) \Delta t + \\ & \sum_{i \in \Omega^{\text{PVG}}} f^{\text{PVG,cut}} p_{i,s,t}^{\text{PVG}} (y_i^{\text{PVG}} - n_{i,s,t}^{\text{PVG}}) \Delta t \end{aligned} \quad (15)$$

式中: Ω^{WTG} 、 Ω^{PVG} 分别表示 WTG 和 PVG 的安装节点集合; $f^{\text{WTG,cut}}$ 、 $f^{\text{PVG,cut}}$ 分别表示单位电量 WTG 和 PVG 的削减费用; $p_{i,s,t}^{\text{WTG}}$ 、 $p_{i,s,t}^{\text{PVG}}$ 分别表示单台 WTG、PVG 机组在 t 时刻的有功出力; y_i^{WTG} 、 y_i^{PVG} 分别表示 WTG 和 PVG 的安装数量; $n_{i,s,t}^{\text{WTG}}$ 、 $n_{i,s,t}^{\text{PVG}}$ 分别表示 WTG 和 PVG 在 t 时刻的实际投入数量。

$$C_{s,t}^{\text{DSM}} = \sum_{i \in \Omega^{\text{DSM}}} f^{\text{DSM}} \lambda_{i,s,t} p_{i,s,t}^{\text{load}} \Delta t \quad (16)$$

式中: Ω^{DSM} 表示可削减负荷节点集合; f^{DSM} 表示单位负荷的削减费用; $p_{i,s,t}^{\text{load}}$ 表示 t 时刻节点 i 负荷的有功分量; $\lambda_{i,s,t}$ 表示 t 时刻节点 i 的负荷削减系数。

(2) FVSI

$$FVSI_{ij,s,t} = \frac{4Z_{ij}^2 Q_{j,s,t}}{U_{j,s,t}^2 X_{ij}} \quad (17)$$

文献[24]提出了 FVSI 的定义, 通过计算支路的静态电压稳定性, 判断整个系统的电压稳定性, 其中 $Q_{j,s,t}$ 表示节点 j 的无功分量, X_{ij} 和 Z_{ij} 分别表示支路 ij 的电抗和阻抗, $U_{j,s,t}$ 表示节点 j 的电压幅值, j 为支路 ij 的末端节点。

2.2.2 约束条件

(1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij,s,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,s,t}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij,s,t} + B_{ij} \cos \theta_{ij,s,t}) \end{cases} \quad (18)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别表示节点 i 的等效有功、无功功率注入; U_i 、 U_j 分别表示节点 i 和节点 j 的电压; 节点 i 和 j 分别为支路 ij 的首节点和末节点; G_{ij} 、 B_{ij} 分别表示节点导纳矩阵的实部和虚部; $\theta_{ij,s,t}$ 为支路 ij 在第 s 重构时段下第 t 时刻的节点 i 和节点 j 之间的相位差。

P_i 和 Q_i 的具体表达式如式(19)所示。

$$\begin{cases} P_i = p_{i,s,t}^{\text{WTG}} n_{i,s,t}^{\text{WTG}} + p_{i,s,t}^{\text{PVG}} n_{i,s,t}^{\text{PVG}} + p_{i,s,t}^{\text{MTG}} n_{i,s,t}^{\text{MTG}} - \lambda_{i,s,t} p_{i,s,t}^{\text{load}} \\ Q_i = q_{i,s,t}^{\text{WTG}} n_{i,s,t}^{\text{WTG}} + q_{i,s,t}^{\text{PVG}} n_{i,s,t}^{\text{PVG}} + q_{i,s,t}^{\text{MTG}} n_{i,s,t}^{\text{MTG}} + q_{i,s,t}^{\text{CB}} n_{i,s,t}^{\text{CB}} + \\ q_{i,s,t}^{\text{SVC}} n_{i,s,t}^{\text{SVC}} - \lambda_{i,s,t} q_{i,s,t}^{\text{load}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $p_{i,s,t}$ 和 $q_{i,s,t}$ 分别表示第 s 个重构时段内第 t 时刻单位设备的有功和无功; $n_{i,s,t}$ 表示设备的接入数量。上标 WTG、PVG、MTG、CB、SVC 表示对应设备, 上标 load 表示负荷。

(2) 节点电压约束

$$\underline{U} \leq U_i \leq \bar{U} \quad (20)$$

根据《配电网规划设计技术导则》要求, 中压配电网电压偏差不得超过额定值的 7%, 因此, \underline{U} 取 0.93 p.u., \bar{U} 取 1.07 p.u.。

(3) 支路功率约束

$$S_{ij} \leq \bar{S}_{ij} \quad (21)$$

(4) DG、CB、SVC 接入数量限制

$$\begin{cases} n_{i,s,t}^{\text{WTG}} \leq y_i^{\text{WTG}} \\ n_{i,s,t}^{\text{PVG}} \leq y_i^{\text{PVG}} \\ n_{i,s,t}^{\text{MTG}} \leq y_i^{\text{MTG}} \\ n_{i,s,t}^{\text{CB}} \leq y_i^{\text{CB}} \\ n_{i,s,t}^{\text{SVC}} \leq y_i^{\text{SVC}} \end{cases} \quad (22)$$

式中： y_i 表示安装数量；上标为对应设备。

(5) OLTC 分接头调节范围约束

$$\underline{T} \leq T_{s,t} \leq \bar{T} \quad (23)$$

式中， \bar{T} 、 \underline{T} 分别表示分接头调节的上下限。

(6) WTG、PVG 无功出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq q_{i,s,t}^{\text{WTG}} \leq \sqrt{(S^{\text{WTG}})^2 - (p_{i,s,t}^{\text{WTG}})^2} \\ 0 \leq q_{i,s,t}^{\text{PVG}} \leq \sqrt{(S^{\text{PVG}})^2 - (p_{i,s,t}^{\text{PVG}})^2} \end{cases} \quad (24)$$

S^{WTG} 和 S^{PVG} 分别表示WTG和PVG的额定容量，在一般情况下，WTG和PVG不会吸收无功功率，因此工作在出力曲线的第一象限。

(7) MTG 有功、无功出力约束

MTG可以实现有功、无功的解耦控制，因此设置有功出力系数 $\alpha_{i,s,t}^{\text{p,MTG}}$ 和无功出力系数 $\alpha_{i,s,t}^{\text{q,MTG}}$ 对MTG的有功、无功输出进行控制。

$$\begin{cases} p_{i,s,t}^{\text{MTG}} = \alpha_{i,s,t}^{\text{p,MTG}} S^{\text{MTG}} \\ q_{i,s,t}^{\text{MTG}} = \alpha_{i,s,t}^{\text{q,MTG}} \sqrt{(S^{\text{MTG}})^2 - (p_{i,s,t}^{\text{MTG}})^2} \\ 0 \leq \alpha_{i,s,t}^{\text{p,MTG}} \leq 1 \\ 0 \leq \alpha_{i,s,t}^{\text{q,MTG}} \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

(8) 负荷削减系数约束

$$\underline{\lambda} \leq \lambda_{i,s,t} \leq \bar{\lambda} \quad (26)$$

式中， $\bar{\lambda}$ 、 $\underline{\lambda}$ 分别表示负荷削减系数的上下限。

(9) 上级电网约束

上级电网约束包括容量约束和爬坡速率约束。

$$\begin{cases} P_{s,t}^{\text{gen}} > 0 \\ Q_{s,t}^{\text{gen}} > 0 \\ (P_{s,t}^{\text{gen}})^2 + (Q_{s,t}^{\text{gen}})^2 \leq (S_{\text{max}}^{\text{gen}})^2 \\ P_{t+1}^{\text{gen}} - P_t^{\text{gen}} \leq \Delta P^{\text{gen}} \end{cases} \quad (27)$$

式中： $P_{s,t}^{\text{gen}} > 0$ 、 $Q_{s,t}^{\text{gen}} > 0$ 分别表示上级电网的有功和无功出力； $S_{\text{max}}^{\text{gen}}$ 表示上级电网的最大出力上限； ΔP^{gen} 表示最大爬坡速率。

3 模型求解

通过上层优化可以得到网架的重构方案，并作为下层的输入，通过下层规划得到主动管理下最优调度方案。模型求解流程如图1所示。

上层规划流程如下：

- (1) 设置重构时段 s 为1，生成初始网架种群，并对种群中的所有个体进行辐射式约束校验，若个体无法通过校验，则重新生成该个体。
- (2) 将上层网架作为输入送入下层，启动下层规划，根据下层的计算结果，通过式(9)计算上层的适

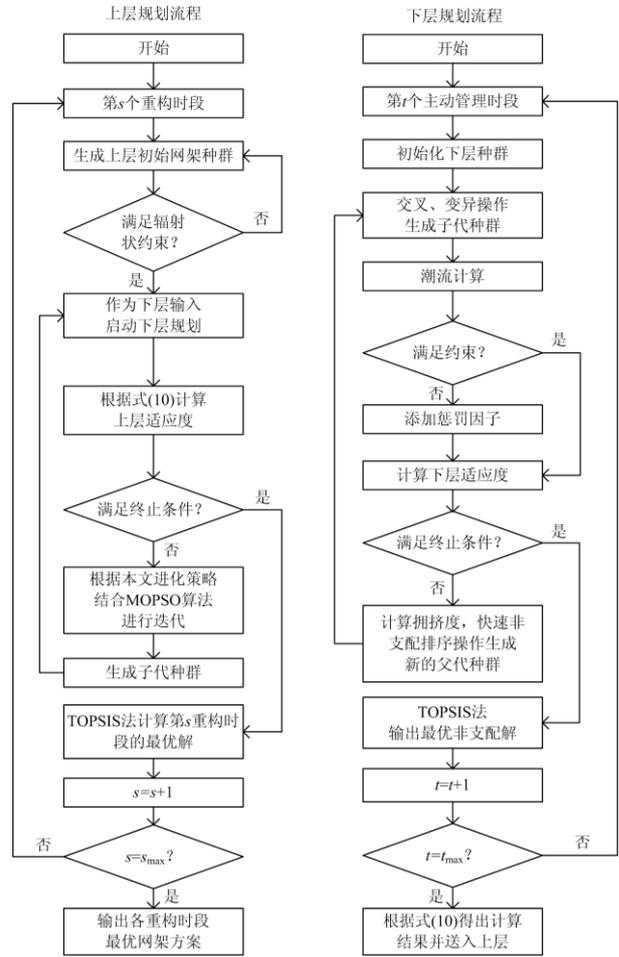


图1 求解流程图

Fig. 1 Flow chart of solution

度。

- (3) 根据本文进化策略，生成子代种群。
- (4) 重复步骤(2)–(3)直至满足迭代终止条件。
- (5) 采用逼近理想解排序法^[26](Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)，输出第1个重构时段的最优网架。
- (6) 重复步骤(1)–(5)，直至输出所有重构时段的最优网架。

下层规划流程如下：

- (1) 初始化下层种群。
- (2) 交叉、变异操作生成子代种群，合并父代种群和子代种群。
- (3) 输入上层网架和第 s 重构时段第1时刻的分布式电源和负荷数据。
- (4) 判断约束条件，即式(20)–式(27)是否满足，若满足条件则计算适应度，若不满足，则添加惩罚因子后计算适应度。添加惩罚的方式为将目标函数置为无穷大，在Matlab中可将无穷大设置为 10^9 。

(5) 计算拥挤度, 并对种群进行快速非支配排序, 产生新父代种群。重复步骤(3)–(5)直至满足迭代终止条件。

采用 NDX 算子进行交叉操作, 产生子代种群。

$$\begin{cases} x_{1j} = \frac{x_{1j} + x_{2j} + 1.481 \cdot |N(0,1)| \cdot (x_{1j} - x_{2j})}{2} \\ x_{2j} = \frac{x_{1j} + x_{2j} - 1.481 \cdot |N(0,1)| \cdot (x_{1j} - x_{2j})}{2} \end{cases} \quad (28)$$

式中: x_{1j} 和 x_{2j} 表示任意两个父代个体, x_{1j} 和 x_{2j} 表示生成的子代个体; $N(0,1)$ 表示均值为 0、标准差为 1 的正态分布函数; μ 表示(0,1)区间内的任意随机数。

采用多项式变异提升种群的多样化程度, 变异操作如式(29)。

$$\begin{cases} B_j = (2u)^{\frac{1}{\eta+1}} - 1, & u \leq 0.5 \\ B_j = 1 - (2(1-u))^{\frac{1}{\eta+1}}, & u > 0.5 \end{cases} \quad (29)$$

式中: η 表示多项式变异形状参数; μ 表示(0,1)区间内的任意随机数。

(6) 运用 TOPSIS 法输出第 s 重构时段第 1 时刻的主动管理结果。

(7) $t=t+1$ 。重复步骤(1)–(7), 并输出第 s 个重构时段内所有时刻的适应度和主动管理结果。

(8) 根据式(10)计算适应度并送入上层。该步骤衔接上层优化的步骤(2)。

4 仿真分析

4.1 上层网架的编码方式

本文使用 IEEE 33 节点配电系统进行仿真。该配电系统中包含了 32 条普通线路和 5 条联络线。且定义电源节点为节点 1。系统拓扑如图 2 所示。

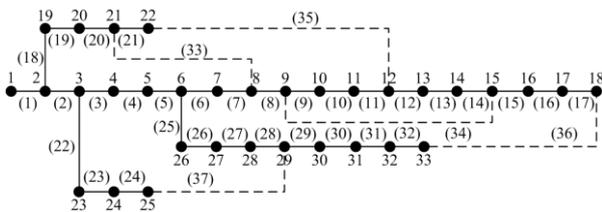


图 2 IEEE 33 节点系统网络结构
Fig. 2 Structure of IEEE 33 bus system

线路只有接入和断开两种状态, 是 0-1 变量, 因此常规的网架变量是基于二进制进行编码的。基于二进制的编码方式的缺点是搜索空间过大, 共 2^{37} , 并且在计算过程中会生成大量不满足辐射式约束的网架方案, 计算效率低下。

由于配电网需满足辐射式约束式(12), 因此,

对于 IEEE 33 节点系统而言, 网架必须存在 32 条支路。同时, 还需要满足网架中无孤岛、无环路的要求。从图 2 可以看出, IEEE 33 节点系统存在 5 个基本闭合环路, 因此只需要每个基本闭合环路断开一条支路, 且相邻基本闭合环路的共有支路部分最多只能断开一条支路。按照上述规则生成的网架种群可以保证满足辐射式约束条件, 使得上层优化变为无约束优化。

基于上述原理, 本文提出基于基本闭合环路的十进制编码方法, 如表 1 所示。

表 1 基本闭合环路的编码方法

基本闭合环路编号	支路编码	十进制编码
1	2,3,4,5,6,7,33,20,19,18	1-10
2	22,23,24,37,28,27,26,25,5,4,3	1-11
3	33,8,9,10,11,35,21	1-7
4	9,10,11,12,13,14,34	1-7
5	8,7,6,25,26,27,28,29,30,31,32,36,17,16,15,34	1-16

将辐射式约束作为种群进化的条件之一, 以基本环路 1 和基本环路 2 为例, 共有支路为支路 3、4、5。根据前述进化规则, 若基本环路 1 中支路 3(共有支路)断开, 则在基本环路 2 中只能断开除支路 3、4、5 以外的其他支路; 若基本环路 1 断开支路 6(非共有支路), 则基本环路 2 可断开任意支路。在网架变量进化过程中, 所有相邻基本环路均采用相同的进化方式。这样可以保证在网架种群的进化过程中, 所生成的每一个网架均能够满足辐射式约束, 这样上层优化变为无约束优化, 极大地提高了算法的收敛速度。

4.2 算例参数说明

本算例中, WTG 安装节点为节点 7、24, 安装数量均为 5 组; PVG 安装节点为节点 25、30, 安装数量均为 5 组; MTG 安装节点为节点 8、32, 安装数量均为 5 组。网络总负荷设置为基准值的 1.5 倍, 即网络负荷为 7.63 MW+3.82 Mvar, 风电、光伏的削减费用为 1 元/kWh, 网损成本为 0.5 元/kWh, MTG 的额定功率因数设为 0.9, 开关动作成本为 2 元/次, OLTC 有 9 个挡位, 每个挡位调节的电压为 0.0125 p.u., 因此电压可调范围是 $1 \pm 4 \times 0.0125$ p.u., 节点 15、18、21 为可削减负荷节点, 负荷削减系数范围为 0~0.15, 负荷削减成本为 1 元/kWh, CB 安装节点为节点 7、11、12、31, 单位 CB 容量为 50 kvar, 最大接入数量为 5 组, SVC 接入节点为节点 19, 单位 SVC 容量为 20 kvar, 最大接入数量为 5 组。

由于本文模型为多目标优化模型,因此上层采用改进的 MOPSO(Multi Objective Particle Swarm Optimization)算法进行计算,学习因子分别设为 1.49、1.49,引入自适应惯性权重为

$$\omega_{iter+1} = \omega_{init} - (\omega_{init} - \omega_{iter})(N_{iter} / N_{iter}^{max})^2 \quad (30)$$

式中: ω_{init} 表示惯性权重初始值,设为 0.8; ω_{iter} 表示第 $iter$ 代的惯性权重; N_{iter} 和 N_{iter}^{max} 分别表示当前迭代次数和最大迭代次数。

自适应惯性权重在迭代初期较大,因此在迭代初期能够快速搜索整个解空间,而在迭代后期值较小,能够实现局部精细化搜索,提升收敛精度。

下层采用改进的 NSGA II 算法,用 NDX 算子对算法的交叉操作进行改进,用多项式变异算子提升种群多样性。算法参数设置如下:初始种群数量为 50 个,最大迭代次数为 50 次,交叉率为 0.9,变异率为 0.1,多项式变异的分布指数 η 取 5。

本文仿真的硬件平台为 Intel(R) Core(TM) i5-7300HQ CPU @ 2.5 GHz, 8 GB 内存,操作系统为 Window10 家庭中文版,开发环境为 Matlab R2016a,运行自编双层规划程序,运行时间约为 3 h 12 min。

4.3 仿真结果

为了验证本文所提基于基本环路的十进制编码方法的有效性,对本文所提双层优化模型进行简化,不考虑配电网的主动管理,即本文模型退化为单层模型。传统二进制编码网架和本文所提方法的收敛性如图 3 所示。

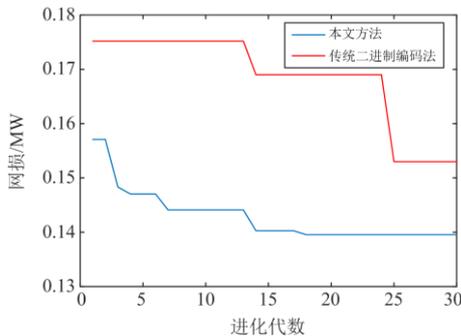


图 3 本文所提算法和传统方法的收敛性对比

Fig. 3 Comparison between the proposed method and conventional method

从图 3 可以看出,本文所提的网架编码算法收敛速度很快,根据多次仿真实验的结果,利用本文所提的网架种群编码和进化方法,计算结果均能够在约第 15 代时收敛,在不考虑主动管理手段的前提下,重构的平均收敛时间为 1.19 s。而传统方法收敛速度很慢,并且不能稳定收敛,本文对传统网架

编码方法进行了 10 次实验。设置进化代数为 100,在规定的进化次数内,传统网架编码方法不能保证稳定收敛,其中仅有 5 次的计算结果和本文所提方法获得的结果一致。根据 10 次实验结果,传统方法最快在第 65 代时收敛,此时收敛时间为 5.63 s。

传统方法不能稳定收敛的主要原因是,传统方法在进化过程中先生成网架种群,后对种群进行辐射约束校验,生成网架时没有限制,这样会产生大量的无效网架,因此收敛速度很慢,并且收敛结果非常依赖初始种群的设定。而本文将辐射式约束作为种群进化的条件之一,能够保证进化过程中生成的任一种群均满足辐射式约束条件,不产生无效解,因此本文所提方法收敛稳定且快速。

按照文献[19]的划分方法,将典型日分为 4 个重构时段,分别是 1:00—6:00、7:00—10:00、11:00—20:00 和 21:00—24:00。在每个重构时段的起始时刻,网架发生重构,而在一个重构时段内,网架保持不变。本文方法的网架仿真结果见表 2。

表 2 本文方法的网架动态重构结果

Table 2 Grid dynamic reconfiguration results of the proposed method

重构时段	网架动态重构结果(断开支路)
1:00—6:00	13、21、28、31、33
7:00—10:00	12、20、21、26、34
11:00—20:00	3、9、14、28、34
21:00—24:00	6、8、9、17、27

考虑重构和不考虑重构时,各项指标的计算结果对比如表 3 所示。

表 3 本文方法的优化结果

Table 3 Optimal results of the proposed method

优化目标	考虑重构	不考虑重构
重构成本/万元	2.34	0
线损成本/万元	27.04	27.47
弃风弃光成本/万元	22.52	52.19
负荷削减成本/万元	12.94	13.21
年运行成本/万元	64.84	92.88
FVSI/p.u.	1.41	1.60

根据表 3 的结果可知,考虑重构时总运行成本为 64.84 万元,而不考虑重构时的总运行成本为 92.88 万元;年运行成本减少 28.04 万元,减少 43.24%。

考虑网络重构时,会产生 2.34 万元的重构成本。考虑重构时,线损成本和负荷削减成本略有减少,降低的百分比分别为 1.59% 和 2.09%;但是在分布式电源弃电成本这一项上,考虑重构时,弃风弃光

成本为 22.52 万元, 而不考虑重构时, 该成本为 52.19 万元。从弃风弃光的成本计算结果中可以看出, 考虑重构后分布式电源的弃电成本大幅降低, 减少了 29.67 万元。即考虑重构后, DG 的弃电现象大幅减少, 因此分布式电源的消纳率有很大的提升。

此外, 考虑重构时配电网的 $FVSI$ 为 1.41, 而不考虑重构时的配电网 $FVSI$ 为 1.60, 根据 $FVSI$ 的定义, 该值越小, 系统越稳定。因此本文采用 $FVSI$ 的倒数来计算系统电压性能的提升水平, 考虑重构后, 系统的电压稳定性提升了 11.88%。

综上所述, 虽然网络重构会带来一定的重构成本, 但是网络重构有利于分布式电源的消纳。并且在提高分布式电源渗透率的同时, 还能在一定程度上提升网络的电压稳定性。因此, 配电网动态重构也是非常重要的调节手段, 配合配电网的主动管理技术, 能够使得配电网的经济性和可靠性得到很大的提升。

以节点 24(WTG 安装节点)和节点 30(PVG 安装节点)为例, 说明分布式电源在典型日 24 h 内的弃电情况, 分别如图 4 和图 5 所示。以节点 21 为例说明负荷削减的情况, 如图 6 所示。

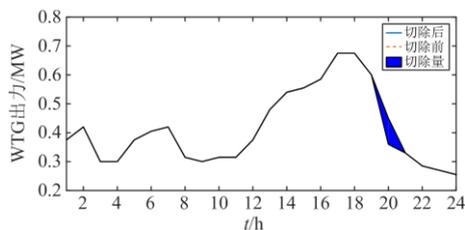


图 4 节点 24 WTG 弃电情况

Fig. 4 WTG power abandon of node 24

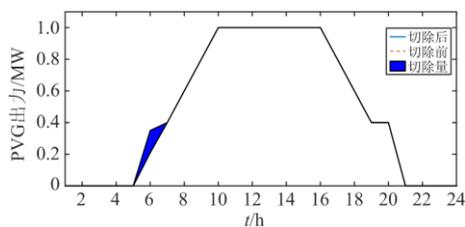


图 5 节点 30 PVG 弃电情况

Fig. 5 PVG power abandon of node 30

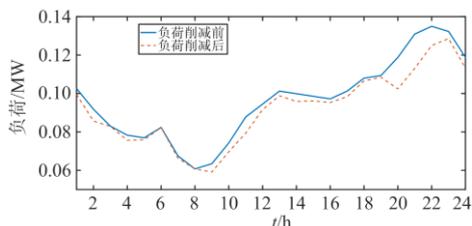


图 6 节点 21 负荷削减情况

Fig. 6 Load reduction of node 21

根据图 4 可知, WTG 弃电发生在 19:00—21:00 之间。由于节点 24 较为靠近电源节点, 因此在该时段内削减部分分布式电源出力, 可以避免向上级电源倒送功率。根据图 5 可知, PVG 弃电则主要发生在 5:00—7:00 之间, 弃光情况和负荷变化趋势相一致, 在弃光的时段内, 负荷水平是降低的。由于负荷水平的下降, 引起光伏发电的削减。

根据图 6 可知, 负荷在多个时段内均有削减, 主要原因是本文的负荷削减系数为实数变量, 因此大部分时刻的优化结果位于 0~0.01 之间。但负荷削减的主要时间段为 20:00—22:00 的晚高峰时段。在该时段内负荷水平较高, 适当削减部分负荷有助于提升电网运行的安全性。

为了进一步分析本文所提方法对系统电压水平的提升, 设置 4 种运行状态, 并进行仿真。运行状态 1: 原系统; 运行状态 2: 原网络基础上考虑网络重构; 运行状态 3: 考虑主动管理但不考虑网络重构; 运行状态 4: 同时考虑网络重构和主动管理。四种运行状态在第 18 场景的仿真结果如图 7 所示。

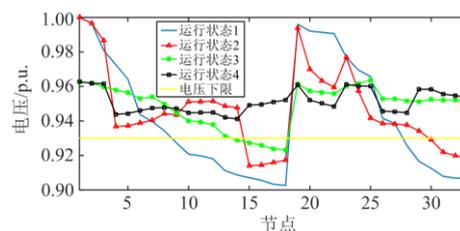


图 7 四种运行状态电压水平对比

Fig. 7 Voltage comparison of four operation schemes

根据图 7 中运行状态 1 的结果, 原系统的电压波动较大, 最大电压差为 0.096 7 p.u., 系统最低电压出现在节点 17, 最低电压为 0.903 3 p.u., 远低于规定的下限值, 不仅如此, 系统中有多节点的电压低于 0.93 p.u. 的电压下限。可见, 原系统电压的可靠性较低。

根据图 7 中运行状态 2 的结果, 配电网采用了重构手段之后, 电压水平有所提升, 最大电压差为 0.085 6 p.u., 最低电压为 0.914 4 p.u., 较于运行状态 1 提升了 0.011 1 p.u., 可见网络重构有助于提高配电网电压水平。

根据图 7 中运行状态 3 的结果, 在仅考虑主动管理手段时, 由于分布式电源的接入, 分布式电源能够有效减少配电网等效负荷, 同时分布式电源的无功输出能力能够有效支撑系统电压, 因此和运行状态 1 相比, 配电网电压水平得到很大提升。但由于网络结构和原网络相同, 因此电压水平的变化趋势和原网络相同, 由于节点 16、17、18 位于较长支

路的末端,且附近无分布式电源,无法提供足够的电压支撑,因此这三个节点的电压水平仍低于0.93 p.u.的电压下限。

根据图7中运行状态4的结果,当系统采用了动态重构和主动管理两种控制手段后,由于网络结构发生了变化,因此电压的分布变得更加平稳,配电网的最大电压为0.9625 p.u.,最低电压为0.9511 p.u.,配电网的电压差为0.0114 p.u.,较于前三种运行状态,电压波动水平很小。此外,考虑动态重构和主动管理之后,所有节点的电压均高于0.93 p.u.的电压下限,满足配电网对电压的需求。

5 结论

本文提出一种考虑网络动态重构的主动配电网多目标双层优化调度方法,根据仿真结果得到以下结论:

1) 本文提出的基于环路的十进制网架编码方法和考虑辐射式约束的种群进化方法,能够保证每个生成的网架必定满足配电网辐射式约束,使得上层优化转换为无约束优化,在计算效率上比传统的二进制编码方法有很大提升。

2) 考虑网络重构后的配电网有利于减少分布式电源的弃电现象,提高分布式电源的消纳率,同时有助于提升系统的快速电压稳定性。

3) 网络动态重构的作用是改变所有负荷节点的等效供电距离,而分布式设备接入能够有效减小系统等效负荷。网络动态重构技术和分布式电源合理接入能够减小系统电压的波动性,很大程度上提高系统电压的平稳程度。

4) 本文所提的双层优化调度方法兼顾了配电网的电压稳定性和运行调度的经济性,综合考虑了配电网动态网络结构和DG、CB、SVC等分布式设备的接入方案,获得了最优的经济调度方案。本文所提方法对从事配电规划和调度的工作人员具有一定的现实意义。

参考文献

- [1] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [2] 徐意婷, 艾芊. 含微电网的主动配电网协调优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11):18-26.
XU Yiting, AI Qian. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with microgrids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 18-26.
- [3] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 计及电动汽车充电模式的主动配电网多目标优化重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 1-9.
ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Multi-objective optimization of active distribution network reconfiguration considering electric vehicle charging mode[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 1-9.
- [4] SAMUI A, SAMANTARAY S R, PANDA G. Distribution system planning considering reliable feeder routing[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(6): 503-514.
- [5] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [6] ASAKURA T, GENJI T, YURA T, et al. Long-term distribution network expansion planning by network reconfiguration and generation of construction plans[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1196-1204.
- [7] PARK J Y, SOHN J M, PARK J K. Optimal capacitor allocation in a distribution system considering operation costs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 462-468.
- [8] 苏海锋, 胡梦锦, 梁志瑞. 基于时序特性含储能装置的分布式电源规划[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 56-63.
SU Haifeng, HU Mengjin, LIANG Zhirui. Distributed generation & energy storage planning based on timing characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 56-63.
- [9] KUMAR D, SAMANTARAY S R, JOOS G. A reliability assessment based graph theoretical approach for feeder routing in power distribution networks including distributed generations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 57: 11-30.
- [10] 徐迅, 陈楷, 龙禹, 等. 考虑环境成本和时序特性的微电网多类型分布式电源选址定容规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 914-921.
XU Xun, CHEN Kai, LONG Yu, et al. Optimal site selection and capacity determination of multi-types of distributed generation in microgrid considering environment cost and timing characteristics[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 914-921.
- [11] 廖剑波, 李振坤, 符杨. "源-网-荷"相协调的主动配电网经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 69-75.
LIAO Jianbo, LI Zhenkun, FU Yang. Economic scheduling of active distribution network considering the coordination of resources, network and loads[J]. Proceedings of the

- CSU-EPSA, 2018, 30(1): 69-75.
- [12] 王松, 李庚银, 周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2714-2720.
WANG Song, LI Gengyin, ZHOU Ming. The reactive power adjusting mechanism & control strategy of doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2714-2720.
- [13] 陈丽, 张晋国, 苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 120-127.
CHEN Li, ZHANG Jinguo, SU Haifeng. Reactive power planning for distribution system considering time-sequence characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 120-127.
- [14] 谢仕炜, 胡志坚, 王珏莹, 等. 基于不确定随机网络理论的主动配电网多目标规划模型及其求解方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1038-1053.
XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying, et al. A multi-objective planning model of active distribution network based on uncertain random network theory and its solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1038-1053.
- [15] 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.
- [16] LI Yang, FENG Bo, LI Guoqing, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution networks considering integration of energy storage[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1073-1081.
- [17] GONG D, XU B, ZHANG Y, et al. A similarity-based cooperative co-evolutionary algorithm for dynamic interval multi-objective optimization problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2020, 24(1): 142-156.
- [18] 王建学, 王锡凡, 陈皓勇, 等. 基于协同进化法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 128-133.
WANG Jianxue, WANG Xifan, CHEN Haoyong, et al. Reactive power optimization based on cooperative coevolutionary approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 128-133.
- [19] 瞿合祚, 李晓明, 杨玲君, 等. 考虑负荷和分布式电源时变性的配电网多目标动态重构和 DG 调度[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 873-881.
QU Hezuo, LI Xiaoming, YANG Lingjun, et al. Multi-objective distribution network dynamic reconfiguration and DG control considering time variation of load and DG[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 873-881.
- [20] 李振坤, 陈星莺, 赵波, 等. 配电网动态重构的多代理协调优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 72-79.
LI Zhenkun, CHEN Xingying, ZHAO Bo, et al. Dynamic reconfiguration of the distribution network based on multi-agent systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 72-79.
- [21] 刘思聪, 周步祥, 彭章刚, 等. 含分布式电源及电动汽车的多代理配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(10): 91-97.
LIU Sicong, ZHOU Buxiang, PENG Zhanggang, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations and electric vehicles using multi-agent[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(10): 91-97.
- [22] 周慧芝, 唐飞, 刘涤尘, 等. 考虑负荷时变性的主动配电网动态重构和 DG 动态调控策略[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2423-2429.
ZHOU Huizhi, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Active distribution network dynamic reconfiguration and DG dynamic control strategy considering time-variant load[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2423-2429.
- [23] 高红均, 刘俊勇. 考虑不同类型 DG 和负荷建模的主动配电网协同规划[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4911-4922.
GAO Hongjun, LIU Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4911-4922.
- [24] MUSIRIN I, RAHMAN T K A. Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system[C] // Conference on Research & Development, July 17-17, 2002, Shah Alam, Malaysia.
- [25] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.
MA Xiufan, DING Ning, LI Long. Judging radial and connectivity of network in distribution networks reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 289-293.
- [26] 张王朝, 顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2741-2746.
ZHANG Wencho, GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2741-2746.

收稿日期: 2019-11-28; 修回日期: 2019-12-19

作者简介:

倪识远(1992—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网规划; E-mail: ni_shiyuan@163.com

张林焱(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网规划。E-mail: 13859086609@139.com

(编辑 魏小丽)