

考虑电网扩容的配电自动化系统规划

朱传谱¹, 李 聪¹, 宋丽珠¹, 吴清玉¹, 刘柏罕²

(1. 海南电网有限责任公司电力调度控制中心, 海口 570203; 2. 怀化学院电气与信息工程学院, 湖南 怀化 418099)

摘要: 配电自动化系统建设与电网扩容需要巨额投资, 往往不可能在短时间内完全到位, 因此电网公司应对其制定长期规划。配电自动化系统规划与电网扩容规划之间存在耦合关系, 为了处理这一复杂的规划问题, 该文提出一种新的综合规划方法。首先, 考虑配电系统的主要软硬件基础设施, 建立混合整数非线性规划(MINLP)模型。规划模型的目标函数是在规划时间范围内最大化电网公司的利润。然后, 利用遗传算法求解考虑电网扩容后的配电自动化系统规划问题, 确定电网扩容以及自动化系统建设的最佳方案和时间进度。在24节点系统上对提出的方法进行测试, 并对比先进行电网扩容规划再进行配电自动化系统规划的方法, 所提出的方法可在少量减少收入的情况下大幅提高电网公司的利润。

关键词: 配电自动化规划; 电网扩容; 遗传算法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.002

中图分类号: TM933

文章编号: 1673-9140(2021)06-0011-09

Distribution automation system planning considering grid capacity expansion

ZHU Chuanpu¹, LI Cong¹, SONG Lizhu¹, WU Qingyu¹, LIU Bohan²

(1. Power Dispatching and Control Center of Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570203, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Huaihua University, Huaihua 418099, China)

Abstract: The huge investment is required in the construction of the distribution automation system and the grid capacity expansion, however, it is often impossible to complete it in a short time. Hence the grid company should make long-term plans for the development of distribution system. As there is a coupling relationship between distribution automation system planning and grid capacity expansion planning, this paper proposes a new comprehensive planning method to deal with this complex planning problem. Firstly, a mixed integer nonlinear programming (MINLP) model is established with the consideration of the dominant software and hardware infrastructure of distribution system. The objective function of the planning model is to maximize the profits of power grid companies within the planning time range. Then the genetic algorithm is utilized to solve the planning problem of distribution automation system considering grid capacity expansion, which can obtain the best scheme and schedule capacity expansion and construction. The proposed method is tested according to a 24-bus system. The performance of the proposed method is compared with another method, which carries out the capacity expansion planning first and then carries out the distribution automation system planning. The results show that the proposed method can greatly improve the profits of power grid companies with a small amount of revenue reduction.

Key words: distribution automation system planning; grid capacity expansion; genetic algorithm

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-03-31

基金项目: 生态农业智能控制技术湖南省重点实验室资助(5366-00010303)

通信作者: 朱传谱(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事配电自动化研究; E-mail: 907397737@qq.com

配电自动化系统(distribution automation system, DAS)由多个硬件(开关、保护装置、传感器及测量装置等)和软件基础结构组成^[1],电网公司通过配电自动化系统可从远程位置实时监控,协调和操作配电组件以及控制和通信系统^[2]。实现配电自动化是智能配电网的战略目标之一,而完成配电自动化系统建设需要远超电网公司年度预算的投资。因此,电力规划部门需对配电自动化项目进行长期规划。

由于在配电自动化系统规划的时间跨度内电网负荷不断增长,故在此期间还应通过建设新的线路和变电站或者加强现有设施来扩展电网容量^[3]。在这方面,电网公司还需制定电网容量扩展(grid capacity expansion, GCX)规划。由于自动化现场设备安装在线路上或变电站中,因此,有必要考虑预先制定的电网容量扩展规划,以决定配电自动化系统规划中自动化设备的安装时间和位置^[4]。电网容量扩展规划通常由常规方法制定,未充分考虑配电网中可使用的新技术。但是研究结果表明,在电网容量扩展规划中考虑使用新技术可获得较高的经济性,并且与智能电网的战略目标更加兼容^[5-7]。因此,配电自动化系统规划和电网容量扩展规划之间存在相互影响,这使制定这2个规划的过程变得复杂^[8-10]。

关于配电自动化系统规划,学者提出了一些用于布置某些配电自动化设备的方法,例如:自动化开关^[11]、故障指示器^[12]、远程终端单元^[13]。文献^[14]提出了一种用于断路器、远程开关及手动开关放置的优化算法;文献^[15]通过建立成本最小化模型对汽车充电桩等设备进行了综合规划。以上分析仅考虑一种或两种类型的配电自动化设备,并未对整个配电自动化系统进行规划。配电自动化系统庞大而复杂,由多类型设备及子系统组成。单独规划系统中每个设备或基础设施,然后将单独的研究集成并不能得到最优的系统规划。因此,整个配电自动化系统的主要设备和基础设施都应该进行同步规划^[16]。

目前,配电自动化系统规划的大多数研究都未考虑电网扩容带来的影响^[17-20],因此,该文提出一种考虑电网扩容的自动化系统综合规划方法。该方法

可确定电网扩容时变电站、线路建设的最佳时间和地点,同时能够规划配电自动化系统的主要设备,包括:不同的开关装置,如断路器(circuit breaker, CB)、重合闸(reclosing switch, RS)、负载分断(load breaker, LB)以及隔离开关(disconnect switch, DS);保护装置(如熔断器)、传感器、通信系统、处理器和配有网络监控硬件和软件的中央控制系统(central control system, CCS)。

1 综合规划问题

在制定综合规划前,假设已进行诸如负荷预测之类的早期研究。基于负荷预测已确定变电站和线路建设的候选位置和路线;现有和将来的配电设备在其自动化准备水平方面可分为3种类型:自动化不可行(automation infeasible devices, AID)、自动化准备(automation prepared devices, APD)、自动化就绪设备(automation ready devices, ARD);传感器具有2个自动化级别:远程监控(remotely monitor, RM)和可以升级到远程监控的本地指示(local indication, LI)。

考虑以下指标来制定综合规划:线路的建设路径、容量、类型和时间;建造变电站的位置、容量和时间;安装开关和保护装置及传感器的位置、类型、自动化程度和时间;安装远程终端单元(remote terminal unit, RTU)和提供通信网络的位置和时间,如果决定在某个位置安装ARD终端或故障通道指示器(fault passage indicator, FPI),则将在相应的变电站放置远程终端单元,并为该变电站提供可与相邻变电站进行的短距离通信(第1类);是否建立中央控制系统(CCS)及建立时间,如果决定建立CCS,则所有具有RTU的变电站都将配备能够与CCS进行的远程通信(第2类)。

在综合规划中,用于自动化终端设备安装的候选位置如下:开关和保护装置安装在每条线路的开头(head)和结尾(end)处;传感器安装在每条线路的开头处;远程终端单元和通信网络安装在每个变电站中。

为了提高电网建设的经济性,将按以下要求进行自动化设备配置:如果在规划中某位置存在设备,

但该设备没有进行任何活动,则该设备将被拆除并存储;如果某个位置没有设备,并且已计划安装某些设备,则执行该计划;如果某个位置的计划设备与现有设备不同,则将现有设备存储,并安装建议的设备;如果需要采购设备,则首先检查并使用库存,无库存再进行采购。

1.1 目标函数

将综合规划表述为混合整数非线性规划(mixed-integer nonlinear programming, MINLP)问题。MINLP 问题的决策变量为 $x_{ss,j,t}$ 、 $x_{l,j}$ 、 $x_{sw,j}$ 、 $x_{pt,j}$ 、 $x_{sn,j}$ 、 x_{ccs} 。

$x_{ss,j,t} = s$ 表示计划在第 t 年用容量为 s 类型的变压器扩展变电站 j , $x_{ss,j,t} = 0$ 表示在第 t 年不用变压器对变电站 j 进行容量扩展, $0 \leq x_{ss,j,t} \leq N_{sstype}$, N_{sstype} 表示容量为 s 类型的变电站数量。

$x_{l,j} \neq 0$ 表示计划在路径 j 上建设一条线路, $x_{l,j} = (t-1)N_{ltype} + s$ 表示计划在第 t 年建设一条容量为 s 类型的线路, $0 \leq x_{l,j} \leq N_{ltype}T$, N_{ltype} 为某类容量线路的数量, T 为规划的时间范围。

$x_{*,j} \neq 0$ 表示计划将某类设备安装在位置 j , 包括开关、保护、传感器设备。 $x_j^* = (t-1) \cdot N_{*type}N_{*aut} + (s-1)N_{*aut} + a$ 表示计划第 t 年在位置 j 配置一台自动化级别为 a 、容量为 s 类型的设备。 $0 \leq x_{*,j} \leq N_{*type}N_{*aut}T$, N_{*type} 为开关设备、保护设备、传感器的数量, N_{*aut} 为某类自动化程度的开关、保护、传感器设备的数量。

$x_{ccs} = t$ 表示在第 t 年建立 CCS。RTU 的决策变量为 $x_{rtu,j}$, 通信系统决策变量为 $x_{cmm,j}$, $0 \leq x_{rtu,j} \leq T$, $0 \leq x_{cmm,j} \leq N_{cmmtype}T$ 。 $N_{cmmtype}$ 为通信系统的类型数量。

综合规划的目标函数是电网公司可获得的净利润:

$$P = R - (C_{Inv} + C_{Opr} + C_{Mnt} + C_{Int}) \quad (1)$$

式中 R 为电网公司在规划时间范围内获得的总收入; C_{Inv} 为综合规划总投资额; C_{Opr} 为系统运营成本, C_{Mnt} 为系统维护成本, C_{Int} 为系统中断成本。

$$R = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+0.5r)^{2t+1}} \cdot E(t) \cdot C \quad (2)$$

式中 r 为投资年利率; C 为电价, 元/(kW·h); $E(t)$ 为每年的售出电能, kW·h。

$$E(t) = \sum_{j=1}^{N_{lb}} P_{D,j}(t) \cdot L_{F,j} \cdot (8760 - U_j(t)) \quad (3)$$

式中 $P_{D,j}(t)$ 为负荷点 j 在第 t 年的预测需求峰值, kW; $L_{F,j}$ 为负荷点 j 的荷载系数; $U_j(t)$ 为负荷点 j 在第 t 年的平均停电时间, h; N_{lb} 为负载点的数量。

综合规划总投资额包括电网扩容投资成本 $C_{Inv,GCX}$ 以及配电自动化投资成本 $C_{Inv,DAS}$:

$$C_{Inv} = C_{Inv,GCX} + C_{Inv,DAS} \quad (4)$$

电网扩容的投资成本包括变电站建设、对一些现有线路进行改造和建设新线路的投资总和, 即

$$C_{Inv,GCX} = \sum_{j=1}^{N_{ss}} \sum_{t=1}^T \frac{\bar{x}_{ss,j,t}}{(1+r)^{t-1}} \cdot I_{ss}(s) + \sum_{j=1}^{N_{l,e}} \frac{\bar{x}_{l,j}}{(1+r)^{t-1}} \cdot [s, s_{l,j,0}] \cdot L_j \cdot I_l(s, s_{l,j,0}) + \sum_{j=1}^{N_{l,f}} \frac{\bar{x}_{l,j}}{(1+r)^{t-1}} \cdot L_j \cdot I_l(s) \quad (5)$$

式中 $I_{ss}(s)$ 为容量为 s 类型的变电站的投资成本, 元; L_j 为线路 j 的长度, km; $I_l(s, s_{l,j,0})$ 为将类型为 $s_{l,j,0}$ 的线路替换为容量为 s 类型的线路成本, 元/km; $I_l(s)$ 为容量为 s 类型的线路建设投资成本, 元/km; N_{ss} 为现有变电站和未来变电站数量之和; $N_{l,e}$ 为现有线路数; $N_{l,f}$ 为未来线路数。

配电自动化系统规划所需的投资额为

$$C_{Inv,DAS} = \frac{\bar{x}_{ccs}}{(1+r)^{t-1}} \cdot I_{ccs} + \sum_{j=1}^{2N_{line}} \frac{\bar{x}_{sw,j}}{(1+r)^{t-1}} \cdot I_{sw}(s, a, p) + \sum_{j=1}^{2N_{line}} \frac{\bar{x}_{pt,j}}{(1+r)^{t-1}} \cdot I_{pt}(s, a, p) + \sum_{j=1}^{N_{line}} \frac{\bar{x}_{sn,j}}{(1+r)^{t-1}} \cdot I_{sn}(s, a, p) + \sum_{j=1}^{N_{lb}} \frac{\bar{x}_{rtu,j}}{(1+r)^{t-1}} \cdot I_{rtu} + \sum_{j=1}^{N_{lb}} \frac{\bar{x}_{cmm,j}}{(1+r)^{t-1}} \cdot I_{cmm}(s) \quad (6)$$

式中 $I_*(s, a, p)$ 为根据采购方法 p 且自动化级别为 a 、容量为 s 类型的设备投资成本, 元; $I_{cmm}(s)$ 为容量为 s 类型的通信系统投资成本, 元; I_{rtu} 为远程终端单元投资成本; N_{line} 为现有线路和未来线路的数量之和。

规划时间范围内系统的运营成本为

$$C_{\text{Opr}} =$$

$$\sum_{j=1}^{N_{\text{line}}} \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{(1+0.5r)^{2t+1}} \cdot (8760L_f) \cdot P_{1,j}(t) \cdot C_{\text{loss}} \right) + \sum_{j=1}^{N_{\text{ss}}} \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+0.5r)^{2t+1}} \cdot (8760S_{\text{smax},j}(t) \cdot O_{\text{ss}}) \quad (7)$$

式中 L_f 为线路损耗因数; $P_{1,j}(t)$ 为线路 j 在第 t 年的有功功率损耗, kW; C_{loss} 为单位能耗成本, 元/(kW·h); $S_{\text{smax},j}(t)$ 为变电站 j 在第 t 年的容量, kV·A; O_{ss} 为变电站每年运行成本, 元/(kV·A)。

规划时间范围内系统的维护成本为

$$C_{\text{Mnt}} = C_{\text{Mnt},\text{GCX}} + C_{\text{Mnt},\text{DAS}} \quad (8)$$

$$C_{\text{Mnt},\text{GCX}} = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+0.5r)^{2t+1}} \cdot \left(\sum_{j=1}^{N_{\text{ss}}} M_{\text{ss}} \cdot S_{\text{smax},j}(t) + \sum_{j=1}^{N_{\text{lc}}} \left((1 - \bar{x}_{1,j}) \cdot L_j \cdot M_1(s_{1,j,0}) + \bar{x}_{1,j} \cdot (1 - [\tau, t]) \cdot L_j \cdot M_1(s_{1,j,0}) \right) + \sum_{j=1}^{N_{\text{line}}} x_{1,j} \cdot [\tau, t] \cdot L_j \cdot M_1(s) \right) \quad (9)$$

$$C_{\text{Mnt},\text{DAS}} = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+0.5r)^{2t+1}} \cdot \left(\bar{x}_{\text{ccs}}[\tau, t] M_{\text{ccs}} + \sum_{j=1}^{2N_{\text{line}}} \bar{x}_{\text{sw},j}[\tau, t] M_{\text{sw}}(s, a) + \sum_{j=1}^{2N_{\text{line}}} \bar{x}_{\text{pt},j}[\tau, t] M_{\text{pt}}(s, a) + \sum_{j=1}^{N_{\text{line}}} \bar{x}_{\text{sn},j}[\tau, t] M_{\text{sn}}(s, a) + \sum_{j=1}^{N_{\text{lb}}} \bar{x}_{\text{rtu},j}[\tau, t] M_{\text{rtu}} + \sum_{j=1}^{N_{\text{lb}}} \bar{x}_{\text{cmm},j}[\tau, t] M_{\text{cmm}}(s) \right) \quad (10)$$

其中, M_{ss} 为容量为 s 类型的变电站年维护费用, 元; $M_1(s)$ 为容量为 s 类型的线路的年维护费用, 元/km; M_{ccs} 为中央控制系统年维护费用, 元; $M_*(s, a)$ 为自动化级别为 a 、容量为 s 类型的设备年维护费用, 元; M_{rtu} 为远程终端单元年维护费用, 元。

中断成本为

$$C_{\text{Int}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{lb}}} \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+0.5r)^{2t+1}} \cdot (V_{\text{VOLL},j} \cdot E_{\text{EENS},j}(t)) \quad (11)$$

式中 $V_{\text{VOLL},j}$ 为负荷点 j 处损失的负荷价值, 元/(kW·h); $E_{\text{EENS},j}(t)$ 为第 t 年没有为负荷点 j 提供的电能, kW·h。

在式(5)~(10)中, 如果 $x > 0$, 则函数 \bar{x} 返回 1, 否则返回 0。如果 $a \geq b$, 则函数 $[a, b]$ 返回 1, 否则返回 0。在式(6)中, 参数 p 为设备采购方法: 使用现存设备则无成本; 更新现存设备, 则成本为更新费用; 使用库存设备, 则成本为运输及安装费用; 使用库存设备且需升级, 则成本为运输及安装费用外加升级费用; 使用新购买设备, 则成本为购买及安装费用。

1.2 规划约束

所提出的规划约束主要包括技术、电网标准、工程、预算约束 4 类。

1) 技术约束。

$$\begin{cases} C_{\text{ontin}} = 1 \\ C_{\text{outline}} = C_{\text{outlb}} = 1 \\ C_{\text{onvpf}} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

其中, C_{ontin} 为负载点连接约束变量, $C_{\text{ontin}} = 1$ 表示所有负载点通过馈线连接到电网, $C_{\text{ontin}} = 0$ 时负载点为孤岛节点; 假设电网为放射状, 则要求线路数 C_{outline} 等于负载节点数 C_{outlb} ; C_{onvpf} 为潮流计算约束变量, 如果在任何节点上都计算收敛, 则二进制变量 $C_{\text{onvpf}} = 1$, 如果潮流计算因有功或无功不匹配而不收敛, 则 $C_{\text{onvpf}} = 0$ 。

分别对变电站、线路的容量进行约束, 即

$$\begin{cases} P_{\text{ss},j}^2(t) + Q_{\text{ss},j}^2(t) \leq S_{\text{smax},j}^2(t) \\ P_{1,j}^2(t) + Q_{1,j}^2(t) \leq S_{\text{lmax},j}^2(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中 $P_{\text{ss},j}(t)$ 为变电站 j 在第 t 年提供的有功功率, kW; $Q_{\text{ss},j}(t)$ 为变电站 j 在第 t 年提供的无功功率, kVar; $S_{\text{lmax},j}(t)$ 为线路 j 在第 t 年的最大负荷, kV·A; $S_{\text{smax},j}(t)$ 为变电站 j 在第 t 年的容量, kV·A; $P_{1,j}(t)$ 为第 t 年时线路 j 的有功潮流, kW; $Q_{1,j}(t)$ 为第 t 年时线路 j 的无功潮流, kVar。

节点电压的约束为

$$(1 - \delta_V) V_n \leq V_j(t) \leq (1 + \delta_V) V_n \quad (14)$$

式中 δ_V 为最大允许电压变化, kV; V_n 为电网的额定电压, kV; $V_j(t)$ 为负荷点 j 在 t 年的电压, kV。

确保系统相关指标满足阈值的约束为

$$\begin{cases} S_{\text{AIDI}}(t) \leq S_{\text{AIDth}} \\ A_{\text{ENS}}(t) \leq A_{\text{ENStH}} \end{cases} \quad (15)$$

式中 $S_{AIDI}(t)$ 为第 t 年系统停电时间指数, h/客户; $A_{ENS}(t)$ 为第 t 年未供应的电能, kW·h/客户; S_{AIDth} 为系统停电时间指数阈值, h/客户; A_{ENStth} 为未供应的电能阈值, kW·h/客户。

根据国内电网标准, 必须在每个中压馈线的头部安装断路器以及中压馈线应通过开关设备(CB、RS、LB 或 DS)连接至母线上, 因此需满足约束:

$$(t-1)N_{swtype}N_{swaut} \leq x_{sw,j} \leq (t-1)N_{swtype}N_{swaut} + N_{swaut} \quad (16)$$

$$0 < x_{sw,j} \leq N_{swtype}N_{swaut}T \quad (17)$$

工程约束检查规划的可行性, 即

$$\sum_t \bar{x}_{ss,j,t} \leq N_{Expan,j} \quad (18)$$

式中 $N_{Expan,j}$ 为可以添加到变电站 j 的变压器数量, 其数量需大于或等于未来变电站的数量。

对于计划在线路上安装的设备, 计划时间不能早于该线路的建设时间, 需满足约束:

$$\tau \geq \tau_{line,j} \quad (19)$$

式中 $\tau_{line,j}$ 为线路 j 的建设时间。

电网规划还需满足预算约束:

$$B(\tau) \leq B_{th}(\tau) \quad (20)$$

式中 $B(\tau)$ 为第 τ 年年度预算; $B_{th}(\tau)$ 为第 τ 年年度预算上限。

$$B(\tau) = B_{GCX}(\tau) + B_{DAS}(\tau) \quad (21)$$

$$B_{GCX}(\tau) =$$

$$\sum_{j=1}^{N_{ss}} \bar{x}_{ss,j,\tau} I_{ss}(s) + \sum_{j=1}^{N_{l,f}} \bar{x}_{l,j} < \tau, t > \cdot L_j \cdot I_l(s) + \sum_{j=1}^{N_{l,e}} \bar{x}_{l,j} < \tau, t > \cdot [s, s_{1,j,0}] \cdot L_j \cdot I_l(s, s_{1,j,0}) \quad (22)$$

$$B_{DAS}(\tau) =$$

$$\bar{x}_{ccs,j} < \tau, t > I_{ccs}(s) + \sum_{j=1}^{2N_{line}} \bar{x}_{sw,j} < \tau, t > I_{sw}(s, a, p) + \sum_{j=1}^{2N_{line}} \bar{x}_{pt,j} < \tau, t > I_{pt}(s, a, p) + \sum_{j=1}^{N_{line}} \bar{x}_{sn,j} < \tau, t > I_{sn}(s, a, p) + \sum_{j=1}^{N_{lb}} \bar{x}_{rtu,j} < \tau, t > I_{rtu}(s) + \sum_{j=1}^{N_{lb}} \bar{x}_{cmm,j} < \tau, t > I_{cmm}(s) \quad (23)$$

在约束式中, 如果 $t = \tau$, 则函数 $< \tau, t >$ 返回 1, 否则返回 0。

2 基于遗传算法求解综合规划问题

该文采用基于遗传算法的方法来求解综合规划问题, 如图 1 所示。建立配电自动化系统和电网扩容的 2 种遗传算法 DAS-GA、GCX-GA, 根据式 (1)~(11), 2 种算法可独立进行各自目标函数的求解。由于配电自动化系统和电网扩容 2 种规划存在耦合关系, 该文首先将这 2 种遗传算法并行运行, 然后结合形成一个算法, 最后进行分解, 循环多次, 以获得较单一规划更优的解。

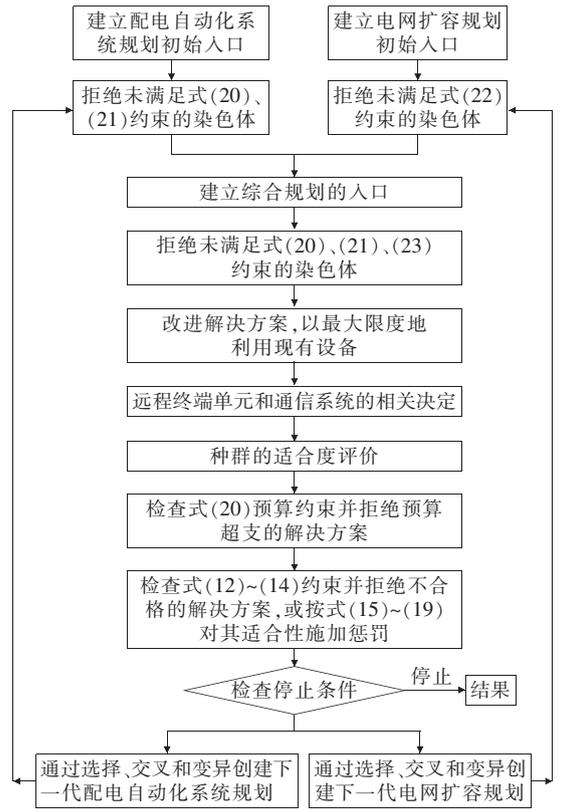


图 1 遗传算法流程

Figure 1 Genetic algorithm flowchart

首先为每一个算法创建初始种群。在电网扩容规划遗传算法中, 决策变量为 $x_{l,j}$ 、 $x_{ss,j}$, 因此, 每条染色体中的基因数等于 $N_{line} + N_{ss}$, 染色体结构如表 1 所示。

表 1 电网扩容规划染色体结构

Table 1 Chromosome structure of network capacity expansion planning

配电线路				变电站			
1	2	...	N_{line}	1	2	...	N_{ss}
$x_{l,1}$	$x_{l,2}$	...	$x_{l,N_{line}}$	$x_{ss,1}$	$x_{ss,2}$	...	$x_{ss,N_{ss}}$

另一方面,在配电网自动化系统规划遗传算法中,决策变量为 $x_{sw,j}$ 、 $x_{pt,j}$ 、 $x_{sn,j}$ 、 x_{ccs} 。由于在任何候选位置(中压线路的头部或末端)只能安装一个开关器件或熔断器,因此,通过编码方法将变量 $x_{sw,j}$ 、 $x_{pt,j}$ 组合为一个变量 $x_{sp,j}$,以减小染色体的基因数目,从而提高算法的效率。

因此,每条染色体上的基因数目为 $3N_{line} + 1$ 个,其中, $2N_{line}$ 个基因决定每条线路开关/熔断器的安装, N_{line} 个基因决定每条线路故障指示器的安装, 1 个基因决定中央控制系统。配电网自动化系统规划遗传算法的染色体结构如表 2 所示。

表 2 配电网自动化系统规划染色体结构

Table 2 Chromosome structure of distribution automation system planning

开关器件/熔断器线路				故障指示器线路				中央控制系统
1	2	...	N_{line}	1	2	...	N_{line}	
$x_{sp,1}$	$x_{sp,2}$	...	$x_{sp,N_{line}}$	$x_{sn,1}$	$x_{sn,2}$	...	$x_{sn,N_{line}}$	x_{ccs}

首先,在对种群进行初始过滤后,将 2 种算法的染色体相结合,生成综合规划问题的种群(潜在解集);检查种群的染色体是否满足约束条件,不满足约束的种群被一代又一代地拒绝。然后,对可行方案进行修改,以使现有电网资产在制定的规划中以最优的方式使用,再对远程终端单元和通信网络进行决策。通过潮流计算和可靠性评估^[16]进行适应度评价,并根据式(1)~(11)计算每个解的目标函数值,再检查预算约束。如果方案所需的投资超过预算,则该方案将被拒绝,染色体被丢弃。违反约束式(12)则拒绝解决方案;违反约束式(13)~(15)则对目标函数增加代价。最后,用目标函数的改善百分率和种群世代数量 2 个标准来检验算法的收敛性。如果这些条件都不满足,则 2 个算法解耦,通过选择、交叉和变异产生 2 种算法的下一代染色体。

3 案例分析

使用全局优化工具箱在 Matlab 中求解所提出的综合规划问题,在 24 节点配电网对所研究的综合规划进行测试,如图 2 所示,该配电网为 10 kV 配

电系统,由 2 个 20 MV·A、35 kV/10 kV 变电站供电,并展示了未来线路和变电站建设的可行路线和地点。在该配网中,现有开关、保护和自动化设备的位置和类型如表 3 所示,经济分析数据如表 4~5 所示,负载点数据如表 6 所示。由于篇幅所限,案例分析所需的其他数据以及计算中断成本所需数据都参见文献[16]。

通过 2 种案例对配电网(图 2)进行配电自动化系统规划和电网扩容规划,并对不同案例的规划结果进行分析,从而评估所提出的综合规划方法的实际性能。2 种案例为①首先进行电网扩容规划,再进行配电自动化系统规划;②使用该文提出的方法对配电自动化系统和电网扩容进行综合规划。

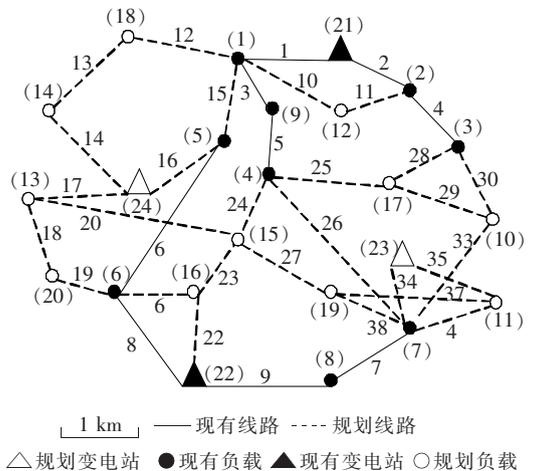


图 2 配电网测试案例拓扑

Figure 2 Topology of studied distribution network

表 3 现有设备的类型及安装位置

Table 3 Location and type of existing devices

设备	位置
CB	$1_{head}(ARD)$, $2_{head}(ARD)$, $8_{head}(ARD)$, $9_{head}(ARD)$
DS	$3_{end}(APD)$, $5_{head}(AID)$, $7_{head}(AID)$, $9_{end}(AID)$
Fuse	3_{head} , 4_{head}
FPI	$5_{head}(LI)$

表 4 导线数据

Table 4 Data of conductors

类型	电阻/ (Ω/km)	电抗/ (Ω/km)	额定功率/ (MV·A)	额定电 压/kV
架空线	0.342	0.387	5.2	10
电缆	0.202	0.204	8.1	10

表 5 设备数据

Table 5 Data of equipment 万元

设备	类型	成本	设备	类型	成本
CCS	监控	210.0	CB	ARD	28.0
	监控和控制	350.0		APD	16.8
	自动运行	630.0		AID	14.0
RS	ARD	24.5	APD-ARD	10.5	
	APD	15.4	ARD	13.3	
	AID	13.3	LB	APD	10.5
	APD-ARD	10.5	AID	7.0	
SA	ARD	9.8	APD-ARD	4.9	
	APD	7.7	ARD	8.4	
	AID	5.6	APD	6.3	
	APD-ARD	3.5	DS	AID	4.2
Fuse	—	1.4	RTU	—	14.0
FPI	RM	5.6	Type2	14.0	
	LI	4.2	Cmm	Type1	10.5
	LI-RM	2.8	Type2-1	8.4	

表 6 负载点相关数据

Table 6 Data related to the load points

节点	$P_{D,j(t)}/MW$						N_{estmrj}	V_{VOLLj}
	$t=0$	$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=4$	$t=5$		
1	2.54	2.59	2.63	2.7	2.73	2.74	17	38.0
2	0.50	0.60	0.62	0.63	0.67	0.71	25	24.5
3	1.66	1.75	1.83	1.88	1.96	2.04	20	24.1
4	0.29	0.30	0.32	0.24	0.29	0.29	40	27.8
5	0.18	0.22	0.24	0.26	0.23	0.27	10	24.5
6	0.75	0.90	0.92	0.92	0.95	0.98	23	29.9
7	2.87	2.16	2.37	2.38	2.84	2.85	33	24.5
8	0.46	0.47	0.51	0.56	0.56	0.59	20	24.5
9	0.80	0.88	0.93	0.95	0.96	1.03	3	30.0
10	0.00	1.19	1.30	1.43	1.63	1.65	21	24.5
11	0.00	1.17	1.25	1.34	1.44	1.67	9	17.5
12	0.00	0.00	0.62	0.65	0.69	0.79	19	17.5
13	0.00	0.00	0.78	0.81	0.83	0.88	24	17.5
14	0.00	0.00	0.00	2.14	2.15	2.15	12	24.8
15	0.00	0.00	0.00	1.13	1.13	1.13	4	20.1
16	0.00	0.00	0.00	1.51	1.54	1.6	14	29.9
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.74	16	20.1
18	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32	1.39	34	21.6
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.09	26	29.9
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.65	22	24.5

3.1 案例 1

首先基于遗传算法进行电网扩容规划,然后在电网扩容规划基础上进行配电自动化系统规划。为测试网络制定的 5 年扩展计划如表 7 所示,自动化系统每年规划方案如表 8 所示。

表 7 5 年电网容量扩展规划

Table 7 Five-year capacity expansion plan of the network

t/a	设施	动作
1	变电站	增添 20 MV · A(23)
	线路	增添(32,35)Type1
2	线路	移除 3,增添(11,19,26)Type1
3	线路	增添(12,21,23)Type1,(1)Type2
4	变电站	增添 20 MV · A(24)
	线路	移除 6,增添(14,16,25)Type1
5	线路	增添(17,37)Type1

表 8 配电网自动化系统规划

Table 8 Distribution automation system planning

t/a	动作	
	安装	移除
1	CB _{ARD@32head} (n), CB _{ARD@35head} (n)	DS _{AID@5head} DS _{AID@9end}
2	CB _{ARD@26head} (n), DS _{ARD@3end} (u), RTU@9(n), Cmm ₂ @9(n)	Fuse@3head FPI _{LI} @5head
3	CCS _{monitor&control} , Cmm ₁ @9(u)	—
4	CB _{ARD@14head} (n), CB _{ARD@16head} (n), Fuse@21head(w), DS _{AID@6head} (w), DS _{AID@25head} (w)	—
5	CB _{ARD@17head} (n), DS _{ARD@37head} (n), RTU@11(n), Cmm@11(n), FPI _{RM} @37head(w&u)	—

注:n、e、u、w 分别表示新建、现存、升级、库存

3.2 案例 2

用该文提出的方法开发的 5 年期配电自动化系统和电网扩容综合规划如表 9 所示,结果表明,案例 2 所开发的规划方案与案例 1 中得到的组合方案不同,这 2 种方案最大的区别在于变电站的建设方面。在案例 1 中,计划向电网增加 2 座变电站,共计 40 MV · A,而在案例 2 中,只计划向电网增加 1 座 20 MV · A 变电站。此外,在 2 个案例中,都计划建立具有网络远程监测和控制能力的中央控制系统。案例 1、2 相关的成本、收入和利润如表 10 所示。

表 9 综合规划

Table 9 Comprehensive planning

t/a	设施	动作
1	变电站	添加 20 MV · A@ (23)
	线路	添加 Type1@32, 35
	自动化系统	安装 CBARD@32 _{head} (n), CBARD@35 _{head} (n) 移除 DSAID@5 _{head} , DSAID@9 _{end}
2	线路	添加 Type1@(11,19,26), 移除 3
	自动化系统	安装 CBARD@26 _{head} (n), DSAID@19 _{head} (w) 移除 Fuse@3 _{head} , FPI _{L1} @5 _{head}
3	线路	添加 Type2@1, Type1@(12,21,23)
	自动化系统	安装 DSARD@3 _{end} (u), RTU@(9)(n), Cmm ₂ @(9)(n), Fuse@12 _{head} (w)
4	线路	添加 Type1@(13,25)
	自动化系统	安装 CCS _{monitor&control} , Cmm ₁ @(9)(u), FPIRM@25 _{head} (u&w), DSARD@25 _{head} (n), RTU@(4)(n), Cmm ₁ @(4)(n)
5	线路	添加 Type1@(18,37)
	自动化系统	安装 DSAID@37 _{head} (w), DSAPD@6 _{head} (n)

表 10 2 个案例的成本、收入及利润

Table 10 Cost, revenue and profit of

the two cases 万元

案例	成本			
	投资	运营	维护	中断
1	1 515.250 1	138.210 1	116.386 2	120.886 5
2	1 127.924 0	142.076 2	88.824 4	125.863 5
案例	收入		利润	
1	2 233.360 5		342.627 6	
2	2 098.797 4		618.309 3	

结合表 10 的结果可知,在案例 1 中,投资和运维成本较高,这主要是因为规划的电网容量较大;另一方面,损耗较低使得案例 1 的运营成本较低;此外,案例 1 中断成本略低,是由于线路较短,变电站数量多,中断概率下降。但在收入差别不大的情况下,相比案例 1,案例 2 使用该文提出的综合规划可获得接近 2 倍的利润,这是因为电网扩容所需的投资减少,同时也推迟了中央控制系统的投资。因此,该文所提出的综合规划方法可以较低的成本满足所有的技术要求和标准。

4 结语

提出了一种新的综合规划方法,该方法同时进行了电网扩容和配电自动化规划。首先考虑配电系统的主要软硬件基础设施,建立了混合整数非线性规划(MINLP)模型。以最大化电网公司的利润为目标函数,利用遗传算法求解考虑电网扩容后的配电自动化系统规划问题,确定了变电站和线路建设的位置、类型和建设时间,开关保护装置和传感器的类型、自动化水平、位置和安装时间,并对中央控制系统的建立做出决策。实例研究结果表明,与先制定电网扩容规划,再以此为基础进行配电自动化系统规划的情况相比,所提出的方法制定的综合规划可在少量减少收入的情况下大幅提高电网公司的利润。

参考文献:

- [1] 赵鹏臻,徐谦,谢宁,等. 基于自主式元胞电网模式的电源及耦合点规划方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(8):194-200.
ZHAO Pengzhen, XU Qian, XIE Ning, et al. Planning method of power sources and coupling points based on autonomous web-of-cell mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 194-200.
- [2] 黄建勇,孟琦斌,吴顺超,等. 基于属性数学的配电网运行状态评估[J]. 中国电力,2019,52(2):104-110+118.
HUANG Jianyong, MENG Qibin, WU Shunchao, et al. Operation state evaluation of distribution network based on attribute mathematics[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 104-110+118.
- [3] 梁惠施,程林,苏剑. 微网的成本效益分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(S1):38-44.
LIANG Huishi, CHENG Lin, SU Jian. Cost-benefit analysis of microgrid[J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(S1): 38-44.
- [4] Zeng Bo, Wen Junqiang, Shi Jinyue, et al. A multi-level approach to active distribution system planning for efficient renewable energy harvesting in a deregulated environment[J]. Energy, 2016, 96(1): 614-624.
- [5] Lin Zhe, HU Zechun, Song Yonghua. Distribution network expansion planning considering N-1 criterion[J].

- IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2476-2478.
- [6] Akbari T, Moghaddam S Z. Coordinated scheme for expansion planning of distribution networks: a bilevel game approach[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(14): 2839-2846.
- [7] Jooshaki M, Abbaspour A, Fotuhi-Firuzabad M, et al. A MILP model for incorporating reliability indices in distribution system expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2453-2456.
- [8] Wang Shu, Dong Zhaoyang, Chen Chen, et al. Expansion planning of active distribution networks with multiple distributed energy resources and EV sharing system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 602-611.
- [9] Zou Bo, Wang Cheng, Zhou Ying, et al. Resilient co-expansion planning between gas and electric distribution networks against natural disasters[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(17): 3561-3570.
- [10] Zhou Limei, Sheng Wanxing, Liu Wei, et al. An optimal expansion planning of electric distribution network incorporating health index and non-network solutions [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(3): 681-692.
- [11] Farajollahi M, Fotuhi-Firuzabad M, Safdarian A. Sectionalizing switch placement in distribution networks considering switch failure[J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2019, 10(1): 1080-1082.
- [12] Farajollahi M, Fotuhi-Firuzabad M, Safdarian A. Deployment of fault indicator in distribution networks: a MIP-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2259-2267.
- [13] Mouro João, Ferreira Mafalda, Silva Ana V, et al. Derivation of analytical expressions for the stress/strain distributions, bending plane and curvature radius in multilayer thin-film composites[J]. Journal of Micro-mechanics and Microengineering, 2021, 31(11): 113003.
- [14] Millar R J, Saarijarvi E, Lehtonen M, et al. Electricity distribution network planning algorithm based on efficient initial and radial-to-full network conversion[J]. International Review of Electrical Engineering, 2013, 8(3): 1076-1090.
- [15] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 73-83.
- JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-83.
- [16] Heidari S, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. Planning to equip the power distribution networks with automation system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3451-3460.
- [17] 刘皓璐, 邵建伟, 王雪, 等. 基于数字孪生的配电自动化终端设备状态评价与故障预判[J/OL]. 电网技术: 1-9 [2021-10-27]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0661>.
- LIU Haolu, SHAO Jianwei, WANG Xue, et al. State evaluation and fault prediction of distribution automation terminal equipment based on digital twins[J/OL]. Power System Technology: 1-9 [2021-10-27]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0661>.
- [18] 周贤正, 郭创新, 董树锋, 等. 考虑配电网重构的城市多能源配电/气/热网扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 23-33.
- ZHOU Xianzheng, GUO Chuangxing, DONG Shufeng, et al. Urban multi-energy distribution/gas/heating network expansion planning considering distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 23-33.
- [19] 何乐彰, 何炳源, 徐俊杰, 计及可靠性约束的配电网故障指示器优化布点方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 116-125.
- HE Lezhang, HE Binyuan, XU Junjie. Optimal layout method of fault indicator for distribution network considering reliability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 116-125.
- [20] 陈洁, 关石磊, 尹惠, 等. 基于DNA识别串码的配电自动化终端程序版本一致性管控机制[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4189-4193.
- CHEN Jie, GUAN Shilei, YIN Hui, et al. The consistency control mechanism of distribution automation terminal program version based on DNA identification string code[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4189-4193.