

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.021

考虑自愈功能的配电网多阶段规划方法研究

葛 斐¹, 张伊宁², 王绪利¹, 叶 斌¹, 周贤正², 郭创新^{2*}

(1. 国家电网安徽省电力公司 经济技术研究院, 安徽 合肥 230022; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对配电网供电可靠性问题,对配电网的多阶段规划方案进行了研究,对自愈控制技术在配电网中的故障前自我监测、发生故障时快速定位、自动恢复供电等功能进行了总结,提出了一种考虑自愈功能的配电网多阶段规划方法,通过遗传算法解决了混合整数非线性问题,并以24节点测试网络为例进行了分析。采用了基于全生命周期成本的规划方案,以总收益最大为目标函数,考虑网络的长短期投资与回报,使规划方案更具经济效益。加入了配电网自愈功能,减少了故障停电时间,降低了停电损失。研究表明,含自愈功能的配电网规划方案不仅能提高配电网运行可靠性,且更具经济效益,是一种行之有效的规划方法。

关键词:配电网规划;多阶段;全生命周期成本;自愈;遗传算法

中图分类号:TM715+.3;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0614-06

Research of power distribution network multi-stage expansion planning considering self-healing

GE Fei¹, ZHANG Yi-ning², WANG Xu-li¹, YE Bin¹, ZHOU Xian-zheng², GUO Chuang-xin²

(1. State Grid Anhui Economic Research Institute, Hefei 230022, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at power supply reliability in the operation of power distribution network, self-healing control technology was applied to the distribution network expansion planning. A multi-stage expansion planning method considering self-healing functions was carried out. The proposed method was analyzed in a 24-bus test system, and solved the mix-integer nonlinear programming problem by genetic algorithms. On the one hand, self-healing functions were added to the distribution expansion planning, enabled the distribution network to prevent and recover from power failure automatically, reduced outage cost and decreased outage time. On the other hand, the model was based on life circle cost, considered short-time and long-term investment, made the expansion planning economic. The results indicate that multi-stage expansion planning method considering self-healing functions can improve reliability of distribution network operation, and profits are larger.

Key words: distribution network planning; multi-stage; life circle cost; self-healing; genetic algorithm (GA)

0 引 言

配电网在故障前对其诊断预警,故障后对其定位隔离,可以实现配电网的自愈功能,保证电网安全稳定运行和用户可靠用电^[1-2]。

配电网规划方案包括:①合理地选择线路;②确定

变电站的位置、型号和容量后进行建设、拆除或加固等工作。配电网网架建设时间周期较长,需要把规划方案分为多个阶段实施,并且使用寿命周期成本(Live Circle Cost, LCC),考虑资金的时间价值,加入折现系数,综合地计算每个阶段建设、运营、维护等方面的成本。

收稿日期:2015-12-23

作者简介:葛 斐(1972-),男,宿州砀山人,研究生,高级工程师,主要从事电网一二次协调规划、能源与经济发展规划方面的研究。E-mail: 297470305@qq.com

通信联系人:郭创新,男,博士,教授,博士生导师。E-mail: guochuangxin@zju.edu.cn

国内外学者对配电网规划做了大量研究,并取得了相应成果。文献[3]研究了含分布式电源和主动负荷的配网重构、变压器经济运行与分布式电源的相互作用机理。文献[4]研究了同时满足传统负荷增长和新增电动汽车充电负荷需求的配电网规划问题。文献[5]研究了小比例微网接入配电网后的变电站选址定容方法。文献[6]将地理信息系统(geographic information system, GIS)平台引入配电网规划系统,形成基于GIS的配电网规划智能决策支持系统。文献[7]在配电自动化(distribution automation, DA)基础上提出了一套以利润最大为目标模型的配电网规划方法,并制定了可靠性评估的方案。文献[8]针对配电网的复杂性建立了可自愈配电网的技术框架,并研究了自愈配电网的关键技术。但是目前尚未有文献提出在配电网规划过程中考虑自愈功能。

本研究在配电网高级配电自动化的环境下,提出含自愈功能的配电网网架多阶段规划方法。

1 配电网自愈控制

配电网自愈,具有实时监控分析、排除故障隐患、通过快速继电保护切除故障、优化电能质量等功能^[9]。

配电网运行状态可分为以下4种:正常运行状态、警戒状态、恢复状态和故障状态。

自愈过程如图1所示。

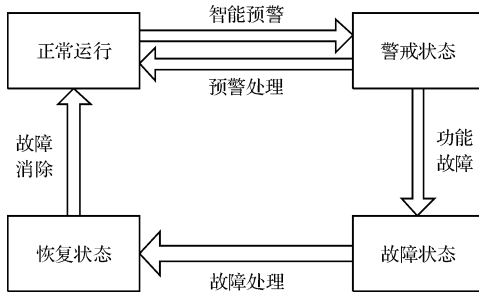


图1 配电网在不同运行状态下自愈过程

自愈控制有广域测控技术、配电网快速仿真和模拟(distribution fast simulation and modeling, DFSM)等关键技术,以面向配电网实时快速分析,实现配电网的全局监视、控制、优化运行;除此之外,兼具电压与无功控制(voltage var control, VVC)、故障定位隔离(fault location and isolation, FLI)、多馈线网络重构(multi-feeder reconfiguration, MFR)等配电网自愈功能^[10]。快速复电也是自愈控制的重要部分。

配电网自愈控制系统由自愈控制功能、数据接口、SCADA平台、系统平台4部分构成。主要终端设备有

馈线开关监控终端(feeder terminal unit, FTU)、开闭所监控终端(distribution terminal unit, DTU)、变压器监测终端(transformer terminal unit, TTU)、智能电能表等。配合配电网的智能硬件设备和软件系统,可以通过以上自愈控制技术实现配电网自愈功能^[11]。因此,在进行自愈控制下的配电网规划时,除了考虑满足负荷的需求,还应考虑在合理的位置安装自愈控制设备。

2 基于自愈控制的配电网规划模型

根据负荷预测以及空间环境等要求,可得到规划设计的变电站的选址和容量、预设线路的路径,且分段开关和电容器的位置都已经确定。在本研究多阶段规划的方案中,规定变电站一经建立就不能拆除,而馈线由于构成网络拓扑,可能因为不同阶段网络结构的变化而被架设或拆除,笔者在部分馈线上安装了分段开关和联络开关。

2.1 逻辑变量

由于规划方案一般分为时间和空间两个维度,逻辑变量包含预设馈线或变电站的编号和时间两个要素。设 $x_{i,k}$ 表示第 k 阶段第 i 预设元素的动作。

当元素 i 为变电站, $x_{i,k} = 1$ 表示阶段 k 在变电站 i 中加入一变压器; $x_{i,k} = 0$ 则表示阶段 k 变电站 i 内无变化。当元素 i 为馈线, $x_{i,k} = 1$ 表示阶段 k 架设了 i 号馈线; $x_{i,k} = 0$ 表示阶段 k 中 i 号馈线未变动;而 $x_{i,k} = -1$ 则表示阶段 k 中 i 号馈线被移除。

设 $X_{i,k}$ 为阶段 k 预设元素 i 的状态, $X_{i,k} = 1$ 表示阶段 k 时 i 号元素已被建于网络中,而 $X_{i,k} = 0$ 表示阶段 k 时 i 号元素未被建设,或(馈线)被架设后已被移除。

2.2 目标函数

寿命周期成本指的是设备从研制、生产,到安装、运行、维护,最后退役拆除的整个寿命周期内所花费的成本之和^[12]。一般有:

$$LCC = CI + CO + CM + CF + CD \quad (1)$$

式中: CI —初期投资成本,是集中在短期内支出的购置、安装费用; CO —运行成本,包括电网运行时的电能损耗和变电站的运行费用; CM —维护成本,包括变电站、电缆以及各保护装置的维护费用; CF —停电成本,这里定义为为用户停电损失; CD —废置处理费用。

计算方式如下:

$$CI = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{k=1}^T \frac{x_{i,k}}{(1+\alpha)^{k-1}} \cdot CI_{\text{sub}} + \sum_{i=1}^{N_l} \sum_{k=1}^T \frac{x_{i,k}}{(1+\alpha)^{k-1}} \cdot (CI_l \cdot L_i + CI_{brk} \cdot X_{brki} +$$

$$\begin{aligned}
& CI_{rel} \cdot X_{reli} + CI_{fuse} \cdot X_{fusei}) + \\
& \sum_{i=1}^{Nb} \sum_{k=1}^T \frac{X_{i,k}}{(1+\alpha)^{k-1}} \cdot (CI_{cpt} \cdot X_{cpti} + \\
& CI_{swt} \cdot X_{swti} + CI_{FPI} \cdot X_{FPIi}) \quad (2)
\end{aligned}$$

式中: N_s — 变电站数量; N_l — 线路数量; N_b — 负荷节点数量; α — 折现率; CI_{sub} — 变电站初期投资费用; L_i — i 段线路长度; CI_l — 每千米线路造价, 单位: 元/km; CI_{brk} , CI_{rel} , CI_{fuse} , CI_{cpt} , CI_{swt} , CI_{FPI} — 断路器、重合闸、熔断器、电容器、隔离开关、故障通信指示器的初期投资费用; X_{brki} , X_{reli} , X_{fusei} , X_{cpti} , X_{swti} , X_{FPIi} — 第 i 线路/负荷节点中断路器、重合闸、熔断器、电容器、隔离开关、故障通信指示器的存在状态, $X_* = 1$ 表示存在于线路/节点中, $X_* = 0$ 表示不存在于线路/节点中。

$$\begin{aligned}
CO = & \sum_{i=1}^{N_l} \sum_{k=1}^T \frac{X_{i,k}}{(1+0.5\alpha)^{2k+1}} (P_{li}(k) \cdot C_{kWh}) \\
& + \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{k=1}^T \frac{X_{i,k}}{(1+0.5\alpha)^{2k+1}} (S_{si}(k) \cdot CO_{sub}) \quad (3)
\end{aligned}$$

式中: $P_{li}(k)$ — 第 k 阶段线路 i 线路损耗; C_{kWh} — 电价, 单位: 元/kWh; $S_{si}(k)$ — k 阶段 i 号变电站容量, 单位: kVA; CO_{sub} — 变电站运行费用, 单位: 元/kVA。

$$\begin{aligned}
CM = & \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{k=1}^T \frac{1}{(1+0.5\alpha)^{2t+1}} \cdot (S_{si}(k) \cdot CM_{sub}) + \\
& \sum_{i=1}^{N_l} \sum_{k=1}^T \frac{X_{i,k}}{(1+0.5\alpha)^{2t+1}} \cdot (CM_l \cdot L_i + \\
& CM_{brk} \cdot X_{brki} + CM_{rel} \cdot X_{reli} + CM_{fuse} \cdot X_{fusei}) + \\
& \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{k=1}^T \frac{X_{i,k}}{(1+0.5\alpha)^{2t+1}} \cdot (CM_{cpt} \cdot X_{cpti} + \\
& CM_{swt} \cdot X_{swti} + CM_{FPI} \cdot X_{FPIi}) \quad (4)
\end{aligned}$$

式中: CM_{sub} — 变电站维护费用, 单位: 元/kVA; CM_* — 相应装置年在第 k 阶段维护费用, 单位: 元。

$$\begin{aligned}
CF = & \sum_{i=1}^{N_l} \sum_{k=1}^T \frac{1}{(1+0.5\alpha)^{2t+1}} \cdot \lambda_i \cdot t \\
& \cdot \sum_{j=1}^{N_{bi}} (ES_{ij}(k) \cdot VL_{ij}) \quad (5)
\end{aligned}$$

式中: λ_i — 线路 i 的故障率, 模型中可简化为固定同一值; t — 线路故障恢复时间; N_{bi} — 故障线路 i 中的负荷节点数量; $ES_{ij}(k)$ — 线路 i 中负荷节点 j 功率; VL_{ij} — 线路 i 中负荷节点 j 的用户停电损失费用, 单位: 元/kW。

由于本研究讨论的是基于自愈配电网络的多阶段规划问题, 该网络在故障发生后可自动检测、定位、隔离并恢复供电, 作用于网络故障后自我诊断与恢复的停电时间 t 将大大下降, 间接影响用户的停电损失成本 CF 。在本模型中, 假设网络已达到高度自愈水平, 故障恢复时间 t 可简化为 0。即:

$$CD = \sum_{i=1}^{N_l} X_{i,k} \cdot CD_l \cdot L_i \quad (6)$$

式中: CD_l — 线路的废置处理费用, 单位: 元/km。

由于整个建设周期较长, 设一共 T 年完成规划线路的建设, 初期投资的折现成本为

$$P_{VI} = \frac{1}{(1+\alpha)^{y(k)}} \quad (7)$$

式中: $y(k)$ — 第 k 个阶段之前配网运行的年数。 P_{VI} — 折现率为 α 的情况下, 把 $y(k)$ 年后的货币折现成现值的系数。

第 k 阶段运营成本的折现系数为:

$$P_{Vsum} = \frac{(1+\alpha)^{d(k)} - 1}{\alpha(1+\alpha)^{d(k)+y(k)}} \quad (8)$$

式中: $d(k)$ — 第 k 阶段的时间周期。

第 k 阶段废置处理费用的折现系数为:

$$P_{VD} = \frac{1}{(1+\alpha)^{d(k)+y(k)}} \quad (9)$$

售电收入为 Rev , 计算公式为:

$$Rev = \sum_{k=1}^T \frac{1}{(1+0.5\alpha)^{2t+1}} P_D(t) \cdot C_{kWh} \quad (10)$$

综上所述我们有全生命周期成本函数

$$LCC = P_{VI}CI + P_{Vsum}(CO + CM + CF) + P_{VD}CD \quad (11)$$

以及利润最大的目标函数:

$$\max Profit = Rev - LCC \quad (12)$$

式中: $P_D(t)$ — 网络中第 t 年的平均用电总需求量, 单位: kW。

2.3 约束条件

(1) 连通性

网络中每个负荷点都必须通过馈线接入网, 没有孤点, 亦即网络是连通的。

(2) 辐射状

为保证配电网安全可靠运行, 必须使网络辐射状开环运行。充要条件为:

$$nl = nb - 1 \quad (13)$$

即线路数为负荷点数减 1^[13]。

(3) 潮流约束

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^{nb} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^{nb} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (14)$$

(4) 节点电压范围

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (15)$$

(5) 容量限制

对于变电站和馈线,都有:

$$P_i^2 + Q_i^2 \leq S_{imax}^2 \quad (16)$$

(6) 逻辑变量约束

为满足方案实施的可行性,对逻辑变量有如下限制:

$$\sum_{k=1}^T x_{i,k} \leq N_{smax}, i \in \Omega_{sub} \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^T x_{i,k} \leq 1, i \in lf \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^T x_{i,k} \leq 0, i \in le \quad (19)$$

式中: N_{smax} — i 号变电站最大可装载变压器的数量, lf —网络中预设线路的集合, le —已架设好线路的集合。

式(17)限制了一个变电站内变压器的数量。式(18)与式(19)限制了同一位置的馈线最多安装一条。

3 算法流程

遗传算法不依赖梯度信息,具有较好的全局搜索能力,适合求解本研究提出的非线性混合整数优化问题^[14]。本研究将多阶段规划结果作为变量,使全生命周期成本达到最低。

3.1 种群编码结构

首先对变量进行编码,一个生物个体表示一种规划方案,结构分为两层:阶段 k 和元素 j 。每一个基因组 $x_{i,k}$ 可根据元素的种类取值0,1或-1,分别表示在第 k 阶段未变化、安装或拆除。第3排基因组 $x_{i,k}$ 即组成染色体编码串。

种群编码方式如图2所示。

...	第 <i>i</i> 个元素			第 <i>i</i> +1个元素	...
...	...	第 <i>k</i> 阶段	第 <i>k</i> +1阶段
...	...	$x_{i,k}$	$x_{i,k+1}$

图2 遗传算法种群结构

3.2 约束及控制策略

在优化函数结果时,在潮流、电压与容量约束前加入惩罚因子,并通过筛选剔除每一代中不符合要求的种群个体实现逻辑约束^[15]。

本研究采用随机均匀选择法的选择策略。遗传控制参数取值范围设置如下:交叉概率 $P_c = 0.5$ 、变异概率 $P_m = 0.05$ 、种群规模 $N_s = 30$ 。

由于采用24节点,5年预测的算例,即 $k = 5, i = 24$,在遗传算法中染色体共有120个变量。为避免陷入局部收敛,变异概率设置为0.05,最大迭代次数为2000

次。评价适应函数为利润最大目标函数,见式(12)。

3.3 算法流程

每个新产生的种群经过逻辑约束筛选出不可行解,随机进行适应性评估,不能满足要求的种群进行新一轮的选择、交叉、变异产生下一代。遗传算法的算法流程如图3所示。

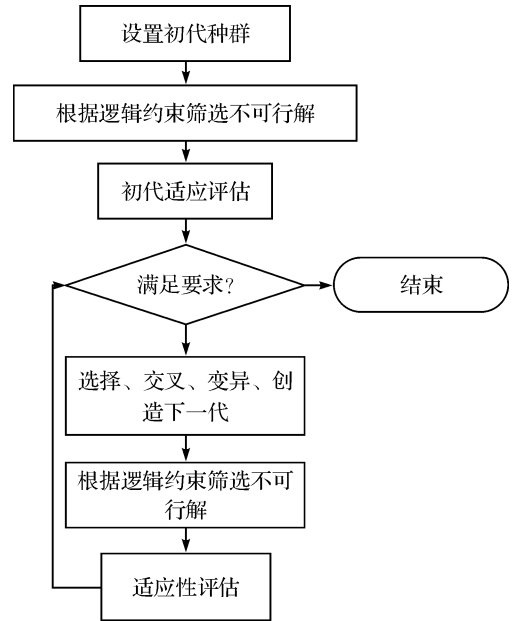


图3 遗传算法流程

4 算例分析

本研究采用一个24节点算例验证算法的可行性和有效性。该配电网是一个由24节点构成的20kV测试网络,包含38条支路,其中21号和22号节点为20-MVA,63-kV/20kV的变电站。24节点测试网络如图4所示。

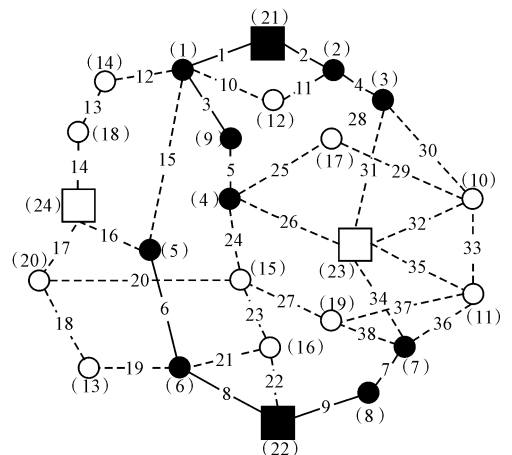


图4 24节点测试网络

负荷节点的负荷值以及未来5年的负荷预测。如表1所示

表 1 未来 5 年接电负荷预测

节点 编号	负荷量 /MW						停电损失 元 /kWh
	$k = 0$	$K = 1$	$K = 2$	$K = 3$	$K = 4$	$K = 5$	
1	2.35	2.48	2.59	2.66	2.70	2.72	108.4
2	0.41	0.52	0.58	0.61	0.63	0.67	87.9
3	1.28	1.36	1.40	1.45	1.53	1.64	82.6
4	0.24	0.29	0.33	0.20	0.26	0.28	91.2
5	0.14	0.16	0.23	0.26	0.19	0.24	88.7
6	0.66	0.71	0.78	0.83	0.88	0.94	95.0
7	2.50	2.12	2.28	2.37	2.43	2.52	76.4
8	0.39	0.42	0.48	0.53	0.59	0.61	82.3
9	0.74	0.79	0.82	0.87	0.89	0.93	68.3
10	0	1.04	1.21	1.33	1.47	1.52	62.4
11	0	1.20	1.33	1.46	1.52	1.68	78.4
12	0	0	0.51	0.58	0.64	0.72	81.3
13	0	0	0.59	0.68	0.72	0.85	96.2
14	0	0	0	2.08	2.13	2.15	102.9
15	0	0	0	1.12	1.13	1.13	86.0
16	0	0	0	1.48	1.50	1.54	76.6
17	0	0	0	0	0.63	0.72	85.2
18	0	0	0	0	1.29	1.37	77.4
19	0	0	0	0	0	0.96	84.5
20	0	0	0	0	0	1.94	91.3

现有线路以及规划线路和节点上的自动保护装置如表 2、表 3 所示,这些装置的安装位置以及时间已经按照实际要求规划完成。

表 2 自动保护装置安装线路

保护装置	安装线路
熔断开关	3. 4. 6. 15. 20. 29. 33. 37
断路器	8, 11, 18
重合闸	25, 28

表 3 自动保护装置安装节点

保护装置	安装节点
隔离开关	1, 4, 5, 7, 17
电容器	1, 3, 7, 10, 11, 14, 16, 18, 20
故障指示器	1, 2, 6, 8, 9, 11, 14, 16, 17, 18, 19, 20

其他所需的数据参数如表 4 所示。

表 4 其他数据参数

常量	设定值	常量	设定值
CI_{sub}	200 万元	CM_{sub}	0.3 万元 /MVA
CI_l	4 万元 /km	CM_l	0.2 万元 /km
CI_{brk}	10 万元	CM_{brk}	0.3 万元
CI_{rel}	7 万元	CM_{rel}	0.2 万元
CI_{fuse}	0.2 万元	CM_{fuse}	0 万元
CI_{cpt}	2 万元	CM_{cpt}	0.1 万元
CI_{swt}	3 万元	CM_{swt}	0.2 万元
CI_{FPT}	0.8 万元	CM_{FPT}	0.03 万元
CO_{sub}	0.3 万元	λ	0.02
CD_l	3 万元 /km	t	4h

线路电阻值选取为 0.483 Ω /km,电抗值选取为 0.415 Ω /km。本研究假设电价为 0.6 元 /(kWh),负荷节点的最大负荷损耗时间为 2 500 h,单位折现率 α 取值 0.05,规划方案分别以全生命周期成本最小和总利润最大作为优化目标。

4.1 不考虑自愈控制的配电网规划

算例 1 计算了在不考虑自愈控制的情况下,以最大利润为目标的配电网规划方案。图 5 所示为 5 年后的网络拓扑,表 5 给出了每年的线路和变电站增减规划。

从该规划方案可以看出,在给定原始网络的基础上,第一年和第三年分别在 23 号和 24 号节点接入了 20 MVA 规模的变电站,而为了保证拓扑结构的辐射性,3 号线路在第 2 年被移除。

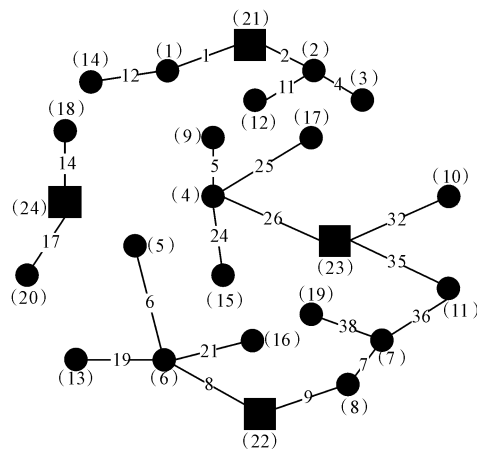


图 5 不考虑自愈控制的规划结果

表 5 不考虑自愈控制的规划线路改变

规划元素	$K = 1$	$K = 2$	$K = 3$	$K = 4$	$K = 5$
变电站	(23)20MVA	-	(24)20MVA	-	-
架设线路	(1, 32, 35)	(11, 19, 26)	(12, 21, 24)	(14, 25)	(17, 38)
拆除线路	-	(3)	-	-	-

4.2 考虑自愈控制的配电网规划

算例 2 加入了自愈控制装置,配电网拥有电压与无功控制 VVC、故障定位隔离 FLI、多馈线网络重构 MFR 等自愈功能。5 年后的规划结果如图 6 所示,每年的线路或变电站增减情况如表 6 所示。

从规划结果可看出,与算例 1 一样,算例 2 在第 1、3 年分别在 23 和 24 节点加入了 20 MVA 规模的变电站,而部分馈线的布局位置和时间有所不同。第 3、6 号馈线本应分别在第 2、4 年移除,但是该方案用隔离开关将线路与负荷节点断开,以保证网络拓扑辐射性。

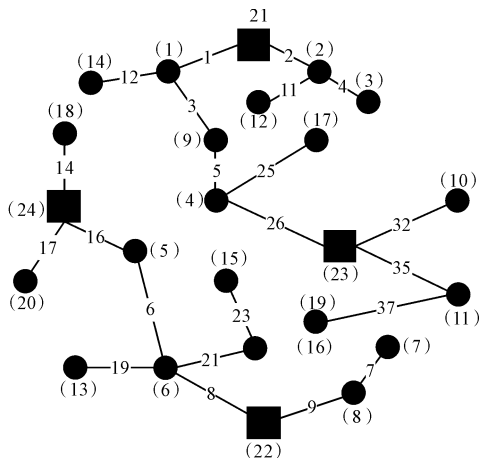


图6 考虑自愈控制的规划结果

表6 不考虑自愈控制的规划线路改变

规划元素	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5
变电站 (23)20MVA	-	(24)20MVA	-	-	-
架设线路	(32,35)	(11,19,26)	(12,21,23)	(14,16,25)	(17,37)
拆除线路	-	-	-	-	-

算例1和算例2两种方法各项成本以及全生命周期成本之和收入与利润值的比较如表7所示。

表7 两种方法成本比较(单位:万元)

	CI	CO	CM	CF	CD	LCC	Rev	Pro
算例1	583.8	52.0	40.6	92.2	-18.2	750.4	853.7	103.3
算例2	678.4	58.5	43.8	75.2	-16.1	839.8	965.0	125.2

从表7中可看出,考虑自愈功能的网络规划较于没有自愈功能的规划方案,初期投资花费多94.6万元(16.2%);两者的运行和维护费用相差不多,含自愈功能的规划方案花费稍多;含自愈功能的规划方案停电成本相比较小,比不含自愈功能的方案减少17.0万元(18.4%);而售电收入也是含有自愈功能的网络更具优势,高出不含自愈功能的方案111.3万元(13.0%)。

该结果表明,虽然考虑自愈功能的规划方法在前期有较大的投入,但是从长远来看,所获得的利润却更为可观,且有利于降低配网运行风险。

5 结束语

本研究将配电网自愈功能列入配电网规划的因素中,以全寿命周期为目标函数,以利润最大化为目标,建立了考虑配电网自愈功能的多阶段规划模型,利用遗传算法,得到多阶段规划下的最优方案。通过算例

分析表明,含有自愈功能的配电网能更有效地维护配电网的稳定运行,降低风险,减少用户停电损失,总的利润更为可观,对配电网规划方案的制定具有实际的应用意义。

参考文献(References):

- [1] 王力成,文东山,周斌,等.配电网中光伏功率主动削减策略研究[J].机电工程,2015,32(6):863-867.
- [2] 余贻鑫,栾文鹏.智能电网述评[J].中国电机工程学报,2009,29(34):1-8.
- [3] 蔡丽霞.含分布式电源的配电网规划研究[D].济南:山东大学电气工程学院,2009.
- [4] 杜爱虎,胡泽春,宋永华,等.考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J].电网技术,2011,35(11):35-42.
- [5] 戴上,张焰,祝达康.含有微电网的配电网规划方法[J].电力系统自动化,2010,34(22):41-45.
- [6] 周源.基于GIS的配电网规划智能决策支持系统及其算法研究[D].重庆:重庆大学电气工程学院,2004.
- [7] Heidari S, Fotuhi-Firuzabad M, Kazemi S. Power Distribution Network Expansion Planning Considering Distribution Automation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014,30(3):1-4.
- [8] 董旭柱,黄邵远,陈柔伊,等.智能配电网自愈控制技术[J].电力系统自动化,2012,36(18):17-21.
- [9] 吴宇红,章建森.低压配电设备故障诊断及运行监控系统[J].机电工程,2014,31(6):795-799.
- [10] 于士斌,徐兵,张玉侠,等.智能配电网自愈控制技术综述[J].电力系统及其自动化学报,2013,25(5):65-70.
- [11] Kang T, Ge L, Tan Z, et al. Investigation on technology framework and key technologies for self-healing smart distribution system[C]//Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC), Proceedings 2013 International Conference on. Sheng yang: IEEE,2013:3240-3243.
- [12] 苏海峰.配电系统规划全寿命周期管理理论和方法研究[D].北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2012.
- [13] Lavorato M, Franco J F, Rider M J, et al. Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1):172-180.
- [14] 余健明,吴海峰,杨文字.基于改进多种群遗传算法的配电网规划[J].电网技术,2005,29(7):36-40+55.
- [15] 盛四清,王浩.用于配电网规划的改进遗传算法[J].电网技术,2008,32(7):69-72,83.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

葛斐,张伊宁,王绪利,等.考虑自愈功能的配电网多阶段规划方法研究[J].机电工程,2016,33(5):614-619.

GE Fei, ZHANG Yi-ning, WANG Xu-li, et al. Research of power distribution network multi-stage expansion planning considering self-healing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(5):614-619.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>