

基于Kruskal-遗传混合算法的主动配电网规划策略

随着分布式电源(DG)在配电网中的逐步渗透以及配电网网络规模的逐步增大,传统的数学规划和启发式配电网规划方法在计算效率、寻优特性方面均面临多重约束,规划结果往往不尽如人意。针对上述问题提出一种基于最小有向生成树(Kruskal)与遗传算法的混合算法,对主动配电网中的分布式电源以及网架结构进行协同优化,简化了算法的染色体结构,避免了传统基因算法的“维数灾”问题,同时,该算法规避了传统网架规划中出现的不可行解问题,精简了规划流程。结合多场景分析法对西北某城区10 kV主动配电网进行算例分析,结果表明该算法能够有效地找到全局最优解,并且具有良好的收敛特性。

曲鑫 王小君 和敬涵/北京交通大学电气工程学院



曲鑫/硕士研究生

关键词/Keywords

主动配电网·
分布式电源·
最小生成树·
遗传算法·
协同规划·

随着负荷需求的不断增加和电力环保的呼声日益高涨,以灵活、高效、节能且环保为理念的主动配电网已深入人心。相对于传统的被动配电网,主动配电网的突出优势在于大规模兼容间歇式可再生能源,并通过合理的DG调度实现能源结构的优化以及系统的最优潮流运行^[1-3],同时提升配电网资产利用空间,延缓网络升级投资。目前,针对主动配电网中的分布式电源选址定容以及配电网网架结构规划,国内外相关学者开展了积极研究。文献[4]将序优化理论与遗传算法相结合,用序优化的思想来指导配电网网架规划,然而文中没有考虑DG的选址定容问题。文献[5]采用改进遗传算法,针对DG位置和容量以及配电网网架结构进行协同规划,但是文中对于算法中产生的不可行解进行了手动辐射形修复,破坏了算法的优化特性,具有一定的局限性。文献[6]基于模糊潮流

计算的方法提出了计及DG出力波动性含分布式发电的配电网网络规划策略,但是文中没有考虑DG出力的随机性对规划结果经济性和可靠性的影响,缺乏代表性。针对以上问题,本文提出一种基于Kruskal和遗传算法的混合算法,对DG布点以及配电网网架进行协同规划。同时,在算法中引入多场景分析思想,使规划结果具有更高的理论高度和现实指导意义。文中通过对西北某10 kV城市配电网进行规划算例分析,结果表明该算法能够合理有效地完成网架拓展和DG定容工作。

Kruskal-遗传混合算法

含分布式发电的配电网拓展规划从数学层面上看是一种离散化、非线性和多目标的寻优求解过程。传统的人工智能优化算法往往面临变量结构复杂而造成的“维数灾”问题,以及过度简化变量导致的优化结果粗糙、缺乏严谨性的问题。文献[7]采用遗传算法,对分布式电源的布点工作进行了优化,并在此基础上通过模拟退火方法对配电网进行优化拓展,得到了较为理想的规划方案,然而该方法缺少协同规划的理念,DG的布点与新增网架难以实现最优配合。文献[8]应用多智能体遗传算法对DG的位置、容量及配电网网架进行了协同优化,通过引入多智能体的竞争和自学习行为提高了收敛速度。本文通过采用Kruskal-遗传混合算法实现了两者的同步协同优化,同时精简了染色体结构,

改善了优化特性。

1. Kruskal算法简介

Kruskal算法于19世纪60年代提出,是一种用于寻找加权连通图中最小生成树的算法,其核心思想是贪婪准则的集中体现,其时间复杂度只与边的维数有关,通过对图的边进行访问来寻找稀疏图的最小生成树。基于Kruskal思想并加以改进的有向生成树算法流程如图1所示。

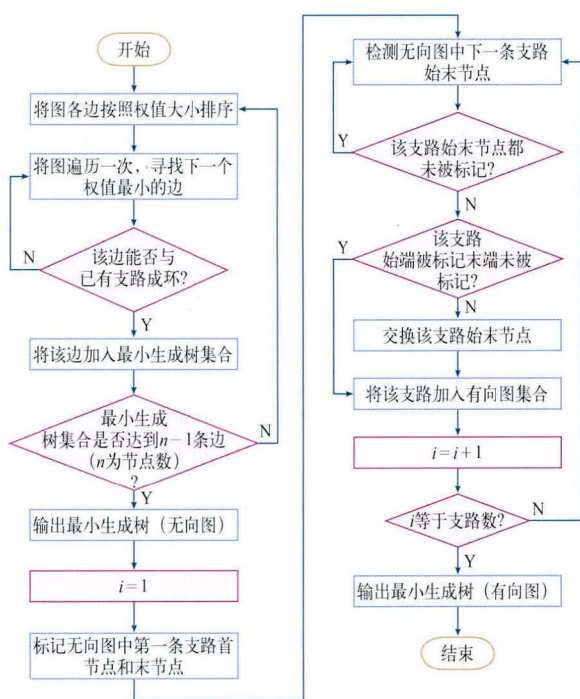


图1 基于Kruskal算法的最小有向生成树算法流程

2. 潮流计算

在电力系统的支路类潮流计算方法中,前推回代潮流算法相对于牛顿类算法具有迭代速度快、计算时间短且更容易实现的优点,本文采用前推回代潮流算法将分布式能源作为具备固定功率因数($\lambda=0.85$)的PQ节点,即相当于在相应的负荷点上添加一个负的负荷。同时,传统的继电保护大部分只适应单向潮流,不具有方向性,为保证DG接入后配电网潮流方向不会改变,要求安装的分布式电源装机容量不超过所在节点的负荷大小。潮流方程如下

$$P_i = P_{i-1} - R_{i-1} (P_{i-1}^2 + Q_{i-1}^2) / U_{i-1}^2 - P_{li} + P_{DGi} \quad (1)$$

$$Q_i = Q_{i-1} - X_{i-1} (P_{i-1}^2 + Q_{i-1}^2) / U_{i-1}^2 - Q_{li} + Q_{DGi} \quad (2)$$

$$U_i^2 = U_{i-1}^2 - 2(P_{i-1}R_{i-1} + Q_{i-1}X_{i-1}) + (R_{i-1}^2 + X_{i-1}^2)(P_{i-1}^2 + Q_{i-1}^2) / U_{i-1}^2 \quad (3)$$

3. 混合算法

(1) 染色体编码

本文采用10位二进制编码的方式对DG容量进行编码,如图2所示。每一条染色体位代表在可以添加分布式电源负荷节点上的DG容量,对于网架结构的选择采用Kruskal与破圈法相结合方式。同时,在每一次迭代寻优过程中,两者同步优化寻找最优匹配结果。此种方法避免了传统遗传算法中对DG选址定容以及网架结构的混合编码方式,在很大程度上精简了染色体结构,提高了运算效率。此外,基于Kruskal的最小有向生成树算法自动生成单连通辐射状网架结构,规避了传统智能算法中的孤岛、孤链以及成环的不可行解问题,减少了基因操作。

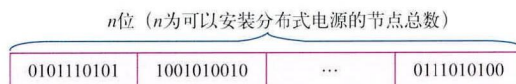


图2 染色体编码

(2) 算法流程

本文将改进后的Kruskal算法与破圈法相融合,经过不断迭代并实时修正线路综合费用,进而实现网架规划并同时完成线路选型的工作,具体规划步骤如下:

1) 取定一种线路型号(如LGJ-150),以此为基准求取各可能架设线路的支路建设费用,作为各支路的初始权值。

2) 采用Kruskal算法,求取最小初始造价的辐射性网络拓扑结构。

3) 通过潮流计算得出各支路电流初始值,并通过可选线路的经济电流密度选择各线路型号。

4) 修订线路参数,重新计算配电网潮流,求取各支路功率损耗,并结合各线路的建设费用重新修订各线路权值。即

$$\text{Loss}_i = 3I_i^2 \gamma \rho L_i t / \alpha_i \quad (4)$$

式中, Loss_i 为支路*i*的运行费用; I_i 为支路*i*的电流; γ 为电价,元/(kW·h); ρ 为电阻率; L_i 为规划期限; α_i 为导线截面积。

- 5) 检验当前网架以外其他可行线路的初始权值集合中是否存在小于当前拓扑结构中所有线路权值的支路。若不存在, 结束规划, 当前拓扑即为最优网架结构; 否则, 将所有满足条件的支路按权值大小存入堆栈line1中。
- 6) 将堆栈line1首端支路添加到当前网架, 检验当前网架环路中的支路权值, 将该环路中其他支路按权值从大到小的顺序加入到堆栈line2。
- 7) 由line2首端取出一条支路并从拓扑中删除, 从而构成新的拓扑结构。
- 8) 重新进行该网架下的潮流计算, 调整各支路的建设费用和运行费用, 计算各支路权值。判断该网架下的总建设运行费用是否优化, 若是, 则更新拓扑结构, 清空堆栈line1、line2, 并返回5); 否则判断line2是否已空。若不是, 则返回7); 反之, 判断line1是否已空。若是, 结束规划, 输出最优网架; 否则返回6)。

结合遗传算法的总体规划流程如图3所示。

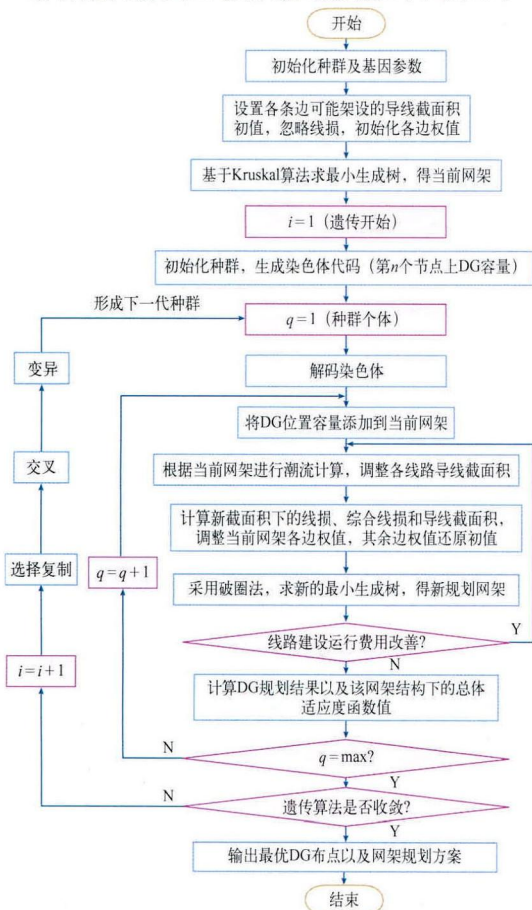


图3 Kruskal-遗传混合算法流程

为防止遗传算法迭代过程中出现局部收敛问题, 文中对遗传编码作了相应改进。在对种群选择复制过程中未采用赌轮算法, 根据适应度值优劣对种群个体进行排序, 通过设置平均适应度值作为门槛阈值来自主选择相对优秀个体并覆盖劣势基因, 在加速优胜劣汰的过程中, 缩小了优秀个体的搜索范围, 改善了寻优特性。同时, 在收敛判据方面, 规定目标函数值连续5次不变即跳出迭代, 提高迭代速度。

(3) 场景分析

针对未来规划期限内主动配电网中可能出现的多种确定性场景进行分析建模, 然后在不同场景下进行确定性的DG与网架规划, 综合评估规划结果对于多种场景的适应能力, 指导决策者规划方案的优选。本文针对主动配电网网架拓展规划中DG出力情况以及负荷侧需求差异, 将规划年内的预想环境分为9个场景, 各场景分类以及场景概率值如表1所示, 场景分析流程如图4所示。

表1 场景分类

场景编号	负荷需求	负荷需求概率 (%)	DG出力	DG出力概率 (%)	场景概率 (%)
1			1	0.5	0.2
2	1	0.4	0.8	0.3	0.12
3			0.6	0.2	0.08
4			1	0.5	0.15
5	1.1	0.3	0.8	0.3	0.09
6			0.6	0.2	0.06
7			1	0.5	0.15
8	1.2	0.3	0.8	0.3	0.09
9			0.6	0.2	0.06

配电网规划数学模型

由于配电网规划的问题相当复杂, 在各种优化模型中, 都难免采用一定的近似和简化。出于不同的处理方式和经济角度, 会形成不同的配电网规划数学模型。本文综合考虑线路以及分布式电源的购置安装初投资年平均费用、规划水平年内DG运行维修费用、年平均网损费用以及购电年平均费用。同时, 将电压约束、馈线容量约束以及DG总装机容量约束以惩罚的形式加入到最终的

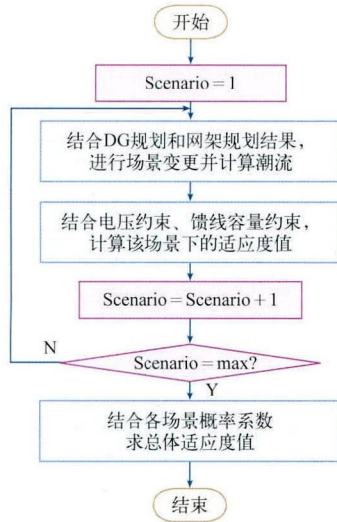


图4 多场景分析流程

目标函数中。针对主动配电网的DG布点规划以及网架拓展规划进行协同规划。

1. 目标函数

$$\text{Function} = \text{obj}_1 + \text{obj}_2 + \text{obj}_3 +$$

$$\sum_{i=1}^n K_U(U_i) + \sum_{j=1}^L K_I(I_j) + K_{\Sigma \text{DG}}(S_{\Sigma \text{DG}}) \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \text{obj}_1 &= f_{\text{DG1}} + f_{\text{line1}} \\ &= \left[\frac{r_0(1+r_0)^T}{(1+r_0)^T - 1} + \beta_2 \right] \sum_{j=1}^{n_{\text{DG}}} C_{\text{DG}} P_{\text{DG}i} + \\ &\quad \left[\frac{r_0(1+r_0)^T}{(1+r_0)^T - 1} + \beta_1 \right] \sum_{i=1}^{n_{\text{line}}} (C_{\text{line1}} + C_{\text{line2}}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, obj_1 为计及资金时间价值的线路以及分布式电源的购置安装初投资年平均费用; r_0 为折现率, 取0.04; T 为投资回收年限; $\beta_1 = 0.155$ 、 $\beta_2 = 0.12$, 分别为线路和DG的年运行维护系数; C_{line1} 、 C_{line2} 分别为单位长度线路造价和安装费用; C_{DG} 为建设初期分布式电源单位容量的综合投资成本; $P_{\text{DG}i}$ 为第*i*个分布式电源的装机容量。

$$\begin{aligned} \text{obj}_2 &= f_{\text{DG2}} + f_{\text{line2}} \\ &= C_R \sum_{i=1}^{n_{\text{DG}}} P_{\text{DG}i} \tau_{\text{max}} + 8760 \chi C_e \sum_{i=1}^{n_{\text{line}}} \Delta P_{li} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, obj_2 为规划年限内单位年DG运行成本与维护费用以及网损费用; $P_{\text{DG}i}$ 为第*i*个分布式电源的年平均有功出力; C_R 为分布式发电的单位电价成本, 取0.533元/(kW·h), 包括分布式电源的上网电

价以及政府补贴电价; τ_{max} 为分布式发电的最大利用小时数; χ 为年负荷损耗率; C_e 为单位电价, 取0.5元/(kW·h); ΔP_{li} 为第*i*条支路的有功损耗。

$$\chi = \left[K \frac{T_{\text{max}}}{8760} + (1-K) \left(\frac{T_{\text{max}}}{8760} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中, K 为负荷损耗经验系数, 其值大小随负荷类型改变, 通常 $K = 0.1 \sim 0.4$; 最大负荷利用小时数 $T_{\text{max}} = 3000 \text{ h}$ 。

$$\text{obj}_3 = C_e T_{\text{max}} (P_{\Sigma \text{load}} - \sum_{i=1}^{n_{\text{DG}}} P_{\text{DG}i}) \quad (9)$$

式中, obj_3 为配电网公司单位年平均购电费用; $P_{\Sigma \text{load}}$ 为考虑负荷增长的负荷总量。

2. 不等式约束

为保证含DG的配电网安全稳定运行, 本文将不等式约束以惩罚的形式添加到目标函数中, 其中包括节点电压约束、馈线电流容量约束以及DG容量约束, 表达式为

$$\begin{cases} U_{i\min} \leq U_i < U_{i\max} \\ I_j < I_{j\max} \\ S_{\Sigma \text{DG}} \leq 20\% S_{\text{load}} \end{cases} \quad (10)$$

式中, U_i 为节点*i*的节点电压; $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 为节点*i*的电压上下限; I_j 、 $I_{j\max}$ 分别为支路*j*的电流以及最大允许电流; 同时, 为避免接入的分布式发电总量 $S_{\Sigma \text{DG}}$ 过大而影响系统的电能质量, 文中约定 $S_{\Sigma \text{DG}}$ 不超过负荷总量的20%。

本文通过引入惩罚系数 $K_U(U_i)$ 、 $K_I(I_j)$ 和 $K_{\Sigma \text{DG}}(S_{\Sigma \text{DG}})$ 来规避规划方案中的不可行解, 当不满足要求时根据用户需求进行自由定义取值大小。根据文献[9], 本文算例中取 $K_U(U_i) = K_I(I_j) = K_{\Sigma \text{DG}}(S_{\Sigma \text{DG}}) = 30$ 。

算例分析

综合考虑电缆线路与分布式发电设备的全生命周期以及有效收益寿命, 本文拟配电网规划周期为20年, 并假设新增负荷在规划期限内以每年5%的速度增长, 同时保证变电站容量满足负荷增长需求, 无须增加新的变电站节点。通过采用上述改进混合算法, 对西北某城区10 kV主动配电网进行了含分布式发电的配电网网架拓展规划。

本文采用Matlab软件编程计算，原始拓扑结构如图5所示，节点1为平衡节点，数据参数参照文献[10]附录2。文中假设节点7、8、10、11和17均可安装分布式电源，同时以10 kW为单位对DG容量进行编码，容量上限分别为1 000 kW、600 kW、630 kW、1 000 kW和600 kW；线路拟采用10 kV交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆，待选电缆型号及经济参数如表2所示。

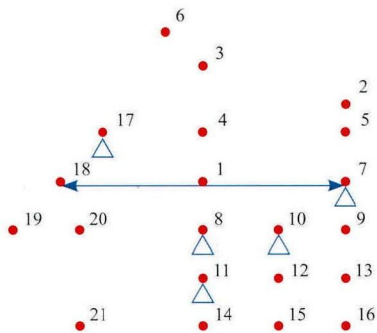
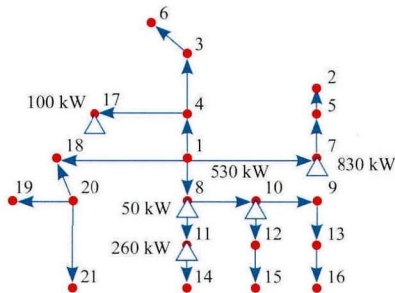


图5 规划前网架结构及新增负荷节点

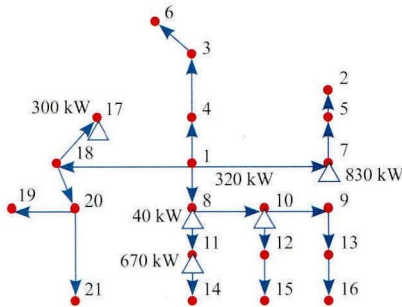
表2 电缆型号及经济参数

线路型号	经济电流密度 /A	单位长度综合造价 / (万元/km)
YJV-10 kV-3×120	<117	26.885 3
YJV-10 kV-3×150	117~145	31.679 3
YJV-10 kV-3×185	145~183	37.272 3
YJV-10 kV-3×240	183~234	46.061 3
YJV-10 kV-3×300	>234	55.673 3

文中在DG种类、规模以及新增辐射网架结构均未知的情况下，分别采用Kruskal-遗传混合算法（种群规模20，交叉率 $P_c=0.8$ ，变异率 $P_m=0.05$ ，最大迭代次数100次）以及文献[5]中改进遗传算法对含DG的主动配电网进行网架拓展规划，规划结果如图6和表3所示。



(a) 本文算法规划结果



(b) 改进遗传算法规划结果

图6 本文算法与改进遗传算法规划结果

表3 本文算法（上）与改进遗传算法（下）线路选型

最优网架	各支路型号
1-4 1-8 1-18 1-7	YJV-300 YJV-300 YJV-150 YJV-185
4-3 3-6 8-11 11-14	YJV-240 YJV-185 YJV-185 YJV-120
8-10 10-12 12-15 10-9	YJV-300 YJV-150 YJV-120 YJV-240
9-13 13-16 7-5 5-2	YJV-185 YJV-120 YJV-120 YJV-120
4-17 18-20 20-19 20-21	YJV-120 YJV-120 YJV-120 YJV-120
1-4 1-8 1-18 1-7	YJV-240 YJV-300 YJV-185 YJV-185
4-3 3-6 8-11 11-14	YJV-240 YJV-185 YJV-150 YJV-120
8-10 10-12 12-15 10-9	YJV-300 YJV-150 YJV-120 YJV-240
9-13 13-16 7-5 5-2	YJV-185 YJV-120 YJV-120 YJV-120
18-17 18-20 20-19 20-21	YJV-120 YJV-120 YJV-120 YJV-120

两方案的经济性指标对比如表4所示。

表4 经济指标对比 (单位：万元)

费用类型	本文算法	改进遗传算法
初投资年平均费用	256.729 7	252.535 4
网损年平均费用	41.775 1	58.486 6
购电年平均费用	1 905.5	1 849.05
DG年运行维护费用	239.863 8	295.76
惩罚成本	0	0
总计	2 443.9	2 455.832

基于本文算法规划结果考虑DG出力以及负荷需求的不确定性，根据上述场景分类进行多场景分析，给出场景分析前后经济性差异，以指导决策者进行方案的优选，具体数据如表5所示。

表5 场景分析前后经济性比较 (单位：万元)

费用类型	场景分析前	场景分析后
初投资年平均费用	256.729 7	256.729 7
网损年平均费用	41.775 1	52.927 0
购电年平均费用	1 905.5	2 137.8
DG年运行维护费用	239.863 8	206.282 9
惩罚成本	0	120
总计	2 443.9	2 773.94

在总体的经济性指标上,考虑规划期限内的多种可预见场景造成实际成本升高330.04万元;从各费用单元上可以看出,随着负荷需求的增加以及分布式发电出力的波动,导致DG运行费用与购电费用的反向变化,并影响网络损耗,同时,在未考虑多场景情况的仿真过程中,全网最低节点电压出现在16节点,其幅值为0.989 (pu),相比之下场景分析后全网最低节点电压依然为16节点,幅值为0.966 (pu),未出现电压越限情况。在多场景分析过程中出现惩罚费用的原因在于场景7和场景8中的线路1-8、场景9中的线路1-8和线路1-7出现馈线超容并影响供电质量。

图7为本文算法与文献[5]中的改进遗传算法的结果对比,可以看出由于本文算法避免了对网架结构的染色体编码,很大程度上加速了迭代过程,并且具有平滑的收敛特性,寻优效果良好。同时,文中算法协同优化DG容量以及网架结构,实现两者在算法迭代过程中的最优经济匹配,避免了文献[5]的算法由于不可行解的手动修复造成对优化结果的破坏。

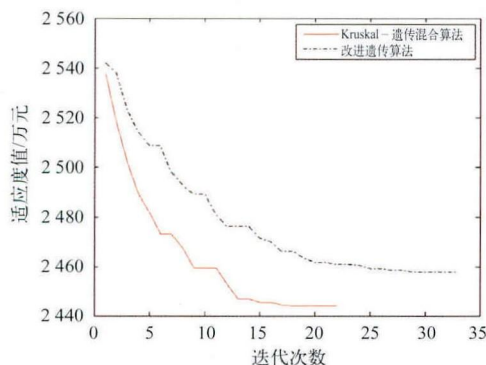


图7 迭代结果对比

结束语

1) 本文采用Kruskal-遗传混合算法协同规划主动配电网中的DG容量以及新增网架结构,同时进行线路选型,该算法精简了染色体结构,并有效地规避了传统智能算法中出现的不可行解问题,通过自主识别和选择优秀种群加速了迭代过程,算例表明该算法能够有效地实现含DG与网架

的最优经济匹配。

2) 考虑到规划期限内负荷需求的变化以及分布式电源出力的波动性,本文引入多场景分析模拟现实情况下规划结果的经济指标,同时,对不同场景下的电压越限和馈线超容现象引入惩罚费用,以指导决策者进行规划方案的优选。

参考文献

- [1] 尤毅,刘东,于文鹏.主动配电网技术及其进展[J].电力系统自动化,2012,36(5):9-25.
- [2] 张节潭,程浩忠,姚良忠.主动管理在含有分布式电源的配电网中的应用[J].电力科学与技术学报,2008,23(1).
- [3] Vinicius F Martins, Carmen L T Borges. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4).
- [4] 刘云,陈金福,陈志刚.基于遗传序优化算法的配电网规划[J].电网技术,2008,32(10).
- [5] 麻秀范,崔焕君.改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J].电工技术学报,2011,26(3):3-26.
- [6] 杨毅,韦钢,周冰.含分布式电源的配电网模糊优化规划[J].电力系统自动化,2012,36(5):9-25.
- [7] 王成山,陈恺,谢莹华.配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J].电力系统自动化,2006,30(3):38-43.
- [8] 徐玉琴,李雪冬,张继刚.考虑分布式发电的配电网规划问题的研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(1):87-91.
- [9] 苑津莎,张铁峰,刘建新.基于级别高于关系和线性规划的配电网规划辅助决策方法[J].中国电机工程学报,2006,26(12):18-21.
- [10] 刘健,毕鹏翔,杨文字.配电网理论及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

(收稿日期:2014-02-26) **EA**