

两种启发式电网规划算法的比较与改进

郑爽¹, 杨晓楠², 句荣滨³, 耿光飞¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院), 北京 100192; 3. 辽宁省电力有限公司调控中心自动化处, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 逐步扩展法和逐步倒推法是两种常用的启发式输电网络规划算法, 前者的优点是能够给出从现有网架到目标网架的过渡方案。针对同一规划问题, 在相同的目标函数和约束条件下, 两种方法的规划结果并不一致, 逐步扩展法的计算量较大且没有得到最优解。采用 18 节点电网规划算例对两种方法的计算步骤及有效性指标等对比分析, 发现逐步扩展法在有效性指标、虚拟线路等方面存在缺陷。所提出的改进的逐步扩展法, 经算例验证能够得到最优规划结果。分析并总结了两种方法各自的优缺点, 为输电网络规划方法的选择提供依据。

关键词: 输电网络规划; 逐步倒推法; 逐步扩展法; 潮流计算

Comparison and improvement of two heuristic algorithms for power network planning

ZHENG Shuang¹, YANG Xiaonan², JU Rongbin³, GENG Guangfei¹

(1. School of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China; 3. Automation Department of the Liaoning Electric Power Co., Ltd. Control Center, Shenyang 110006, China)

Abstract: Successive expand method and successive backward method are two commonly used heuristic algorithms for transmission network planning. The advantage of the former is that it can give a transition plan from the existing grid to the target grid. For the same planning problem, under the same objective function and constraint conditions, it finds that the planning results of the two methods are not consistent. The successive expand method has a little bit more amount of calculations and has not obtained the optimal solution. By analyzing the calculation steps and the effectiveness index of the two algorithms through the 18-node planning example, it is found that there are defects in the successive expand method in terms of effectiveness index and virtual lines. Therefore, this paper proposes an improved successive expand method, which is verified by calculation example to obtain optimal planning results. The relative merits of the two methods are analyzed and summarized, which provides a basis for the selection of transmission network planning methods

This work is supported by Beijing Municipal Science & Technology Commission Project “The Transformation of Scientific and Technological Achievements—Research on Flexible DC Power Network Bringing New Energy Access to AC Power Grid Dispatching Technology” (No. Z161100004816025) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Research on Scheduling Technology of ± 500 kV Flexible DC Power Network”.

Key words: transmission network planning; successive backward method; successive expand method; power flow calculation

0 引言

现有的电网规划方法主要分为启发式方法^[1-2]

基金项目: 北京市科委项目资助 (Z161100004816025) “科技成果转化落地培育——柔直电网汇集新能源接入交流电网调度技术研究”; 国家电网科技项目资助 “ ± 500 kV 柔性直流电网调度技术研究”

和数学优化方法^[3], 由于电网的规划^[4]是一个复杂的过程, 故在使用数学模型进行优化时需要进行一定的简化^[5-6]。而启发式算法更接近于工程人员的思路, 可以根据计算、分析得到一个较好的设计方案, 也因其灵活、直观、便于人工决策而被广泛应用^[7-9]。但启发式算法也存在一定的不足: 很难找到既方便计算又能够真实反映规划问题实质的性能指标。逐步扩展法和逐步倒推法是两种常用的启发式输电网

络规划算法,前者根据灵敏度分析^[10-12]将最有效的线路逐步添加到网络中,后者先将待选线路全部加入网络,再通过灵敏度分析,逐步去掉有效性低的线路^[13]。其中,逐步扩展法的步骤更符合实际电网的建设过程,其规划结果可以提供从初始网架到目标网架的过渡方案。

文献[14-15]中介绍了两种启发式算法的计算步骤,并通过算例对逐步倒推法进行了验证。文献[16]提出了考虑 $N-1$ 安全性的启发式输电网络规划方法,但也仅对逐步倒推法进行了研究。文献[17]提出了一种考虑缺电成本的输电网络 $N-2$ 校验模型,然后在这两种规划方案的基础上验证其 $N-2$ 模型的有效性,但并没有对两种方法的规划过程及结果进行详细的对比分析。

总之,现有文献在进行规划时大多采用逐步倒推法,尚未有文献深入对比分析这两种规划方法结果的一致性及其有效性指标等的合理性。这导致在采用启发式算法对输电网络进行规划时,难以根据实际需求直接选取最恰当的方法进行计算。针对上述问题,本文从两种启发式算法的规划步骤入手,结合算例检验两种方法规划结果的一致性,对方法中存在的不足之处进行详细分析并提出改进方案。最后,归纳两种规划方法各自的优缺点,为输电网络规划方法的选择提供依据。

1 启发式电网规划算法

1.1 输电网络规划的数学模型

本文以输电网络线路的总投资最小为目标函数,在保证网络连通的前提下,其数学模型可表示为

$$\min M = \sum_{i=1}^n C_i X_i U_i \quad (1)$$

$$\text{s.t. } |P_i| < \bar{P}_i \quad (2)$$

$$C_i = 1 \text{ 或 } 0 \quad (3)$$

式中: X_i 为第 i 条待选线路的长度, km; U_i 为第 i 条线路单位长度的造价, 万元; P_i 为第 i 条线路上的功率, 万 kW; \bar{P}_i 为第 i 条线路的允许传输功率, 万 kW; 其中, 第 i 条线路若被加入到网络中则 C_i 取 1, 反之 C_i 取 0, n 为待选线路总数。

1.2 启发式算法的计算步骤

电网规划的过程分为两个阶段: 第一阶段, 在现有网络基础上, 以线路总投资最小为目标, 根据有效性指标选择合适的线路加入网络, 使之满足正常状态的供电要求; 第二阶段, 在第一阶段得到的最小投资网架的基础上, 按照“ $N-1$ 检验”原则恰

当地增加一些线路使之满足可靠性要求。

两种规划方法第一阶段建立最小投资网络的方法不同, 第二阶段进行“ $N-1$ 检验”的步骤相同, 下面介绍两种方法在各个阶段的具体计算步骤。

1.2.1 逐步倒推法第一阶段计算步骤^[18-23]

逐步倒推法在规划之初, 需要根据目标年的数据构成一个虚拟网络, 该网络包含系统现有网络、所有孤立节点和所有待选线路, 这样的虚拟网络一般是连通的, 冗余度很高但不经济。然后对该虚拟网络进行潮流分析, 比较所有待选线路在系统中的作用和有效性, 逐步去除有效性低的线路, 直到网络中没有冗余线路为止, 即此时去掉网络中任何新建线路都会引起系统过负荷或者解列。

逐步倒推法认为投资小并且载流量大的线路有效性高, 并以此决定待选线路的取舍, 线路的有效性指标定义为

$$E_i = \frac{|P_i|}{C_i} \quad (4)$$

式中: P_i 为待选线路 i 上的潮流, 万 kW; C_i 为待选线路 i 的建设投资, 万元。

逐步倒推法第一阶段的计算流程如图 1 所示。

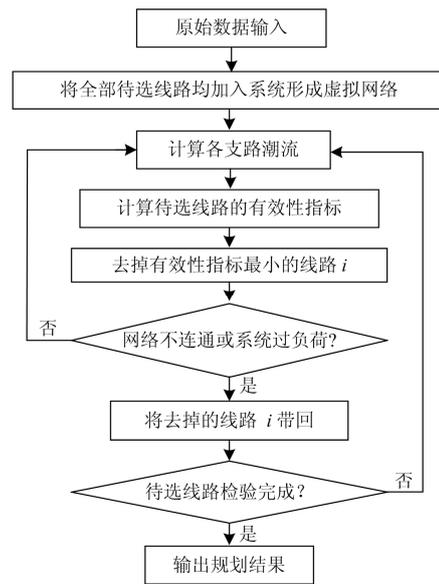


图 1 逐步倒推法第一阶段计算流程图

Fig. 1 Flow chart of the successive backward method in the first stage

1.2.2 逐步扩展法第一阶段计算步骤^[20-24]

逐步扩展法的初始网络一般是非连通的, 这样的网络不能进行潮流计算^[25], 通常的解决方法是将所有可扩展线路均用一条虚拟线路代替, 其电抗值一般要远大于正常电抗值(取 10^4 左右)。通过添加虚

拟线路的方式将整个网络改造成连通图后再进行潮流计算和进一步的规划。

逐步扩展法根据待选线路对降低原有过负荷支路负载率的程度来衡量其作用, 并根据有效性指标选择恰当的待选线路加入到网络中, 直到网络无过负荷为止。

若待选线路 i 可降低过负荷线路 k 的负载率, 则有效性指标 E_{ik} 表示为

$$E_{ik} = \frac{\Delta P_{ik}}{C_i} \quad (5)$$

式中: ΔP_{ik} 为待选线路 i 加入后, 过负荷线路 k 上的潮流变化量, 万 kW; C_i 为待选线路 i 的建设投资, 万元。

当系统中存在多条过负荷线路时, 应考虑新建线路 i 对所有过负荷线路的综合效益, 此时的综合有效性指标 E_i 表示为

$$E_i = \sum_{k \in Mol} E_{ik} \quad (6)$$

式中, Mol 为过负荷线路集。

逐步扩展法第一阶段的计算流程如图 2 所示。

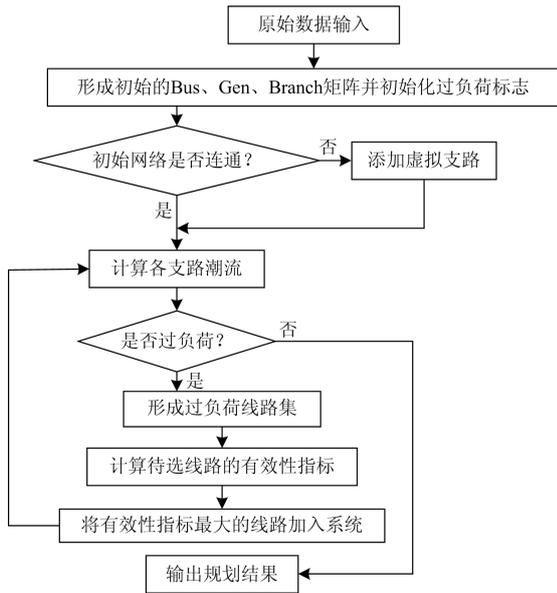


图 2 逐步扩展法第一阶段计算流程图

Fig. 2 Flow chart of the successive expand method in the first stage

1.2.3 两种算法第二阶段 $N-1$ 检验的步骤

为了保证输电系统的可靠性, 必须对两种方法在第一阶段得到的规划结果进行 $N-1$ 检验^[7], 具体的步骤如下。

(1) 对现有网络进行 $N-1$ 分析, 得到所有 $N-1$ 故障下的线路总过负荷值为

$$\Phi = \sum_{i \in M} \sum_{l \in Mol, oi} \max\{|\bar{P}_l - P_l|, 0\} \quad (7)$$

式中: M 为所有支路集; Mol, oi 为线路 i 断开时过负荷线路集, 如果 $\Phi=0$ 则转至步骤(5)。

(2) 从候选线路集任取一条线路加入网络, 然后按照步骤(1)进行 $N-1$ 分析, 得到新线加入后的 $N-1$ 故障总过负荷值 Φ' 。

(3) 计算各条待选线路的有效性指标。

$$E'_i = \frac{\Phi - \Phi'}{C_i} \quad (8)$$

(4) 将有效性指标最大的待选线路加入到网络, 然后再转至步骤(1)。

(5) 输出满足 $N-1$ 安全性要求的规划方案。

2 两种算法的比较

由于逐步倒推法和逐步扩展法在进行第二阶段 $N-1$ 检验时的计算步骤完全相同, 故本文主要研究在优化模型相同的条件下, 针对同一个算例, 两种规划方法在第一阶段规划过程中的异同点。

2.1 算例分析

本文采用参考文献[26]中的 18 节点算例对两种启发式算法的计算过程及结果进行对比分析。该系统现有 9 条线路, 10 个节点。在规划期间将增加到 18 个节点, 有 27 条可扩建线路, 系统初始状态如图 3 所示, 其中实线代表已有线路, 虚线代表候选的待建线路。

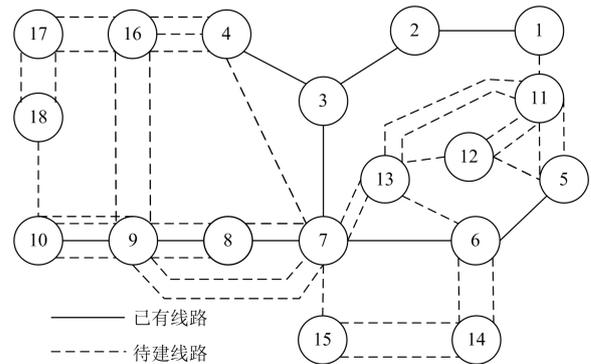


图 3 18 节点系统连接图

Fig. 3 Network of 18-node system

2.1.1 逐步倒推法第一阶段计算结果

按照图 1 的步骤进行计算, 得到的规划结果如图 4 所示。

图 4 中实线代表原有线路, 虚线代表选中的待建线路。新建线路共计 14 条, 总长度为 1 615 km, 此规划结果与参考文献[26]中所给出的最优规划结果一致。

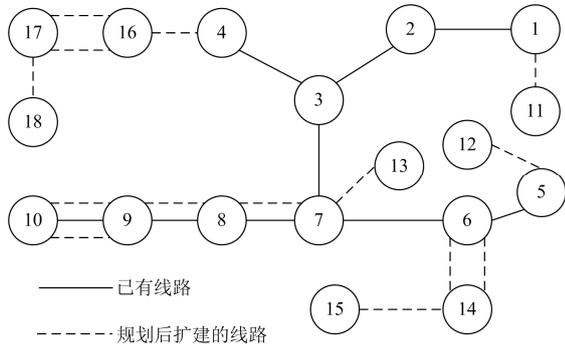


图 4 逐步倒推法第一阶段规划结果图

Fig. 4 Planning result diagram of the successive backward method in the first stage

2.1.2 逐步扩展法第一阶段计算结果

按照图 2 的步骤对 18 节点算例进行计算, 得到的规划结果如图 5 所示。

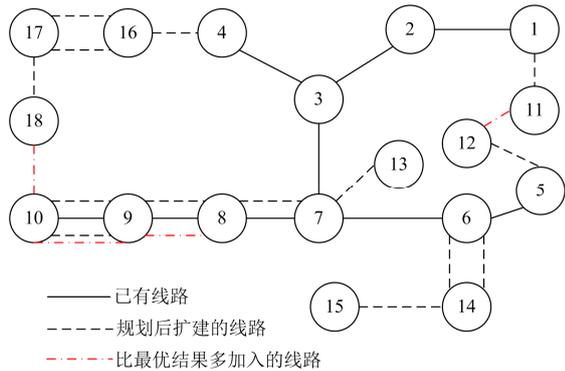


图 5 逐步扩展法第一阶段规划结果图

Fig. 5 Planning result diagram of the successive expand method in the first stage

采用逐步扩展法规划后新建线路 18 条, 总长度为 2 005 km。将此计算结果与参考文献[26]中的最优规划结果对比可知, 采用逐步扩展法得到的结果比最优规划结果多出 4 条线路, 在图 5 中用点划线表示, 分别为: 10-18、9-10、8-9 及 11-12。

2.2 两种方法规划结果的比较分析

2.2.1 两种方法规划结果的对比

比较上节中第一阶段的规划结果可以发现: 逐步倒推法的结果优于逐步扩展法。

假设各条线路的单位造价 U_i 相同, 由式(1)可知, 线路的总投资 M 与 $\sum_{i=1}^n X_i$ 成正比, 即扩建线路的总长度越小, 网络的投资越少。由上述 18 节点算例的规划结果可知, 逐步倒推法扩建线路的总长度为 1 615 km, 逐步扩展法的为 2 005 km, 故在经济性方面逐步倒推法优于逐步扩展法。其次在程序运

行时间上, 逐步扩展法的计算时间为 7.893 4 s, 逐步倒推法的为 2.703 9 s, 逐步扩展法的计算时间是逐步倒推法的 2.9 倍, 故在效率上逐步倒推法亦优于逐步扩展法。逐步扩展法在规划结果上不理想, 也限制了其提供网架过渡方案的优势。

2.2.2 对逐步扩展法进行分析

针对上述问题, 需对逐步扩展法第一阶段的规划步骤进行分析, 以找出其规划结果不尽合理的原因。逐步扩展法规划结果中新建的 18 条线路加入顺序如表 1 所示。

表 1 待选线路的加入顺序

Table 1 Order of the lines to be selected

加入顺序号	线路首末节点	加入顺序号	线路首末节点
1	5-12	10	6-14
2	8-9	11	14-15
3	1-11	12	17-18
4	16-17	13	9-10
5	8-9	14	9-10
6	7-8	15	10-18
7	16-17	16	6-14
8	7-13	17	11-12
9	9-10	18	4-16

由表 1 可知, 比最优结果多出的 4 条线路分别 在第 5、14、15 和 17 次被新建。这些线路的扩建主要集中在第 13 次之后, 故对第 14 次待选线路的加入过程进行分析。

在进行第 14 次线路建设前, 网络已按照表 1 的顺序建设了 13 条线路, 之后线路 9-10、10-18、6-14、11-12 和 4-16 因有效性指标计算值大而被依次选中。现以这 5 条线路为例, 模拟第 14 次待选线路的筛选过程。表 2 是这 5 条待选线路加入前和分别加入后原有过负荷线路上的功率变化情况, “—”表示待选线路加入后对原有过负荷线路无影响。表格第一列表示 13 条线路加入后, 网络中仍然过负荷的线路, 前 4 条为已有线路, 其余的为虚拟线路(已有线路的容量为 230 万 kW, 虚拟线路的容量为 0.023 万 kW)。根据式(5)和式(6)计算得到这 5 条线路分别加入时的有效性指标依次为: 0.885 0、0.519 6、0.699 9、0.000 8、0.785 0, 按照逐步扩展法的计算流程, 在第 14 次应该加入有效性指标计算值最大的线路 9-10。

但观察表 2 可以发现, 线路 9-10 的加入只能消除 3 条线路的过负荷, 而若加入线路 4-16 则可以消除 8 条线路的过负荷, 且有 7 条过负荷线路上的功率被降低到线路允许值以下。线路 4-16 对网络过负荷的消除能力强, 若在第 14 次将其加入到网络中, 则不需要再新建线路 9-10 和 11-12。其之所以没有

被及时扩建到网络中, 是因为扩展法的有效性指标考虑的是待选线路加入后对原过负荷线路过负荷的消除总量, 但在以网络的线路总投资最小为目标函数的前提下, 只要加入的待选线路能够保证网络不过载即可, 并不需要考虑消除量的多少。例如, 虽然新建线路 9-10 与新建线路 4-16 对三条过负荷线

路 9-10 的消除程度不同, 但它们都能使过负荷线路的容量减小到允许范围之内, 对于目标函数而言它们的消除作用应是等效的。正因有效性指标的这点不完善, 导致扩展法比最优结果多加入了线路 8-9、9-10 和 11-12。

表 2 待选线路加入前后过负荷支路上的功率

Table 2 Power of the overload line before and after the selected lines are added

过负荷支路 k	待选线路加入前支路 k 上的功率	5 条待选线路分别加入后支路 k 上的功率				
		9-10	10-18	6-14	11-12	4-16
6-14	-307.95	—	—	-153.99	—	—
9-10	-236.00	-177	-253.64	—	—	-218.66
9-10	-236.00	-177	-253.64	—	—	-218.66
9-10	-236.00	-177	-253.64	—	—	-218.66
4-16	-26.51	—	-0.06	—	—	-0.01
5-11	0.03	—	0.04	—	0.02	0.02
6-14	-0.03	—	—	-0.02	—	—
9-16	-26.49	—	-0.04	—	—	-0.01
10-18	-52.00	—	-0.01	—	—	-0.03
11-12	-0.03	—	—	—	0	-0.01

由 2.1.2 节中的结果可知, 逐步扩展法还比最优结果多建了线路 10-18, 其加入的原因为: 规划之初为保证连通性将所有可扩展线路均用一条虚拟线路代替, 而这些虚拟线路可能存在冗余的情况。按照扩展法的规划步骤, 在线路扩建的过程中需要消除包括虚拟线路在内的全部线路的过负荷, 故为了消除初始冗余虚拟线路上的过负荷可能会导致多余线路的加入。例如, 由 2.1.1 节中的结果可知, 最优结果未加入线路 10-18 也能满足网络的需求, 说明初始加入的虚拟线路 10-18 是冗余的。但由于其一直处于过负荷状态, 在扩展法计算过程中为消除其上的过负荷不得不多加入线路 10-18。

综上所述, 逐步扩展法第一阶段计算结果不佳的原因主要分为两点: 一是有效性指标不够完善; 二是初始网络添加的虚拟线路存在冗余。

3 改进的逐步扩展法

3.1 改进思路及方法

通过上述分析可知, 逐步扩展法第一阶段规划结果不理想主要包括有效性指标不完善和虚拟线路存在冗余情况两点原因, 因此就这两点原因对扩展法提出改进。

按照本文规划的数学模型, 只要加入的待选线路能将原有线路的过负荷消减到允许容量以下即可, 具体消除量的大小并不会对目标函数产生影响, 故对扩展法的有效性指标按式(9)进行修改。

$$E_{ik} = \begin{cases} \frac{|P_k| - |P_{ik}|}{C_i}, & |P_{ik}| > \bar{P}_k \\ \frac{|P_k| - \bar{P}_k}{C_i}, & |P_{ik}| \leq \bar{P}_k \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_k 表示加入待选线路 i 前过负荷线路 k 上的潮流; P_{ik} 表示待选线路 i 加入后过负荷线路 k 上的潮流; \bar{P}_k 表示线路 k 上的允许容量。

当待选线路对多条过负荷线路均产生影响时, 需要考虑其综合效益, 有效性指标仍按照式(6)进行计算。

网络初始加入的虚拟线路可能存在冗余现象, 且在扩建过程中这些冗余虚拟线路上的过负荷不需要被消除。针对这一问题对扩展法的规划步骤进行如下改进: 在每次新的线路选中后, 去掉网络中的全部虚拟线路, 判断此时网络的连通性及是否存在线路过负荷, 若已能满足网络需求则停止计算, 否则加回虚拟线路继续计算。

3.2 改进的逐步扩展法计算步骤

以输电网络线路的总投资最小为目标函数, 在保证系统连通且不过负荷的条件下, 通过下面的迭代步骤形成满足要求的改进的逐步扩展法第一阶段规划方案。

(1) 输入原始数据, 判断初始网络是否连通, 若不连通则加入虚拟线路, 然后转至步骤(2), 若连通直接转至步骤(2);

- (2) 计算该网络中各个支路的潮流;
- (3) 判断各支路是否过负荷,若过负荷转至步骤(4), 否则转至步骤(6);
- (4) 形成过负荷线路集, 按照 3.1 节中的改进公式计算待选线路的有效性指标, 并将有效性指标计算值最大的线路加入到网络中;
- (5) 去掉网络中全部虚拟线路, 判断此时的网络是否不过载且连通, 若是则转至步骤(6), 否则将虚拟线路加回, 转至步骤(2);
- (6) 输出规划结果。

改进的逐步扩展法第一阶段计算流程如图 6 所示, 虚线框内为新增步骤。在此规划结果的基础上按照 1.2.3 节中的步骤对网络进行 $N-1$ 检验即可完成网络的整体规划。

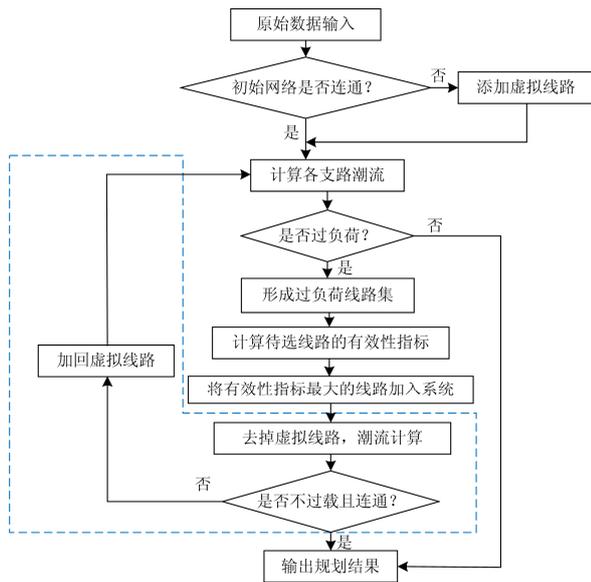


图 6 逐步扩展法改进后的计算流程图

Fig. 6 Flow chart of the improved successive expand method

3.3 算例分析

为了检验改进的逐步扩展法在第一阶段的规划效果, 仍采用参考文献[26]中的 18 节点算例进行验证, 通过计算得到的规划结果与图 4 相同, 即改进后的逐步扩展法能得到最优结果。

通过对其有效性指标的完善, 剔除了之前规划结果中冗余的线路 8-9、9-10 和 11-12。在新一轮线路选择前, 对去掉虚拟线路的网络是否满足约束条件进行判断, 解决了初始网络虚拟支路可能存在的冗余问题, 剔除了之前规划结果中冗余的线路 10-18。

逐步扩展法的计算时间为 7.893 4 s, 改进后的计算时间为 8.244 6 s, 计算时间虽增加了 4.4%, 但保证了规划结果的正确与最优, 使扩展法提供过渡

方案的优势充分发挥出来, 故本文提出的改进方法具有很强的实用性。

3.4 改进的逐步扩展法与逐步倒推法的比较

在规划的第一阶段, 改进的逐步扩展法能与逐步倒推法一样得到最优结果, 由于两种方法“ $N-1$ 检验”的步骤相同, 故两种方法最终能得到相同的规划结果。但改进前后逐步扩展法的计算时间都长于逐步倒推法是因为: 两种方法在规划时调用潮流计算的次数相差较大, 假设网络中现有 n 条待选线路, 规划后选中 m 条待建线路, 则逐步扩展法需要调用潮流计算的次数可由式(10)计算。

$$T = \sum_{j=1}^m n_j \tag{10}$$

$$n_1 = n \tag{11}$$

$$n_j = n_1 - j + 1 \tag{12}$$

式中, n_j 表示第 j 次线路选择时需要调用的潮流计算次数。实际上, 每进行一次线路的选择, 需要调用潮流计算的次数等于此时网络中待选线路的条数。且每选中一条线路后, 待选线路的数量就减小 1, 故再次进行线路选择时所调用潮流计算的次数也比上一次减少 1, 即为式(11)和式(12)所表达的含义。

根据逐步倒推法的计算步骤, 其调用潮流计算的总次数可由式(13)计算得到。

$$T = n - m \tag{13}$$

逐步倒推法, 每进行一次线路的选择, 只需要调用一次潮流计算, 故其调用潮流计算的总次数与剔除待选线路的总条数相同。在本文的算例中, 采用逐步扩展法进行规划共调用潮流计算 495 次, 而逐步倒推法只调用 22 次, 故采用逐步扩展法的计算时间稍长。而改进的逐步扩展法在原有扩展法的基础上增加了一些改进步骤, 故在计算时间上又略有提高。

在实际网络规划建设的过程中, 往往需要逐年安排建设项目, 这时就需要得到从初始网架到目标网架的过渡方案。逐步扩展法的计算过程与实际输电网络建设的过程较为类似, 其规划结果可为线路的逐年建设计划提供参考方案。而采用逐步倒推法进行规划只能得到最终的规划结果, 故在此方面, 逐步扩展法有着逐步倒推法无法代替的优势。

综上所述, 两种方法有其各自的优势, 在实际规划过程中可以根据需求选择适用的方法进行规划, 本文的研究结果也为输电网规划方法的选择提供了依据。

4 结论

本文研究分析了两种常用启发式电网规划算法

的有效性指标、规划步骤和规划结果, 经算例验证得出下列结论:

(1) 针对同一个输电网络规划问题, 采用相同的优化模型, 现有两种算法在第一阶段的规划结果并不相同, 其中采用逐步倒推法得到的结果优于逐步扩展法。

(2) 逐步扩展法规划结果较差的原因有两方面: 一是有效性指标不够完善; 二是初始网络添加的虚拟线路存在冗余。

(3) 本文提出改进的逐步扩展法, 经算例验证能够得到最优规划结果, 随后深入分析了两种规划方法各自的优缺点, 为输电网络规划方法的选择提供了参考。

参考文献

- [1] YADAV A, DASH Y, ASHOK V. ANN based directional relaying scheme for protection of Korba-Bhilai transmission line of Chhattisgarh state[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 128-144. DOI: 10.1186/s41601-016-0029-6.
- [2] PATTANAIK J K, BASU M, DASH D P. Review on application and comparison of metaheuristic techniques to multi-area economic dispatch problem[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 178-188. DOI: 10.1186/s41601-017-0049-x.
- [3] SHARIFNIA A, AASHTIANI H Z. Transmission network planning: a method for synthesis of minimum-cost secure networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, 1985, 104(8): 2025-2034.
- [4] 程乐园, 党彬, 王鑫, 等. 基于改进仿电磁学算法的多目标电网规划方案研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(12): 70-76.
CHENG Leyuan, DANG Bin, WANG Xin, et al. Research on multi-objective grid planning scheme based on improved imitation electromagnetism algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(12): 70-76.
- [5] LATORRE G, CRUZ R D, AREIZA J M, et al. Classification of publications and models on transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power System, 2003, 18(2): 938-946.
- [6] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 基于蚁群最优的输电网络扩展规划[J]. 电网技术, 2001, 25(6): 21-24.
CHEN Genjun, WANG Lei, TANG Guoqing. An ant colony optimization method for transmission network expansion planning[J]. Power System Technology, 2001, 25(6): 21-24.
- [7] 康庆平, 庄丽晖. 一个实用的启发式电网优化规划方法[J]. 电网技术, 1993, 17(3): 51-55.
KANG Qingping, ZHUANG Lihui. Optimum planning of transmission network: a practical heuristic method[J]. Power System Technology, 1993, 17(3): 51-55.
- [8] 万卫, 王淳. 启发式逐步扩展法在电网扩展规划中的应用[J]. 江西电力, 2007, 31(6): 13-15.
WAN Wei, WANG Chun. Application of heuristic successive expand method in power grid expansion planning[J]. Jiangxi Electric Power, 2007, 31(6): 13-15.
- [9] 韩晓慧, 王联国. 输电网优化规划模型及算法分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 143-148, 154.
HAN Xiaohui, WANG Lianguo. Review of transmission network optimal planning model and algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 143-148, 154.
- [10] CUI S W, AI X, DONG R X, et al. Electric vehicle charging station planning based on sensitivity analysis[C] // 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Aug 31-Sept 3, 2014, Beijing, China: 1-5.
- [11] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于灵敏度和潮流熵的线路过负荷控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 58-66.
YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Control strategy for line overload based on sensitivity and power flow entropy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 58-66.
- [12] 张艺博, 潘文霞, 郭家圣. 基于灵敏度分析的双馈电机短路电流简化计算[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(5): 6-12.
ZHANG Yibo, PAN Wenxia, GU Jiasheng. Simplified calculation of short-circuit current for doubly fed induction generator based on sensitivity analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(5): 6-12.
- [13] 翟海保, 程浩忠, 陈春霖, 等. 输电网络优化规划研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(2): 17-23.
ZHAI Haibao, CHENG Haozhong, CHEN Chunlin, et al. Review of transmission network optimal planning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(2): 17-23.
- [14] 王东平, 汪旭, 杨兵, 等. 电网结构规划的启发式方法[J]. 电工技术, 2002(1): 5-6.
WANG Dongping, WANG Xu, YANG Bing, et al. Heuristic method for power grid structure planning[J]. Electric Engineering, 2002(1): 5-6.
- [15] 王东平, 黄山, 汪旭, 等. 基于启发方式的地方电网结构规划及其应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(3): 64-65, 70.

- WANG Dongping, HUANG Shan, WANG Xu, et al. Heuristic method based frame planning of local electric power network and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3): 64-65, 70.
- [16] 秦茹静, 王淳, 苏慧玲, 等. 考虑 N-1 安全性的输电网络启发式扩展规划方法[J]. 继电器, 2007, 35(13): 30-32, 38.
- QIN Rujing, WANG Chun, SU Huiling, et al. A heuristic method for transmission network expansion planning considering N-1 security[J]. Relay, 2007, 35(13): 30-32, 38.
- [17] 范宏, 程浩忠, 张节潭, 等. 考虑电力系统安全的输电网络规划[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 35-38, 73.
- FAN Hong, CHENG Haozhong, ZHANG Jietan, et al. Transmission network planning considering electric power system security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 35-38, 73.
- [18] EI-SOBKI S M, EI-METWALLY M M, FARRAG M A. New approach for planning high-voltage transmission networks[J]. IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, 1986, 133(5): 256-262.
- [19] 王淳, 欧阳年会. 基于逐步倒推法的多阶段输电网络规划[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(4): 25-28.
- WANG Chun, OUYANG Nianhui. A backward step by step method for multistage transmission network planning[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(4): 25-28.
- [20] 程浩忠, 张焰. 电力网络规划的方法与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 137-142.
- [21] 程浩忠, 张焰, 严正, 等. 电力系统规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 138-150.
- [22] 吕莎. 基于逐步倒推法结合 MPATPOWER 潮流计算的地市级电网网架规划方法[J]. 湖北电力, 2012, 36(4): 6-8.
- LÜ Sha. Study on successive backward method combined with MATPOWER power flow calculation for regional power grid frame planning[J]. Hubei Electric Power, 2012, 36(4): 6-8.
- [23] 王淳, 欧阳年会. 考虑不确定因素的逐步倒推法电网规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 50-53.
- WANG Chun, OUYANG Nianhui. Successive backward method for network planning considering uncertainty factors[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2011, 23(2): 50-53.
- [24] ALBUYEH F, SKILES J J. A transmission network planning method for comparative studies[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(4): 1679-1684.
- [25] 吴素农, 于金镒, 田庄, 等. 基于扩展节点法的交直流混合电网统一潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 40-47.
- WU Sunong, YU Jinyi, TIAN Zhuang, et al. A unified power flow algorithm for AC/DC hybrid networks using modified augmented nodal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 40-47.
- [26] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 269-293.

收稿日期: 2018-09-11; 修回日期: 2018-11-01

作者简介:

郑爽(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网优化规划; E-mail: 670240230@qq.com

杨晓楠(1990—), 女, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化、智能电网调度自动化网络分析; E-mail: yangxiaonan@epri.sgcc.com.cn

句荣滨(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: jrb@ln.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)