

[配电网降损]

改进遗传算法的新型配电网降损方案研究

文/刘锋

四川旻投共创电力工程设计有限公司南京分公司

节能降损是配电网改造的重要目标，合理的降损方案依赖于科学的数学模型建立。首先根据线损成因对可行的降损方式及措施进行梳理，为降损方案组合优化提供方案库。其次基于经济效益和社会效益的统筹考量，建立面向双目标协同优化的降损方案辅助决策模型。其中，双目标是指降损方案执行可节省的购电费用支出与可减少的碳排放罚金最大化，为方案实施所需的综合投资最小化。模型约束包括相关线路维持正常运行所需的电气量限制、降损方案库成员总数限制和总投资限制等。再次，依托自适应遗传算法确立模型求解步序和流程。最后实证检验表明：建立的模型一方面可提升供电公司的运营效益；另一方面有助于环保大局的推进，具有较大的参考价值。

当前技术条件下，电力生产以火力发电为主^[1]。因此，虽然电能是二次能源形式，但在很大程度上仍可将其视作一次能源（石油、煤等）的延续^[2]。一次能源以其不可再生性，日趋紧张是必然的；另外，在一次能源使用过程中，由于大量碳排放造成环境状况的不断恶化。基于以上，世界范围内逐渐形成“节能减排”的共识^[3]。从电力层面讲，除推广节能电器、提倡智能用电外，降低配电网线损是迎合“节能减排”的主要途径^[4]。电网损耗不能完全规避，但过大的损耗一方面影响供电公司的效益（线损集中于计量点之前，由供电公司承担）；另一方面也增加电力生产中无谓的碳排放^[5]。我国是用电大国，且正在建设智能电网，理应在降损节能上有所作为，以示表率。

降损方案库建立

对于配电网来说，降损的对象主要指的是“线损”^[11]。因此，以“线损成因”为导引进行降损方式的对应罗列，如图1所示。由图1可知：对于每

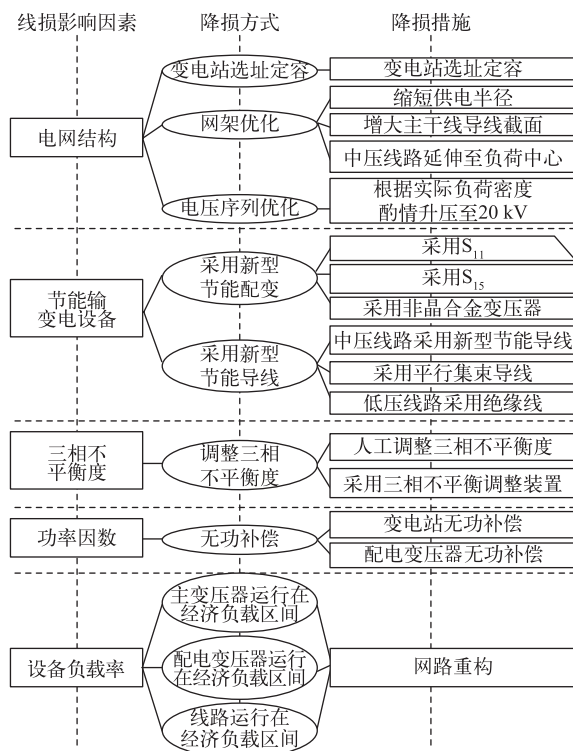


图1 配电网降损方案库

个“线损致因”，一般存在若干个降损方式可以解决，而每个降损方式又由若干个降损措施进行“拱卫”，这样就形成了层次明晰、内容完备的降损方案库，为降损工作的具体开展奠定有效基础。

降损方案组合优化的辅助决策建模

因供电公司是配电网运维、管理的主要承担者，因此降损工作一般由供电公司具体负责。对于供电公司来说，自然希望以最小的投入获得最大的降损效果（降损越多，其能削减的购电费就越多）。另外，前文已述及，在环保为重的当下，减少碳排放或者考虑低碳效益也是衡量配电网改造有效度的一大标杆。因此，建立目标函数为

$$\max F = F_1 + F_2 - \sum_{i=1}^n C_i \quad (1)$$

式中， F_1 为降损带来的购电费降幅，万元； F_2 为降损带来的碳排放罚金降幅，万元； C_i 为对应于降损措施 i 的资金投入，万元； n 为参与降损组合方案的措施总数。

F_1 、 F_2 、 C_i 的详细计算（各算子的含义见式中相应位置的中文表述）为

$$\begin{cases} C_i = C_i^1 + C_i^2 + C_i^3 \\ F_1 = \Delta W \times d_1 \\ F_2 = \Delta W \times f \end{cases} \quad (2)$$

$$f = \rho \times Q \times d_2 \quad (3)$$

$$Q = \frac{p}{q \times \eta} \quad (4)$$

式中， C_i^1 为设备购置费； C_i^2 为设备拆除费； C_i^3 为安装重建费； ΔW 为降损电能； d_1 为电价； f 为单位发电量碳排放罚金； ρ 为火电比重； Q 为单位发电量的碳排放量； d_2 为碳排放罚金； p 为单位（每吨）燃料碳排放量； q 为单位（每吨）燃料发热量； η 为能量转换率。

式（2）～式（4）中： ΔW 的单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ， d_1 取 $0.4 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ （按我国平均情况考虑）， ρ 取 0.65 （按我国情况）， d_2 取 $0.2 \text{ 元}/\text{kg}$ （按我国平均情况考虑）， p 取 $2.53 \text{ kg CO}_2/\text{kg Coal}$ ， q 取 $26\,789.12 \text{ kJ}/\text{kg Coal}$ ， η 取 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}/3\,600 \text{ kJ}^{[15]}$ 。

进行降损改造的前提是保证配电网能够保持正常、稳定运行，因此，必要的电气量限制是模型求解的约束之一。此外，基于合理性、经济性考虑，可选的降损措施的总数、可接受的投资总额等也应

成为模型约束。因此提出约束体系（ U_i 、 U_N 的单位为 kV ， I_j 、 $I_{j\max}$ 的单位为 A ， C 的单位为万元）为

$$\begin{cases} \text{电压偏差} & \Delta U\% = \frac{U_i - U_N}{U_N} \times 100\% \\ & \in [-10\%, 5\%] \\ \text{支路约束} & I_j \leq I_{j\max} \\ \text{降损措施数量约束} & n \leq N \\ \text{总投资限制约束} & \sum_{i=1}^n C_i \leq C \end{cases} \quad (5)$$

模型求解方法

1. 整体框架

从完备性上讲，降损方案的组成形式不外乎两类情形^[6]：①单个降损措施构成一个方案；②数个降损措施进行组合以形成一个方案。对于含 n 个降损措施的方案库来说，理论上可产生的降损方案总数应该为“ 2^n ”。模型求解的实质就是：按照目标函数和约束条件对这 2^n 个方案作逐一比对，选出性价比最高的那个。显然，这是个基于“0-1”决策的枚举问题（0代表某方案未被选中，1代表某方案被选中）。鉴于该类问题存在搜索范围大、易限于局部最优等特点，参照文献[8]的做法，选择自适应遗传算法以应对（该算法的本质是迭代尝试，但可根据迭代后子代的适应度值进行交叉率、变异率等要素的动态调整，从而收敛性更佳），整体运作流程图如图2所示。

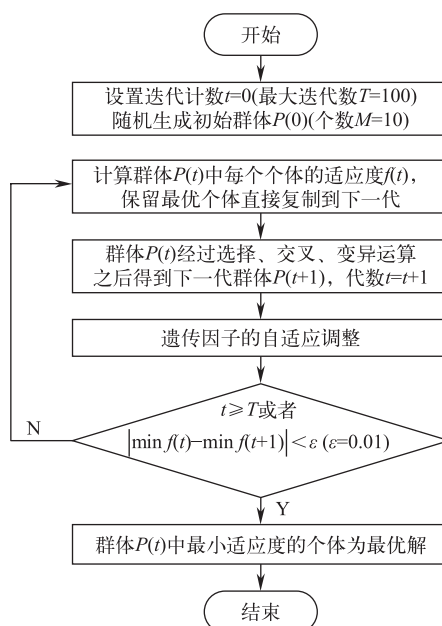


图2 基于自适应遗传算法的降损方案搜索流程

2. 部分细节阐述

采用自适应遗传算法，首先需要对问题进行编码。前已述及，对理论上存在的每个降损方案都可用0-1变量进行表征，推而广之，也可用0-1变量来表示某单项降损措施有无出现在最后的方案中。因此，可将降损方案描述转化为一定长度的二进制编码。举例：如降损方案库有A、B、C三个降损措施，那么可用001、010、100、011、101、110、111七个二进制代码表示全部的降损方案（001表示方案中仅含措施C，依此类推）。

自适应遗传算法依靠适应度函数进行搜索指引^[13]。在本文中，以约束条件为适应度函数主体，并附加惩罚项，计算公式为

$$f = F + \alpha\mu(\Delta U\% - \Delta U\%_s) + \beta\mu(I_j - I_{\max}) + \gamma\mu(n - N) + \lambda\mu(\sum C_i - C) \quad (6)$$

$$\mu(x_i) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中， α 、 β 、 γ 和 λ 为惩罚因子。

遗传操作的主要环节如图3所示。

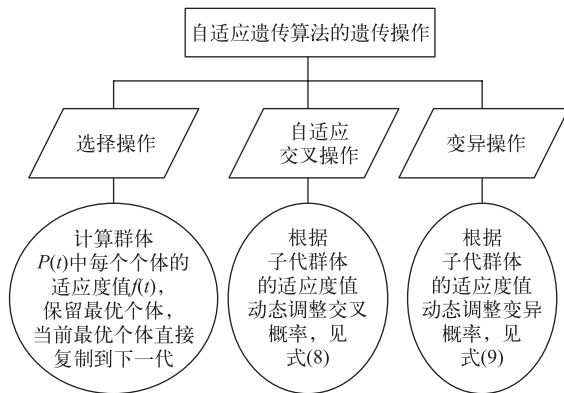


图3 自适应遗传算法的遗传操作主要环节

$$P_c = \begin{cases} \frac{P_{c\max}(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{av}} & (f' \geq f_{av}) \\ P_{c\min} & (f' < f_{av}) \end{cases} \quad (8)$$

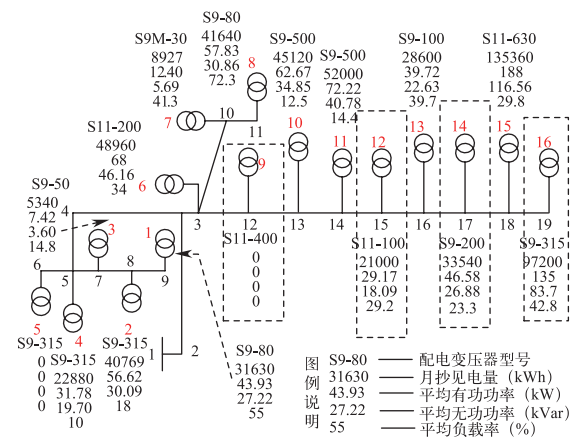
式中， $f_{\max}$ 、 f_{av} 分别为群体的最大适应度和平均适应度； f' 为参与交叉的两个个体中较大的适应度； $P_{c\max}$ 、 $P_{c\min}$ 分别为最大、最小交叉概率。

$$P_m = \begin{cases} \frac{P_{m\max}(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{av}} & (f \geq f_{av}) \\ P_{m\min} & (f < f_{av}) \end{cases} \quad (9)$$

式中， f 为变异个体的适应度； $P_{m\max}$ 、 $P_{m\min}$ 分别为最大、最小变异概率。

应用案例

以东部某10 kV线路为例，其拓扑如图4所示。图中还将各配电变压器的主要运行信息予以展示，将配电网改造的一些工程费用计算方式予以说明（综合相关文献和实际调研而确定）。限于篇幅，其他数据（导线线规、无功配置等）不一一罗列。



工程费用说明：
1、S11-200变压器价格为15 000元/台；
2、更换配电变压器所需拆装费为设备购置费的30%；
3、线路改造（更换导线截面）费用按线路综合投资费用计；
4、无功补偿设备的购置费和安装费均为20元/kVar。

图4 案例10 kV线路的拓扑及相关运行信息

将上述所建模型进行实际应用。

(1) 配电网损耗成因分析

根据案例的设备配置情况，可知其运行短板主要是：①高能耗配电变压器占比较大；②一些线路的导线截面面积偏小；③无功补偿不甚科学。

(2) 降损措施初拟

基于上面的线损成因分析，结合工程实施可能性（主要考虑停电、投资等因素），制定以下具备可操作性的降损措施（为后续阐述方便性，对每项措施赋予一个编号）：①导线改造方案A。将“节点1→节点2”、“节点2→节点3”、“节点3→节点12”等3条线路的线径由70变为120；②导线改造方案B。将“节点16→节点17”、“节点17→节点18”、“节点18→节点19”等3条线路的线径由95变为120；③配电变压器更换。将负载最严重的配电变压器8换为S11—400。④改善无功补偿。通过在配电变压器低压侧配置动态无功补偿设备的方式使线路的 $\cos\varphi$ 达到0.9。

(3) 最优降损方案的确定

按式（1）～式（9），遵循图2流程，经由初

始化设置、个体评价、遗传操作、循环迭代和收敛判断等计算环节，得到结果见表1（各项费用按方案全寿命周期10年进行年均分摊）。

表1 基于案例数据的最优降损方案计算结果

降损措施编号	方案对应的二进制编码	
	最优解情形	次优解情形
①	0	0
②	0	0
③	0	1
④	1	0
年降损带来的购电费节省/元	987 60	98 333
年降损带来的碳排放罚金节省/元	21 328	19 987
改造工程需要的年投资/元	4 830	4 024
目标函数/元	115 258	113 828

由表1可知，就本案例来说：最优的降损方案为“无功补偿改善”这一单项措施（即非几种措施的组合体）。对比最优解和次优解可发现：虽然次优解的年投资额明显要少，但其带来的购电费节省以及低碳效益不如最优解，从而导致整体效果非最优。从另一个角度分析：若不计及低碳效益，则最优解对应的目标函数变为93 930元（相当于原目标函数中去除“碳排放罚金节省数”，下同），次优解对应的目标函数变为94 309元，按照这个结果应该选择次优解对应的降损方案进行实施，但明显该方案的低碳效益较为逊色，不利于整个社会利益的体现，这也说明本文将低碳效益纳入考量的科学性。

结束语

配电网降损不但关乎供电公司效益，也牵涉环保大局。作为社会公用事业，供电公司在进行配电网节能改造时应充分考虑降损所带来的低碳效益，从而使降损方案择定更能体现全社会的利益关

切。本文依托线性规划方法、自适应遗传算法等工具，构建考虑低碳效益的配电网降损方案辅助决策模型。算例表明，本文所开展的研究工作兼顾经济性、实用性和可操作性，并响应国家“节能减排”战略，可在一定程度上作为电力企业降损决策的有益参考。**EA**

（收稿日期：2024-12-04）

参考文献

- [1] 刘健，段璟靓．配电网极限线损分析及降损措施优化[J]．电力系统保护与控制，2013，39(1): 2-8.
- [2] 应丽云，刘敏，邓磊，等．配电网降损综述[J]．电力系统保护与控制，2017，41(15): 100-106.
- [3] 张恺凯，杨秀媛，卜从容，等．基于负荷实测的配电网理论线损分析及降损对策[J]．中国电机工程学报，2018，46(11): 156-159.
- [4] 田鑫，牛新生，朱秀波，等．低碳背景下山东电网最优降损策略及评估方法[J]．电力系统自动化，2014，35(16): 99-104.
- [5] 焦明明，杨仁刚，牛焕娜．配电网高低压综合电压/无功优化方法[J]．电力系统保护与控制，2016，40(4): 1265-1270.
- [6] 杨文锋，王彬宇，程卓，等．城市中低压配电网降损规划决策方法[J]．电网技术，2019，10(2): 66-70.
- [7] 邱泽晶，向铁元，陈红坤，等．改进灰关联的配电网降损潜力评估[J]．中国农村水利水电，2018，46(6): 97-105.
- [8] 龙禹，王小英，周琪，等．考虑最大供电能力指标约束的配电网降损重构[J]．电力系统及其自动化学报，2017，37(23): 78-82.

