

DOI: 10.7667/PSPC170718

## 基于全寿命周期成本的配电网无功规划研究

徐玉琴, 刘杨, 谢庆

(华北电力大学, 河北 保定 071003)

**摘要:** 在保证电能质量的基础上, 评价一个无功优化补偿方案应该以项目寿命周期内的投资净收益为指标, 即一个无功补偿方案不仅需要考虑到损耗降低所带来的收益, 还要考虑到由于无功补偿设备寿命周期内建设、运行维护直至报废等成本的增加。综合系统有功网损最小、电压质量最好建立配电网无功优化模型, 利用无功二次电阻矩确定无功补偿点, 根据改进的遗传算法确定无功补偿的容量, 通过引入全寿命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)的概念, 对于不同的补偿方案进行计及全寿命周期成本的计算, 以寿命周期内投资净收益为判断依据选定补偿方案。在Matlab上以IEEE33节点配电系统为例进行仿真计算, 结果表明, 采用计及全寿命周期成本的无功优化在实际中更具有合理性和有效性。

**关键词:** 无功优化; 投资净收益; 无功二次电阻矩; 改进遗传算法; 全寿命周期成本

### Research on reactive power planning of distribution network based on life cycle cost

XU Yuqin, LIU Yang, XIE Qing

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Based on ensuring power quality, the evaluation of a scheme about reactive power optimization compensation should be focused on net investment income in the life cycle of a project, in other words, a scheme about reactive power compensation should consider not only the benefits brought by loss reduction, but also the increased cost of construction, operation and maintenance in life cycle of the reactive power compensation equipment. In this paper, the reactive power optimization model of distribution network is established with the minimum active network loss and the best voltage quality, the reactive power compensation point is determined depending on reactive secondary resistance moment, and the capacity of reactive power compensation is decided by using the improved genetic algorithm. By introducing the concept of Life Cycle Cost (LCC), the calculation of life cycle cost for different compensation schemes is carried out to select compensation scheme according to the net income during the life cycle. The IEEE33 node distribution system is taken as an example to simulate the calculation in Matlab. The results show that the reactive power optimization considering the life cycle cost is more reasonable and effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307060) and State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (No. LAPS14011).

**Key words:** reactive power optimization; net investment income; reactive secondary resistance moment; improved genetic algorithm; life cycle cost

## 0 引言

随着经济的发展, 地区工业、农业电力负荷的增加使配电网薄弱的问题愈发凸显, 无功不足会引发电能质量低、设备损耗增加、老化易损等危害,

甚至有可能电压崩溃, 造成电网大面积停电。

作为电力规划中重要的一环, 配电网无功规划优化是一个多目标、多约束的非线性组合优化问题<sup>[1-2]</sup>, 通过一些数学方法确定无功补偿设备的安装位置、补偿容量, 从而达到降低网损、提高电压质量的目标。目前, 多数规划方案<sup>[3-6]</sup>的经济性评价一般只体现在初始投资的计算, 初始投资成本多只考虑购买设备的费用, 勘测设计评估以及设备安装调

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51307060); 新能源电力系统国家重点实验室开放基金项目(LAPS14011)

试的费用容易被忽视, 而运营期的维护成本(如每年例行试验检测、故障成本以及人工费用等)占比最大的运维成本常被粗略计算, 所以对建成后的运维成本以及故障成本考虑不足, 将导致规划方案的经济性评估不够科学全面, 可能会导致运营结果与规划预期不符的情况。

本文通过引入全寿命周期成本<sup>[7-9]</sup>的概念, 建立较为完善的评价指标体系, 研究在设备的寿命周期内新增无功补偿设备投资维护成本和降低网损所带来的投资净收益最大的问题。

## 1 配电网无功规划数学模型

### 1.1 目标函数

配电网无功的目标函数用于遗传算法中的适应度函数, 以产生个体的适应度值区分个体优劣, 本文综合系统有功网损最小、电能质量最好, 并将节点电压越界以罚函数形式嵌入目标函数, 对目标函数中各项单位统一为“1”后, 目标函数可表示为

$$\min C = \frac{\Delta P_{\text{loss}}}{P_{\Sigma}} + k_U \sum_{i=1}^n \left( \frac{U_i - U_{i\_set}}{U_{i\max} - U_{i\min}} \right)^2 \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$U_{i\_set} = \begin{cases} U_{i\max}, & (U_i > U_{i\max}) \\ U_i, & (U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}) \\ U_{i\min}, & (U_i < U_{i\min}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\Delta P_{\text{loss}}$  为系统的有功网损;  $P_{\Sigma}$  为所有节点的有功负荷之和;  $U_{i\_set}$  为节点  $i$  的设定电压;  $k_U$  为电压越界惩罚因子, 模型中本文取  $k_U=10$ ;  $U_{i\max}$  和  $U_{i\min}$  分别为  $i$  节点设定电压的最大、最小电压。

### 1.2 等式约束条件

并联无功补偿容量的确定应满足潮流方程

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$  分别表示节点  $i$  的注入有功、无功;  $U_i$ 、 $U_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的电压;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  之间的电导、电纳;  $\theta_{ij}$  为  $i$ 、 $j$  之间的电压相角差。

### 1.3 不等式约束条件

无功优化问题中的变量有状态变量和控制变量两类, 其中, 节点电压  $U_i$  为状态变量, 在目标函数中, 以惩罚函数的形式表达, 并联无功补偿电容器  $Q_c$  为控制变量。控制变量的不等式约束为

$$Q_{ci\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci\max} \quad (5)$$

式中,  $Q_{ci\max}$ 、 $Q_{ci\min}$  分别为节点  $i$  的并联无功补偿电容器的无功出力的上下限。

## 2 改进的无功补偿遗传算法

遗传算法以自然选择和遗传理论为基础, 主要包括编码、选择、交叉、变异等要素<sup>[10-12]</sup>, 其具有通用性、全局性、鲁棒性强等特点, 但也有“早熟”、收敛速度较慢的缺点, 为使无功规划有更好的效果, 应对简单的遗传算法进行改进。

### 2.1 编码操作

本文算例采用 IEEE 33 节点配电系统, 由并联电容器补偿, 对控制变量  $Q_c$  采用十进制整数编码, 其个体的染色体编码表示为  $S = [Q_{c1}, Q_{c2}, \dots, Q_{ci}]$ 。

### 2.2 选择算子

将所有个体按适应度值降序排列后, 把适应度差的部分淘汰, 用好的部分替代, 保持总群数量不变, 提高了种群的整体适应度水平<sup>[13]</sup>。这样操作的好处在于运算初期, 不用让所有个体进行轮盘赌选择, 优化了运算效率, 加快了收敛速度。

个体轮盘赌概率为

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^M F_i} \quad (6)$$

式中,  $F_i$  为第  $i$  个个体的适应度值。将种群中所有的个体按概率从大到小排列后, 个体中最小概率为  $P_{\min}$ 、最大概率为  $P_{\max}$ , 选取  $m$  个概率在  $(P_{\min} + \mu(P_{\max} - P_{\min}))$  到  $P_{\max}$  中较好适应度的个体, 代替  $P_{\min}$  到  $(P_{\min} + \mu(P_{\max} - P_{\min}))$  的  $m$  个适应度较低的个体, 种群数量  $M$  保持不变,  $\mu$  为替换率, 而后再进行轮盘赌选择。

### 2.3 适应度函数

在文献[14]中, 考虑到适应度函数  $f$ , 表示为

$$f = \begin{cases} 0, & \text{其他} \\ C_{\max} - F, & F < C_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $F$  为目标函数;  $C_{\max}$  为一个充分大的正数。 $C_{\max}$  的取值太小则不能保证  $F$  正值, 太大则会忽略目标函数  $F$  的影响, 所以将其修改为  $f = 1/F$ , 但其后期变化不明显, 容易导致退化, 鉴于此, 对适应度函数进行改进, 如式(8)所示。

$$f = e^{(-\lambda' \times F)} \quad (8)$$

式中:  $\lambda'$  取略小于 1.0 的数;  $t$  为进化代数。这样在遗传算法的初期阶段  $\lambda'$  较大, 个体之间的适应度相差不大, 有利于个体的多样性; 随着  $t$  的增加,  $\lambda'$  减小, 复制适应度较大个体的差异会增大, 有利于遗传算法的收敛。

## 2.4 交叉算子和变异算子

进化初期, 当要交叉的两个个体中较大的适应度  $f'$  低于平均适应度  $\bar{f}$ , 即认为群体质量较差, 应采用较高的交叉率、变异率来产生更优的个体, 改善群体质量; 而进化后期, 当要交叉的两个个体中较大的适应度  $f'$  高于平均适应度  $\bar{f}$ , 即认为群体质量较高, 应采用较低的交叉率, 以保留优良基因。当适应度值接近最大值时, 交叉率和变异率应该变小; 当适应度值达到最大值, 交叉率和变异率得到最小值但不为零。参阅大量文献, 采用文献[15]改进的交叉算子和变异算子。

$$P_c = \begin{cases} P_{cmax} - \frac{P_{cmax} - P_{cmin}}{f_{max} - \bar{f}}(f' - \bar{f}), & f' \geq \bar{f} \\ P_{cmax}, & f' < \bar{f} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{mmin} + \frac{P_{mmax} - P_{mmin}}{f_{max} - \bar{f}}(f_{max} - f), & f'' \geq \bar{f} \\ P_{mmax}, & f'' < \bar{f} \end{cases} \quad (10)$$

式中: 最大交叉概率  $P_{cmax}=0.9$ ; 最小交叉概率  $P_{cmin}=0.6$ ;  $f'$  为要交叉的两个个体中较大的适应度; 最大变异概率  $P_{mmax}=0.1$ ; 最小变异概率  $P_{mmin}=0.001$ ,  $f''$  为要变异个体的适应度;  $\bar{f}$  为平均适应度值;  $f_{max}$  为群体最大适应度。

## 2.5 收敛判据

根据终止迭代准则, 判断得到的个体是否是最优个体, 如符合条件要求退出寻优, 否则继续进行寻找。若在最大遗传代数内未得到符合条件要求的最优个体, 则以当前得到的解为依据。

## 2.6 无功补偿点的确定

常用的确定无功补偿设备补偿位置的方法有灵敏度法<sup>[16-17]</sup>、随机搜索法<sup>[18]</sup>、功率矩法<sup>[19]</sup>, 本文采用能反映该节点无功负荷所引起的网损大小的无功二次电阻矩<sup>[20]</sup>, 无功二次电阻矩的大小, 若节点的无功二次电阻矩越大, 则说明在该点进行电容器补偿的降损效果更好, 无功二次电阻矩为

$$M_i = \sum_{j \in N} Q_i^2 R_j \quad (11)$$

式中:  $Q_i$  为无功负荷;  $R_j$  为支路电阻;  $N$  为所有与节点  $i$  有关联的支路。

# 3 基于 LCC 的配电网无功优化

## 3.1 全寿命周期成本的构成

基于全寿命周期成本的配电网无功优化在时间维度上, 本文将全寿命周期总成本分为三个阶段: 设计建设阶段、运营阶段、退役阶段, 结构树状图如图 1 所示。

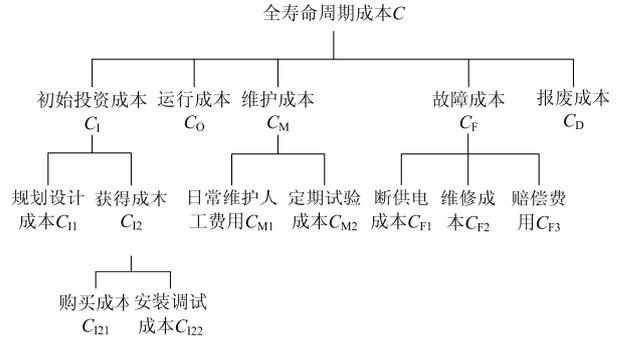


图 1 LCC 结构树状图

Fig. 1 Tree diagram of LCC structure

设计建设阶段的初始投资成本  $C_1$  包括规划设计成本  $C_{11}$ 、设备材料获得成本  $C_{12}$ , 而设备获得成本又可分为设备购买成本  $C_{121}$  以及设备安装调试成本  $C_{122}$ 。

当项目建成进入运营期后, 设备的运行维护是相互切换密不可分的, 所以将运行维护视为一个阶段, 运维阶段包括运行成本  $C_0$ 、维护成本  $C_M$  和故障成本  $C_F$ 。设备的运行成本  $C_0$  主要是设备的损耗费用, 不同的设备其损耗费用不尽相同; 设备的维护成本  $C_M$  包括设备的日常维护的人工成本  $C_{M1}$ 、为保证性能完善的定期试验成本  $C_{M2}$ , 不同电力设备所进行的试验项目不同从而成本也不同; 故障成本  $C_F$  包括因断供电利润损失的断供电成本  $C_{F1}$ 、大修费用  $C_{F2}$  以及与部分用户供电合同产生的赔偿费用  $C_{F3}$ , 其中大修一般每 3~5 年进行一次。最后是设备退役报废所产生的报废成本  $C_D$ , 所以根据阶段来划分, 全寿命周期成本基本模型可以表示为

$$LCC = C_1 + C_0 + C_M + C_F + C_D \quad (12)$$

结合经济学常识基础, 将按年度计算的运维阶段的费用与退役阶段废弃处置成本折算成现值费用形式后, 配电网 LCC 模型为

$$LCC = C_1 + (C_0 + C_M + C_F) \times PV_{sum} + C_D \times PV \quad (13)$$

$$PV_{sum} = \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (14)$$

$$PV = \frac{1}{(1+r)^n} \quad (15)$$

式(13)为规划方案在整个规划设计、运行和维护到最终设备报废期间所发生的费用总和, 其中:  $PV_{sum}$  为按年度投资成本现值和;  $PV$  为折现系数;  $r$  为折现率;  $n$  为寿命周期。

## 3.2 设计建设阶段成本

配电网无功补偿项目初始投资成本  $C_1$  可分为固定费用和动态费用。固定费用主要是研究设计阶

段的勘察设计、生产准备这部分费用大致为 8%，建设阶段的设备安装工程费，占投资费用的 75% 以上，施工辅助工程即大型吊装机设备进出场费以及水、电、路通费用占比不足 0.5%；动态费用即设备费用，与补偿的容量有关，所以初始投资费用可以表示为

$$C_1 = C_{ds} + \lambda_1 n + \lambda_2 \sum_{i=1}^n Q_{ci} \quad (16)$$

式中： $C_{ds}$  为研发阶段的设计勘测费用； $\lambda_1$  为单个设备安装费用； $\lambda_2$  为单位补偿容量的价格； $Q_{ci}$  为第  $i$  个补偿设备的设计补偿容量。

### 3.3 运营阶段成本

项目建成后，设备的运行和维护是交替进行的，可以分为运行成本  $C_O$  和维护成本  $C_M$ 。运行成本主要是来源于线损的损耗成本，根据不同的设备耗能也有所变化，对于导线而言，损耗是由电阻损耗、电晕损耗导致的，而对于并联电容器组正常运行情况下，有功损耗很小，高压情况下总损耗值一般为 0.08~0.18 W/kvar，所以在此运行成本  $C_O$  可视为 0；维护成本  $C_M$  包括日常维护的人工成本  $C_{M1}$ ，本文以无人值守每周一次巡检计算，每次每工日每人为 48.0 元以及定期试验检测费用，定期试验检测每年一次，经了解，每个并联电容器组试验检测费用为 3 000 元；并联电容器组故障损失成本  $C_F$ ，主要来源于设备故障更换产生的材料更换成本以及大修费用，大修每 3~5 年进行一次，而小故障造成的材料更换费用由于财务管理的精度无法达到 LCC 的分析水平的要求，暂不计入。

### 3.4 退役阶段成本

并联电容器组在结束寿命周期之后，需要耗费一定资源进行处理，根据文献[21]，为方便计算，本文认为并联电容器组的报废成本  $C_D$  为初始投资成本  $C_1$  的 2%。

## 4 算例分析

针对 10 kV 侧本文采用并联电容器组进行无功补偿，以 IEEE 33 节点配电系统为例，系统图如图 2 所示。该系统是由 33 个节点、32 条支路组成的辐射状网络，原始系统的有功网损为 202.68 kW，基准电压取 12.66 kV，基准功率取 10 MVA。节点电压标幺值上下限设置为 1.07 及 0.93。种群大小取 40，终止代数取 100。

经过潮流计算，优化前节点 9、10、11、12、13、14、15、16、17、28、29、30、31、32 共 14 个节点不合格，不合格率为 42.42%。

通过无功二次电阻矩法求得的节点二次电阻

矩值越大意味着补偿效果越好，在实现全局最优的同时，也要满足局部最优，故选择了补偿点数不同的两种方案进行比较，2 个补偿点时，取 8、30 节点进行补偿；3 个补偿点时，取 12、23、30 节点进行补偿，由此经改进遗传算法计算可得，各自补偿方案的补偿位置和补偿容量如表 1 所示。

表 1 补偿方案 1、2 补偿效果比较

Table 1 Comparison of compensation effect between case 1 and 2

优化方案	补偿点	补偿容量/kvar	优化后网损/kW
方案 1	8	1 171	152.29
	30	1 075	
方案 2	12	760	145.98
	23	529	
	30	1 110	

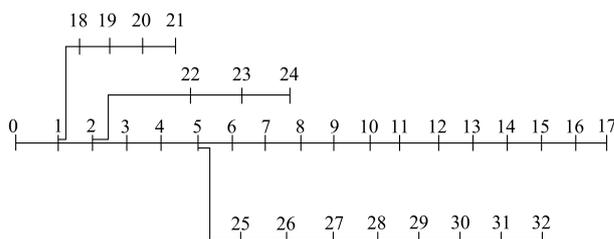


图 2 33 节点配电系统

Fig. 2 33 nodal distribution system

优化后，两种优化方案各节点电压幅值如表 2 以及图 3 所示。

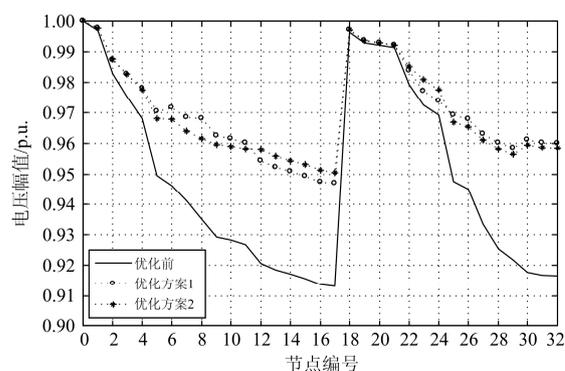


图 3 优化前后电压幅值比较

Fig. 3 Comparison of voltage amplitude before optimization and after optimization

由上分析可知，方案 1 与方案 2 都满足电压质量的要求，方案 1 的优化幅度为 24.86%，而方案 2 降损更高，为 27.98%，在不考虑 LCC 模型的情况下，假设电价为 0.5 元/kWh，年运行时间为 8 760 h，方案 1 优化后每年因降损可节省 22.071 万元，方案 2 优化后每年因降损可节省 24.835 万元，所以采用

方案 2 后相比于方案 1 每年可多节省 2.764 万元。

表 2 优化后的 33 节点系统电压幅值

Table 2 Voltage amplitude of the optimized 33 node system

节点编号	电压幅值	
	方案 1	方案 2
0	1.000 000 000 000 000	1.000 000 000 000 000
1	0.997 700 301 024 027	0.997 782 660 647 759
2	0.987 189 192 082 793	0.987 716 857 037 119
3	0.982 370 897 613 167	0.982 730 441 864 392
4	0.977 759 281 860 800	0.977 940 646 142 142
5	0.969 454 061 567 452	0.968 949 721 354 639
6	0.968 988 217 211 502	0.968 341 219 386 623
7	0.965 362 407 262 658	0.964 667 208 345 061
8	0.962 772 439 700 690	0.961 912 929 514 559
9	0.960 660 052 567 380	0.959 633 741 602 462
10	0.960 136 094 775 307	0.959 095 681 354 143
11	0.959 274 010 183 187	0.958 206 661 974 137
12	0.958 933 597 044 279	0.957 599 896 209 451
13	0.960 201 624 932 798	0.955 421 368 323 574
14	0.958 851 202 150 964	0.954 064 128 136 534
15	0.957543 273 077 221	0.952 749 591 174 730
16	0.955 605 111 773 053	0.950 801 621 782 411
17	0.955 024 702 490 268	0.950 218 276 458 139
18	0.997 172 293 728 826	0.997 254 697 299 971
19	0.993 597 117 881 809	0.993 679 819 577 586
20	0.992 893 090 973 897	0.992 975 851 400 601
21	0.992 256 103 632 031	0.992 338 917 223 956
22	0.983 619 272 699 178	0.984 974 235 679 631
23	0.976 977 571 406 055	0.980 242 019 757 328
24	0.973 667 308 483 433	0.976 942 857 386 918
25	0.968 515 204 759 923	0.967 932 586 784 017
26	0.967 336 220 730 232	0.966 643 535 097 014
27	0.964 705 377 855 483	0.963 288 420 293 929
28	0.963 128 997 007 682	0.961 160 480 091 219
29	0.962 054 533 660 662	0.959 879 557 538 349
30	0.958 068 649 734 384	0.955 884 548 557 318
31	0.957 191 800 268 763	0.955 005 691 147 196
32	0.956 920 112 052 937	0.954 733 380 578 808

在仅计及初始投资成本中的设备购买费用与设备安装调试费用的情况下，本文设定并联电容器组寿命周期为 20 年，折现率  $r$  取 8%，设备安装调试费用为 5 000 元，单位电容价格为 45 元/kVar，项目的初始投资费用  $C_{no\_lcc}$  可以表示为购买设备与设备安装调试费用和。

经计算，方案 1 的投资成本为 11.11 万元，方案 2 的投资成本为 12.30 万元，投资收益，即降损节省的费用，从经济学的角度考虑年度投资成本现值和  $PV_{sum}$ ，所以在不考虑 LCC 模型的情况下，两

种补偿方案的 20 年投资效益如表 3 所示。

表 3 不考虑 LCC 的投资效益分析

Table 3 Investment benefit analysis without considering LCC

优化方案	投资费用/万元	投资收益/万元	投资净收益/万元
方案 1	11.11	216.70	205.59
方案 2	12.30	243.83	231.53

从电网全寿命周期效益的角度考虑，由于方案 1 装设了 2 246 kvar 容量，方案 2 装设了 2 399 kvar 容量，相比于前者，除多装设了 153 kvar 容量增加了初始投资成本中的设备购买成本外，方案 2 比方案 1 多了一个补偿点，维护成本、故障成本以及退役成本，而设备进入运营期后的费用在占比很大，不能忽略不计，所以应从规划项目全寿命周期成本的角度来考虑更为科学有效，以下采用 LCC 模型对两种方案进行计算。

在初始投资成本  $C_i$  方面，认为勘测设计费  $C_{ds}$  为 1.5 万元，并联电容器组的运行成本  $C_o$  视为 0；在维护成本  $C_M$  方面，以每周检查一次，每次 3 人，每年 52 周，人工费 48 元每工日每人计算，日常维护人工费用  $C_{M1}$  为 7 488 元/年，每年的定期试验检测费用  $C_{M2}$  为 3 000/套；故障成本  $C_F$  认为 5 年一次大修的费用 8 万元/套，并联电容器组寿命为 20 年对应第 5、10、15 年进行各一次大修；报废成本  $C_D$  为初始投资成本  $C_i$  的 2%。

经计算，方案 1 的全寿命周期成本为 49.26 万元，其中初始投资成本为 12.61 万元，运营期间产生的维护、故障成本共计 36.59 万元，而方案 1 因降损节省的成本，在全寿命周期的角度考虑按年度投资成本现值和  $PV_{sum}$  后，方案 1 降损总收益为 216.70 万元；方案 2 的全寿命周期成本为 65.07 万元，其中初始投资成本为 13.80 万元，运营期间产生的维护、故障成本共计 51.20 万元，方案 2 寿命周期降损总收益为 243.83 万元。两种并联电容器组无功补偿方案的寿命周期内投资效益分析如表 4 所示。

表 4 考虑 LCC 的投资效益分析

Table 4 Investment benefit analysis with considering LCC

优化方案	全寿命周期投资费用/万元	投资收益/万元	投资净收益/万元
方案 1	49.26	216.70	167.44
方案 2	65.07	243.83	178.76

由表 4 分析得出，方案 2 全寿命周期成本以及初始投资成本高于方案 1，但是方案 2 投资净收益

要比方案 1 高出 11.32 万元。

## 5 结论

1) 项目运营期的运维成本、故障成本在全寿命周期中占比高, 也比初始投资成本要大。

2) 本文算例中的两种规划方法投资净收益都是大于 0, 意味着两种规划方案都能够带来经济效益。

3) 是否计及 LCC 对方案的选择具有一定的影响作用。若本文算例中的设计费用、大修费用增加, 有可能造成最终方案的改变。

## 参考文献

- [1] 陈丽, 张晋国, 苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 120-127.  
CHEN Li, ZHANG Jinguo, SU Haifeng. Reactive power planning for distribution system with grid-connected photovoltaic system considering time-sequence characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 120-127.
- [2] 张志强, 苗友忠, 李芙蓉, 等. 电力系统无功补偿点的确定及其容量优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 92-97.  
ZHANG Zhiqiang, MIAO Youzhong, LI Xiaofu, et al. Location selection of reactive power compensation and compensation capacity optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(3): 92-97.
- [3] 董海龙, 奚慧兴, 付立思, 等. 基于混合 PSO-ACO 算法的含 DG 配电网无功优化[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 50-56.  
DONG Hailong, XI Huixing, FU Lisi, et al. Reactive power optimization in distribution network with DG based on hybrid PSO-ACO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1): 50-56.
- [4] 谢海波, 武小梅, 林翔, 等. 含分布式电源的配电网无功优化研究综述[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 102-109.  
XIE Haibo, WU Xiaomei, LIN Xiang, et al. Review on reactive power optimization for power distribution network with distributed generation[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 102-109.
- [5] 苏海锋, 陈丽, 张建华. 基于聚类排挤小生境遗传算法的配电网无功规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 27-30.  
SU Haifeng, CHEN Li, ZHANG Jianhua. Research on reactive power planning of distribution network based on the clustering crowding niche genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 27-30.
- [6] 李盛兴, 罗滇生, 李一泉, 等. 改进拟态物理学算法在交直流系统无功优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 115-119.  
LI Shengxing, LUO Diansheng, LI Yiquan, et al. Reactive optimization of hybrid AC-DC power system based on improved APO[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 115-119.
- [7] 苏海锋. 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, 2012.  
SU Haifeng. Research on the life cycle management theory and method in distribution system planning[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [8] 梁唐杰, 谢庆, 柳春芳, 等. 基于全寿命周期理论和云物元理论的配电网规划综合效益的评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 12-17.  
LIANG Tangjie, XIE Qing, LIU Chunfang, et al. Comprehensive benefit evaluation of distribution network planning based on the life cycle cost theory and the cloud matter element theory[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 12-17.
- [9] 曹晓宇, 王建学, 张忠, 等. 基于长期运行模拟的独立型微网规划方案动态评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 46-56.  
CAO Xiaoyu, WANG Jianxue, ZHANG Zhong, et al. Dynamic assessment of stand-alone microgrid planning using long-term simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 46-56.
- [10] 颜炯, 万涛, 李浩松, 等. 计及不确定性因素的配电网网架规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 76-81.  
YAN Jiong, WAN Tao, LI Haosong, et al. Distribution network planning considering the uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 76-81.
- [11] 黄俊辉, 汪惟源, 王海潜, 等. 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 37-43.  
HUANG Junhui, WANG Weiyuan, WANG Haiqian, et al. Study of hybrid genetic algorithm and annealing algorithm on reactive power optimization and voltage control in AC/DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 37-43.

- [12] 韩晓娟, 王丽娜, 高僮, 等. 基于成本和效益分析的并网光储微网系统电源规划[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 31-39.  
HAN Xiaojuan, WANG Lina, GAO Tong, et al. Generation planning of grid-connected micro-grid system with PV and batteries storage system based on cost and benefit analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 31-39.
- [13] 向婷, 潘大志, 陈友军, 等. 遗传算法的一种改进实现[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 398-403.  
XIANG Ting, PAN Dazhi, CHEN Youjun, et al. Realization of improved genetic algorithm[J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2014, 35(4): 398-403.
- [14] 赵昆, 耿光飞. 基于改进遗传算法的配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 57-62, 68.  
ZHAO Kun, GENG Guangfei. Reactive power optimization of distribution network based on improved genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 57-62, 68.
- [15] ZHANG J, HUANG T, ZHANG H. The reactive power optimization of distribution network based on an improved genetic algorithm[C] // Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES, August 18-18, 2005, Dalian, China: 1-4.
- [16] 刘君华, 方鹤飞, 吕岩岩. 基于灵敏度法确定无功补偿地点[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(4): 58-61.  
LIU Junhua, FANG Gefei, LÜ Yanyan. Allocation of reactive compensation using sensitivity analysis approach[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2006, 18(4): 58-61.
- [17] 周红婷, 宋玮. 计及动态无功控制影响的大规模风电汇集地区电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 13-18.  
ZHOU Hongting, SONG Wei. Analysis on voltage stability in large-scale wind farms integration area considering impact of dynamic reactive power control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 13-18.
- [18] CHANG C F. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1747-1755.
- [19] 颜伟, 徐郑. 10 kV 馈线无功补偿选点的负荷功率阻抗矩方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 29-33.  
YAN Wei, XU Zheng. Load power impedance moment method for optimal location of reactive power compensators on 10 kV feeder[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2005, 17(5): 29-33.
- [20] 姚李孝, 肖靓, 王磊, 等. 基于改进遗传算法的配电网无功优化[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(4): 24-28.  
YAO Lixiao, XIAO Liang, WANG Lei, et al. Reactive power optimization based on improved genetic algorithms in distribution system[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(4): 24-28.
- [21] 杨洁, 刘开培, 龚汉阳, 等. 基于 LCC 的配电网电压偏差治理措施的优化[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 21-26.  
YANG Jie, LIU Kaipei, GONG Hanyang, et al. LCC-based optimization of countermeasures against distribution network voltage deviation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 21-26.

收稿日期: 2017-05-12; 修回日期: 2017-11-28

作者简介:

徐玉琴(1964—), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制、分布式发电与配电网、电力系统继电保护等; E-mail: xuyuqin\_ncepu@126.com

刘杨(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与规划; E-mail: 691392486@qq.com

谢庆(1979—), 男, 副教授, 主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断、新型传感器与绝缘材料。E-mail: xq\_ncepu@126.com

(编辑 张爱琴)