

DOI: 10.7667/PSPC160780

交直流电网的无功补偿选点及容量优化研究

刘旺¹, 陈益峰¹, 朱添安², 涂志康³, 魏亮亮⁴

(1. 上海核工程研究设计院, 上海 200233; 2. 国网宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000;
3. 国网太原供电公司, 山西 太原 030012; 4. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 目前, 有关交直流电网无功优化的研究受到了越来越多的关注。针对交直流电网的无功优化问题, 提出了一种基于改进粒子群算法的交直流电网无功补偿优化方法。首先优化了无功补偿的选点方法。在奇异值分解原理的基础上, 采用多次潮流计算、逐次定点的方法进行无功补偿选点, 避免了无功过补偿。然后提出了一种基于分组寻优的改进粒子群算法, 该算法可有效避免陷入局部最优解, 提高寻优速度。最后, 采用改进的 IEEE-57 标准节点系统对所提出的方法进行验证。相比传统方法, 该方法能够有效提高交直流电网的电能质量, 减少无功补偿容量, 具有更好的优化效果。

关键词: 交直流电网; 无功补偿; 奇异值分解; 粒子群算法; 分组寻优

Study on location and capacity optimization of reactive power compensation in AC-DC grids

LIU Wang¹, CHEN Yifeng¹, ZHU Tianan², TU Zhikang³, WEI Liangliang⁴

(1. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China; 2. State Grid Yichang Power Supply Company, Yichang 443000, China; 3. State Grid Taiyuan Power Supply Company, Taiyuan 030012, China; 4. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Recently the study on reactive power compensation in AC-DC grids has received more and more attention. Based on improved particle swarm optimization (PSO), this paper presents a novel method to optimize reactive power of AC-DC grids. Firstly, the locations of reactive power compensation are optimized. According to the principles of the singular value decomposition, the methods of multiple flow calculation and successive determined-point are adopted to avoid over-compensation. Then, an improved PSO method based on grouping optimizing is applied to optimize the compensation capacity, which can overcome the problem of premature convergence and improve optimization speed. Finally, the proposed optimal algorithm is tested through the modified IEEE-57 bus system. Compared with traditional methods, this method can effectively improve power quality of AC-DC grids, reduce reactive power compensation capacities, and has better optimization effect.

Key words: AC-DC grids; reactive power compensation; singular value decomposition; particle swarm optimization; grouping optimizing

0 引言

区域电网互联以及远距离、大功率输电都是未来中国电网发展的重点, 在超过 600~800 km 的交流输电与直流输电等价距离后, 直流输电的经济性明显高于交流输电, 并且采用直流线路进行联网, 不会对被连交流系统的短路电压水平产生影响, 能有效地消除产生低频振荡的可能, 还能隔断交流故障的传递, 避免发生连锁反应^[1], 因而越来越多的直流线路被引入电网之中。但随着直流线路的不断

增多, 其对原有电网的影响也随之增大, 特别是在无功功率平衡方面, 尽管直流输电本身不消耗无功, 但是其换流站含有大量电力电子器件, 有着很大的无功需求, 如果这部分无功不能得到满足很有可能出现换相失败等故障, 严重时可能导致与其相连的交流系统发生崩溃。所以, 如何从全局角度合理统筹规划交直流电网的无功补偿策略, 实现有功网损、电压指标、无功补偿量等因素的综合最优化, 是在向电网中引入直流线路时需要慎重考虑的问题。

目前, 对于交直流的无功优化研究的较少, 文

献[2]提出了一种交直流混合系统静态的无功优化模型,但是假设触发角和熄弧角都是常数,没有充分考虑直流控制方式的优化选择。文献[3]提出了一种交直流无功优化的二次模型,但是采用内点法求解,直接将离散变量连续化处理。文献[4]建立的是一种动态优化模型,虽充分考虑了直流系统对功率电压的调节能力,但是模型及控制约束条件过于复杂,实际运行可能带来不便。

本文首先对无功补偿的选点方法进行了优化,以奇异值分解理论为基础^[5],采用多次潮流计算、分步确定补偿点的方法,考虑上一个节点补偿无功后对潮流的影响,进而确定下一个补偿的节点,避免出现无功的过补偿。同时,改进了基本粒子群(PSO)算法,以电网有功网损最小为目标函数,采用分组寻优的方式,并对寻优后各小组数据交换、更新,以保证粒子种群的差异性,不仅避免了一般PSO算法过早的陷入局部最优解的问题,还有效保证了算法的寻优速度。

1 交直流互联系统无功优化模型

与传统交流系统相比,交直流电网无功优化模型的建立除交流变量外还需直流系统变量,而直流损耗方面,则主要考虑直流线损^[6]。

1.1 目标函数

目标函数采用扩展的形式^[7],以实现系统总的有功网损最小为目标,同时加入系统负荷节点的电压、各发电机无功出力及换流器电流为罚函数^[8]。

$$\min F = P_{\text{acloss}} + P_{\text{dcloss}} + \lambda_1 \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{\Delta U_{li}}{U_{li\max} - U_{li\min}} \right)^2 + \lambda_2 \sum_{j=1}^{N_2} \left(\frac{\Delta Q_{Gj}}{Q_{Gj\max} - Q_{Gj\min}} \right)^2 + \lambda_3 \sum_{k=1}^{N_3} \left(\frac{\Delta I_{dk}}{I_{dk\max} - I_{dk\min}} \right)^2 \quad (1)$$

其中:

$$\Delta U_{li} = \begin{cases} U_{li} - U_{li\max} & U_{li} > U_{li\max} \\ 0 & U_{li\min} \leq U_{li} \leq U_{li\max} \\ U_{li\min} - U_{li} & U_{li} < U_{li\min} \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta Q_{Gj} = \begin{cases} Q_{Gj} - Q_{Gj\max} & Q_{Gj} > Q_{Gj\max} \\ 0 & Q_{Gj\min} \leq Q_{Gj} \leq Q_{Gj\max} \\ Q_{Gj\min} - Q_{Gj} & Q_{Gj} < Q_{Gj\min} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta I_{dk} = \begin{cases} |I_{dk}| - I_{dk\max} & |I_{dk}| > I_{dk\max} \\ 0 & I_{dk\min} \leq |I_{dk}| \leq I_{dk\max} \\ I_{dk\min} - |I_{dk}| & |I_{dk}| < I_{dk\min} \end{cases} \quad (4)$$

式中: N_1 、 N_2 、 N_3 分别表示负荷节点总数、发电机

节点总数、换流站节点总数; P_{acloss} 和 P_{dcloss} 则为交流和直流系统有功损耗; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为电压越界惩罚系数、无功出力越界惩罚系数、直流电流越界惩罚系数(其中 $\lambda > 0$, 且 $\lambda \rightarrow \infty$); U_{li} 、 $U_{li\min}$ 和 $U_{li\max}$ 分别是负荷节点电压值、下限和上限值; Q_{Gj} 、 $Q_{Gj\min}$ 和 $Q_{Gj\max}$ 表示发电机的无功出力、无功出力下限和上限值; I_{dk} 、 $I_{dk\min}$ 和 $I_{dk\max}$ 则为流经换流器的电流、电流下限值和上限值^[9-12]。

1.2 等式约束

有功和无功潮流的等式约束方程为

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{li} - P_{\text{idc}} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{li} - Q_{\text{idc}} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{Gi} 和 Q_{Gi} 为发电机的有功和无功功率; P_{li} 和 Q_{li} 为节点负荷的有功和无功功率; P_{idc} 和 Q_{idc} 为换流站节点的有功和无功功率; Q_{Ci} 为补偿节点的无功补偿量; G_{ij} 、 B_{ij} 和 θ_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导、电纳和节点电压相角差。

1.3 不等式约束

1) 控制变量约束

交流系统的控制变量约束为发电机节点电压、无功出力以及变压器变的比上下限,增加的直流控制变量约束为^[13]

$$\begin{cases} U_{di\min} \leq U_{di} \leq U_{di\max} & i = 1, 2, \dots, N_d \\ I_{dj\min} \leq I_{dj} \leq I_{dj\max} & j = 1, 2, \dots, N_d \\ P_{dk\min} \leq P_{dk} \leq P_{dk\max} & k = 1, 2, \dots, N_d \\ \cos \theta_{dl\min} \leq \cos \theta_{dl} \leq \cos \theta_{dl\max} & l = 1, 2, \dots, N_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: N_d 为换流站节点数; U_{di} 、 $U_{di\min}$ 、 $U_{di\max}$ 为直流电压值、下限值、上限值; I_{dj} 、 P_{dk} 和 $\cos \theta_{dl}$ 分别为直流电流值、直流输送功率值和换流器控制角余弦值。

2) 状态变量约束

交流部分的状态变量约束仍选 PQ 节点电压幅值上下限,发电机节点无功出力上下限,直流状态变量约束为^[15]

$$K_{Qi\min} \leq K_{Qi} \leq K_{Qi\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_d \quad (7)$$

式中, $K_{\theta i}$ 、 $K_{\theta i\min}$ 、 $K_{\theta i\max}$ 分别表示换流变压器的变比、变比上限和下限。

2 无功补偿选点的优化

2.1 奇异值分解法的基本理论

奇异值分解法的基本思路是利用潮流计算修正

方程中雅克比矩阵 J 的非奇异性, 对其进行奇异值分解。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$J = M \Sigma N^T = \sum_{i=1}^n m_i \delta_i n_i^T \quad (9)$$

式中: M 和 N 为 n 维的正交矩阵; n 是 J 矩阵的维数; m_i 和 n_i 分别为左、右奇异值向量, 对应于矩阵 M 和 N 的第 i 列, $\delta_i (\delta_1 \geq \delta_2 \geq \dots \geq \delta_n \geq 0)$ 为奇异值, Σ 为 δ_i 的对角矩阵。

由此, 根据修正方程可得有功功率和无功功率注入的微小变化引起 $(\Delta \delta \ \Delta U)$ 矢量的变化^[14], 可以由下式计算:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = N \Sigma^{-1} M^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \delta_i^{-1} n_i m_i^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

雅可比矩阵的最小奇异值 δ_{\min} 是接近静态电压稳定极限的一个指标, 其大小表明了电压稳定的相对临近程度, 最小奇异值对应的左、右奇异向量提供了进行稳定分析的重要信息^[15]。

设最小奇异值 δ_{\min} 对应的左、右奇异向量分别为 m_{\min} 、 n_{\min} 。

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \delta_{\min}^{-1} n_{\min} m_{\min}^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (11)$$

由式(11)可知, 当系统功率摄动和最小奇异值相关的左奇异向量相等时, $(\Delta P \ \Delta Q)^T = m_{\min}$, 其中: m_{\min} 是 M 的最后列, m_{\min} 提供了节点功率注入变化的典型模式, 根据正交矢量的性质, $m_{\min}^T m_{\min} = 1$, 故

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \delta_{\min}^{-1} n_{\min} \quad (12)$$

式中, n_{\min} 是 N 的最后列, n_{\min} 中的最大元素对应最灵敏的节点电压幅值, 所以可以通过右奇异向量来判断系统的电压弱节点。最后, 以雅克比矩阵最小奇异值对应的右奇异矢量中最大的几个值所对应的节点作为无功补偿候选点。

2.2 基于奇异值理论的选点优化

一般的基于奇异值分解理论所确定的无功补偿节点大多是通过一次潮流计算得出, 其结果有可能导致补偿量冗余。当选点相对集中、补偿范围重叠时, 因为补偿容量的计算只是根据一个潮流计算状态下的结果所得, 后面补偿节点容量的计算没有考虑到上一个节点补偿无功后对潮流的影响, 极易造成无功的过补偿。

本文在进行补偿点选取时, 先根据交直流电网的初始状态计算潮流分布, 再依据奇异值分解法的理论将交直流潮流雅克比矩阵进行奇异值分解, 得

到雅克比矩阵最小奇异值对应的右奇异矢量, 并对其进行排序, 选择矢量值最大的作为第一个候选补偿节点。假设该节点为 i , 注入该节点的有功功率为 P_i , 补偿前的功率因数为 $\cos \varphi_1$, 补偿后该点的功率因数欲达到 $\cos \varphi_2$ (按功率因数达到 0.95 计算), 则该点的无功补偿量为

$$Q_{ci} = P_i (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (13)$$

把已进行补偿节点的无功补偿看作负载, 即节点上增加了一个功率为 $-Q_{ci}$ 的负载, 然后在此基础上进行潮流计算, 再确定下一个补偿点。

3 改进粒子群无功优化算法

3.1 基本粒子群算法

粒子群算法(PSO)^[16-19]是对鸟群捕食的一种模拟, 猎食目标代表着待求问题的最优解, 种群中每个粒子以各自的方式在目标可能出现的一定范围内进行搜索, 搜索时行进的路线、速度不仅与其的判断有关, 还受到种群其他个体反馈信息的影响。

基本 PSO 算法中假设粒子在 D 维空间中搜索, 种群规模为 N , 用 $X_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t)$ 和 $V_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t)$, $i = 1, 2, \dots, N$ 表示在 t 代中 i 粒子所处的位置和速度, 用 $P_i^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{iD}^t)$ 和 $P_g^t = (p_{g1}^t, p_{g2}^t, \dots, p_{gD}^t)$ 分别表示单个粒子历史最优位置和 t 代中所有粒子的全局最优位置。不断对比 P_i^t 和 P_g^t , 更新 P_g^t , 同时利用 P_g^t 所处位置去影响粒子下一阶段的寻优路线和速度。粒子 i 速度和位置更新公式分别为

$$V_i^{t+1} = \omega V_i^t + c_1 r_1 (P_i^t - X_i^t) + c_2 r_2 (P_g^t - X_i^t) \quad (14)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (15)$$

式中: ω 为惯性权重值, 其大小决定了粒子先前飞行速度对当前飞行速度的影响程度, 恰当的取值策略可以提高算法的寻优能力, 从而减少迭代次数; c_1 、 c_2 为学习因子, 反映了粒子间的信息交流, 即个体经验与群体经验对粒子的影响程度; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数, 其大小将跟随迭代的不断进行而改变, 由最大值 ω_{\max} 线性减小到最小值 ω_{\min} 。

3.2 改进粒子群算法

分析基本 PSO 算法可以知道, 在寻优过程中如果有一定数量的粒子相继都被某一最优值吸引而向其靠拢时, 紧接着便会有越来越多的粒子受到影响, 进而调整其寻优路线向该值靠近, 若该最优值只是局部的最优, 这将会导致算法陷入局部最优, 出现算法早熟的情况。

本文在采用 PSO 算法行寻优时, 将粒子种群分为两组, 其中 A 组包含大部分粒子, 其余的归入 B

组。对 A 组中的粒子按其寻优值的大小赋予不同的惯性权重 ω 值, 较优的值赋予小的权重值, 较差的赋值则偏大, 以使在 A 组粒子在寻优过程中不漏掉能够找到的最优解。对于 B 组, 主要赋予其开拓外围搜索空间的使命, 在 A 组粒子已经向某一区域集中时, B 组仍保持在一个较大区域寻找可能存在的更优解。每次迭代后, 用 B 组最好的十个粒子替换 A 组中最差的十个粒子, 然后对替换后 B 组中最差的十个粒子初始化, 这样既保持了种群的差异性避免算法过早陷入局部最优解, 同时也兼顾了算法的收敛速度。

按照上述思路, 在本文改进 PSO 算法中, 设 A 组的惯性权重值为

$$\omega_A(t) = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times t}{t_{\max}} \quad (16)$$

式中: t 表示当前迭代数; t_{\max} 表示种群最大迭代数。该惯性权重计算公式采用典型的线性递减策略, 这一策略能够兼顾前期的全局寻优能力和后期的局部搜索能力, 在搜索到最优解之后迅速而精准地向其靠拢, 具有较好的收敛性和搜索速度。

对于 B 组, 由于其肩负的是外围搜索使命, 因而要具有较强的全局遍历性, 故 B 组的惯性权重值采用加入正切函数的调整策略, 该策略在迭代过程中 ω 的值前期减小的较慢, 具有较强的全局搜索能力, 在后期 ω 的值减小快, 能够保证一定的搜索精度。

$$\omega_B(t) = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times \tan \left(0.875 \times \left(1 - \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^k \right) + \omega_{\min} \right) \quad (17)$$

式中, k 为控制因子, 取值在 $[0.4, 0.6]$ 之间。

在学习因子 c_1 、 c_2 的处理上, A 组学习因子采用分段调整方式, 当 $t < t_{\max}/2$ 时, 取 $c_1=2$ 、 $c_2=1$, 以个体自身经验为主; 当 $t \geq t_{\max}/2$ 时, 取 $c_1=1$ 、 $c_2=2$, 以群体经验为主。 B 组可以直接取 $c_1=c_2$, 这一方式能够兼顾个体与群体两方面的影响, 便于 B 组的全局搜索。

3.3 优化步骤

步骤 1: 输入系统原始数据, 设定搜索空间维数 D 和种群数 N , 随机初始化粒子位置和速度。

步骤 2: 计算粒子的适应度, 即目标函数值, 设定粒子个体最优位置为 P_i 和群体最优位置 P_g , 以及对应的个体极值 P_{bi} 和群体极值 G_b 。并令迭代次数 $t=0$ 。

步骤 3: 将种群分为 A 、 B 两组, A 组用式(16)

计算惯性权重, B 组用式(17)计算, 对学习因子也分开处理。更新种群的位置和速度。

步骤 4: 更新每个粒子的最优位置和全局最优位置, 以及对应的个体极值和全局极值。

步骤 5: 对 A 、 B 两组粒子的适应度进行分别排序, 用 B 组中最好的十个粒子与 A 组中最差的十个进行交换, 交换完成后, 更新 B 组中最差的十个粒子。

步骤 6: 根据更新后粒子的数据, 确定个体历史最优位置 P_i 和全局最优位置 P_g , 如果算法达到终止条件, 则停止, 否则令 $t=t+1$, 转步骤 2。

4 算例分析

本文采用修改后的 IEEE-57 节点系统, 将 8、9 节点间的线路改为直流, 形成交直流混联系统, 其中 8 号节点为整流端, 9 号为逆变端。基准功率采用原标准系统的 $S_B=100$ MVA, 直流系统的初始参数设置如表 1 所示^[20-22]。

表 1 直流系统初始参数

Table 1 Initial parameter of DC system

换相 电抗	直流 电阻	控制角		直流 功率	直流 电压	直流 电流
		整流	逆变			
0.014	0.04	0.323	0.383	1.8	1	1.8

选用前述基于奇异值分解理论的方法进行无功补偿选点, 57 节点系统原有 3 个补偿点, 因此分别进行三次潮流计算, 依次确定需候选节点。每次潮流计算后右奇异指标值最大的前三个节点如表 2 所示。由表 2 可知, 选节点 25、32、27 作为补偿点。

表 2 右奇异指标排序

Table 2 Rank of the right singular vector index

潮流计算次数	次序	节点号	右奇异指标值
1	1	25	0.2864
	2	27	0.2810
	3	32	0.2795
2	1	32	0.2769
	2	27	0.2710
	3	26	0.2655
3	1	27	0.2747
	2	26	0.2493
	3	24	0.2295

优化计算中, 方案 1 选择系统原来的 18、25、53 作为无功补偿点, 方案 2 选择本文方法所确定的 25、27、32 作为补偿点, 补偿容量的区间为 $[0, 0.5]$, 补偿分段都为 40 段。优化算法均采用本文所介绍的改进 PSO 算法, 粒子种群数选为 150(其中 A 组

120, B 组 30), 控制变量的上下限约束如表 3 所示, 其余参数与标准 57 节点系统所用参数相同。

表 3 控制变量约束

Table 3 Limitations of control variables

	U_G	T_K	U_d	I_d	P_d	α	γ
上限	1.1	1.1	1.15	1.3	1.3	20°	25°
下限	0.9	0.9	0.85	0.9	0.8	8°	15°

注: 除控制角单位外, 其余变量均为标么值。

在未进行无功优化之前, 修改后的 57 节点系统的有功网损为 0.267 56, 采用改进 PSO 算法经过 50 次的优化运算后, 得到两个方案的目标函数值(即有功网损)处于 0.252 64~0.254 37 之间, 分别取最小值进行潮流计算, 得到各项数据后与优化前进行对比, 如表 4 与图 1 所示。

表 4 优化结果对比

Table 4 Comparison of the optimization results

	补偿节点	补偿/MW	有功网损/MW
无补偿	—	—	26.7567
方案 1	18	19.2136	25.2786
	53	14.0641	
方案 2	25	8.6113	25.2643
	32	6.9396	
	27	5.3287	

从表示 4 的数据可以看出, 在有功网损方面, 方案 1 和方案 2 的优化效果差不多, 但相比于优化前, 网损有了明显降低, 减小了近 5.6%。相比于未进行选点优化的方案 1, 方案 2 三个补偿点的补偿量均远小于方案 1 的三个补偿点, 说明本文选点方法候选的无功补偿点更有效。

而图 1 中优化前后系统节点电压的数据显示, 改进 PSO 有效降低了电压的波动性, 优化后各节点

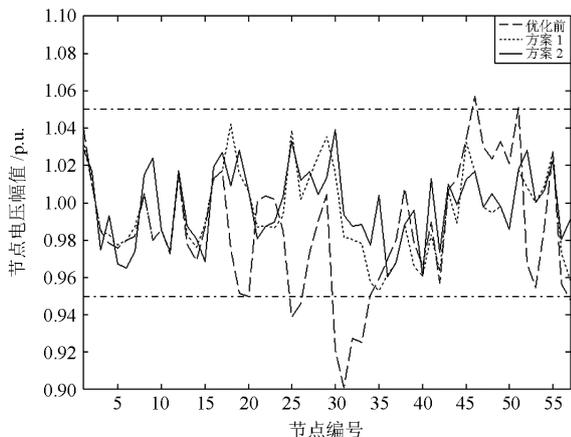


图 1 系统节点电压对比

Fig. 1 Comparison results of node voltage

电压的取值基本集中于 0.95~1.05, 特别是方案 2 中节点电压的浮动区间相比于优化前减小了将近 30%, 这对于提高电网运行的安全性和稳定性有很大的帮助。

为了进一步证明本文提出的改进 PSO 算法的有效性, 在补偿点相同的前提下, 分别选择标准 PSO 算法、遗传算法和本文算法进行优化效果比较, 得到的数据如表 5 和图 2 所示。

表 5 不同算法结果对比

Table 5 Comparison results of different algorithms

	MW		
优化算法	基本 PSO	遗传算法	改进 PSO
最优值	25.5433	25.4065	25.2581
最差值	25.5977	25.5370	25.4369
平均值	25.5701	25.4589	25.3556

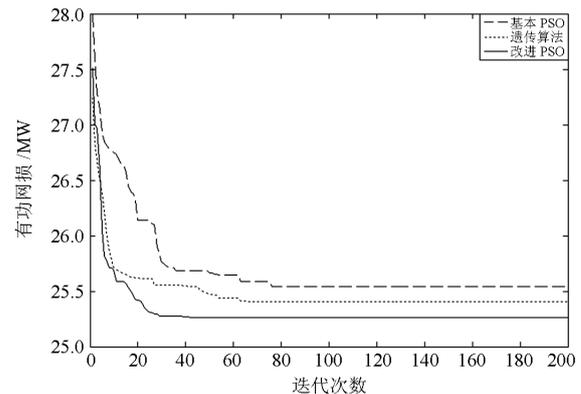


图 2 不同算法系统网损收敛曲线

Fig. 2 Network losses convergence curves based different algorithms

由表 5 和图 2 可以看出, 基本 PSO 算法与遗传算法在寻优能力和收敛速度上都要弱于改进 PSO 算法。改进 PSO 算法在运算前期注重发挥算法的全局搜索能力, 更容易搜索到最优解; 在后期也能快速向找到的最优解靠拢, 实现收敛速度的提高。因此, 改进 PSO 算法不仅有效降低系统有功网损的同时, 还实现了寻优能力与寻优速度的双提高。

5 结论

本文首先对交直流电网的无功补偿选点进行了优化, 然后再进行无功补偿容量的优化。以奇异值分解理论为基础, 采用最小奇异值右向量指标作为选择标准, 分多次进行潮流计算, 逐次确定补偿点, 避免造成无功的过补偿; 接着, 在原有粒子群算法的基础上对其搜索策略和惯性权重值、学习因子的取值策略进行改进, 将改进后算法应用于交直

流电网, 对交直流电网进行了以有功网损最小为目标的无功优化。通过算例仿真证明了该方法具有较好的优化效果, 能够有效降低有功网损, 提高电能质量, 同时减少了无功补偿容量。

参考文献

- [1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 52-60.
- [2] 彭磊, 吴耀武, 熊信银, 等. 交直流混合输电系统的无功优化[J]. 继电器, 2006, 34(4): 35-39.
PENG Lei, WU Yaowu, XIONG Xinyin, et al. Reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system[J]. Relay, 2006, 34(4): 35-39.
- [3] YU Juan, YAN Wei, LI Wenyuan. Quadratic models of AC-DC power flow and optimal reactive power flow with HVDC controls[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(3): 302-310.
- [4] 颜伟, 张海兵, 田甜, 等. 交直流系统的动态无功优化[J]. 电力系统及其自动化, 2009, 33(10): 43-46.
YAN Wei, ZHANG Haibing, TIAN Tian, et al. Dynamic reactive power optimization of AC/DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 43-46.
- [5] 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 Xiaorong, et al. Location Selection of Reactive Power Compensation and Compensation Capacity Optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2015, 27(3): 92-97.
- [6] 彭磊, 张建平, 吴耀武, 等. 基于 GA、PSO 结合算法的交直流系统无功优化[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 78-81.
PENG Lei, ZHANG Jianping, WU Yaowu, et al. Reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system based on genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 78-81.
- [7] 刘文学, 梁军, 负志皓, 等. 基于可信理论的多目标模糊机会约束无功优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 82-89.
LIU Wenxue, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained optimal reactive power flow based on credibility theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 82-89.
- [8] 张文, 刘玉田. 自适应粒子群优化算法及其在无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 19-24.
ZHANG Wen, LIU Yutian. Adaptive particle swarm optimization and its application in reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 19-24.
- [9] 杨天, 霍琳琳. 一种柔性直流输电系统 PID-ANFIS 优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 29-37.
YANG Tian, HUO Linlin. A control method of PID-ANFIS controller for VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 29-37.
- [10] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [11] 冷永杰, 张路寅, 赵建峰, 等. 基于多线程遗传算法的目标分级地区电网电压无功优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 37-41.
LENG Yongjie, ZHANG Luyin, ZHAO Jianfeng, et al. Target classification reactive power optimal control of regional power grid based on multi-thread genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 37-41.
- [12] 聂永辉, 杜正春, 李崇涛, 等. 恢复潮流可行的交直流电力系统切负荷新模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 209-215.
NIE Yonghui, DU Zhengchun, LI Chongtao, et al. A New load-shedding model to restore AC-DC power flow feasibility[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 209-215.
- [13] 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.
- [14] 邸弢, 李华强, 范锴. 基于奇异值分解和内点法的交直流系统无功优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 158-163.
DI Tao, LI Huaqiang, FAN Pei. Reactive power optimization of AC/DC power system based on singular value decomposition and interior point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 158-163.
- [15] 王林川, 于奉振, 孙继蓓, 等. 基于奇异值分解和内点法的交直流电力系统电压稳定裕度研究[J]. 电力系统

- 保护与控制, 2011, 39(20): 89-92.
WANG Linchuan, YU Fengzhen, SUN Jipu, et al. Research of AC/DC power system voltage stability margin based on singular value decomposition and interior-point method[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 89-92.
- [16] 曾嘉俊, 刘志刚, 何士玉, 等. 一种基于子区域粒子群的无功优化算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 37-42.
ZENG Jiajun, LIU Zhigang, HE Shiyu, et al. Study of the reactive power optimization based on sub-region particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 37-42.
- [17] 姚煜, 蔡燕春. 离散粒子群与内点法结合的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 48-52.
YAO Yu, CAI Yanchun. A hybrid strategy based on DPSO and IPM for optimal reactive power flow[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 48-52.
- [18] 张利平, 陈浩天, 王伟锋, 等. 应用 PSO 算法改进 Elman 神经网络的双压凝汽器真空预测[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 53-57.
ZHANG Liping, CHEN Haotian, WANG Weifeng, et al. Application of PSO algorithm-modified Elman neural network in vacuum prediction for dual-pressure condensers [J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(3): 53-57.
- [19] 胡殿刚, 秦睿, 黄亭, 等. 基于免疫记忆粒子群优化算法的风火联合系统的多目标优化调度[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 20-26.
HU Diangang, QIN Rui, HUANG Ting, et al. Wind power integrated with thermal system multi-objective optimal dispatch based on immune memory particle swarm optimization algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 20-26.
- [20] 高本锋, 张学伟, 刘辛晔, 等. 高压直流输电保护定值整定流程的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 400-407.
GAO Benfeng, ZHANG Xuewei, LIU Xinye, et al. Research of HVDC protection value setting process [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 400-407.
- [21] 宋文峰, 孙栩, 王晶芳, 等. 大容量柔性直流入大连电网稳定性分析研究[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 146-149.
SONG Wenfeng, SUN Xu, WANG Jingfang, et al. Stability analysis research on dalian grid connected by the high capacity flexible HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 146-149.
- [22] 张强, 梁迪团, 刘宁. ± 800 kV 普洱换流站无功配置的研究分析[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 117-121.
ZHANG Qiang, LIANG Dituan, LIU Ning. Reactive power compensation scheme and configuration for ± 800 kV Pu'er converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 117-121.

收稿日期: 2016-05-30; 修回日期: 2016-08-05

作者简介:

刘 旺(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制以及交直流输电; E-mail: 64467639@qq.com

陈益峰(1986-), 男, 硕士研究生, 注册电气工程师, 研究方向为电气防雷与接地技术; E-mail: cheniyifeng@snerdi.com.cn

朱添安(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量补偿技术和磁控电抗器研究。E-mail: 414006442@qq.com

(编辑 姜新丽)