

电力系统无功补偿点的选取及优化方法

陶文娟¹, 钟俊², 黄宏光³

(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

摘要: 提出了以局部电压稳定 L 指标为基础的负荷节点电压稳定裕度概念和改进的粒子群优化算法。首先利用负荷节点电压稳定裕度识别系统电压弱节点, 以此作为无功补偿点, 该裕度不受负荷增长方式的影响, 具有确定的上下界。然后以有功网损最小为目标函数, 建立电力系统无功优化数学模型, 进而提出改进的粒子群算法。该算法中引入“飞回”策略及二次插值算子, 提高了算法的局部搜索能力和收敛速度。该方法使系统无功得到平衡, 无功源得到合理配置。最后, 对 IEEE 30 节点系统进行无功优化, Matlab 仿真结果表明了所提方法的有效性。

关键词: L 指标; 电压稳定裕度; 粒子群算法; 二次插值; 无功优化

Selecting and Optimization Method of Reactive Power Compensation Node in Power System

TAO Wenjuan¹, ZHONG Jun², HUANG Hongguang³

(College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University,
Chengdu 610065, China)

Abstract: In this paper, a concept of voltage stability margin with partial voltage stability L is the base and an improved particle swarm optimization algorithm are proposed. Firstly, the weak node of the system voltage is identified by the use of the voltage stability margin of the load node and this is taken as reactive power compensation point. The margin is free from load growth mode and has defined upper and lower bounds. Then, with the minimum active power network loss as objective function, the reactive power optimization mathematical model of the power system is set up, and the improved particle swarm algorithm is proposed further. Introduction of “fly back” strategy and quadratic interpolation in the algorithm improves partial search ability and convergence speed. With the proposed method, the reactive compensation of the system is balanced and the reactive power source is allocated reasonably. Finally, the reactive power optimization of the IEEE 30 node system is made and the effectiveness of the proposed method is shown by the Matlab simulation result.

Keywords: L index; voltage stability margin; particle swarm optimization algorithm; quadratic interpolation; reactive power optimization

0 引言

无功优化是电能质量的重要保障手段, 在电力系统中起着至关重要的作用, 因此一直备受研究人员的关注^[1]。电力系统无功优化由无功补偿点的确定、补偿容量的确定两部分组成。合理地选择无功补偿点, 对无功源进行适当的设置, 能有效维持系统电压水平、提高系统运行稳定性、还能避免无功功率远距离传输^[2], 从而降低电力系统网损, 使系统

安全稳定运行。

目前, 已有很多方法用于确定无功补偿点。文献[1]提出一种基于奇异值分解理论的方法来确定无功补偿点。文献[2]提出利用电压稳定裕度指标识置系统电压薄弱节点, 并在薄弱节点上安装补偿装置以提高节点的电压稳定性。文献[3]提出无功裕度指标, 通过比较无功裕度值的大小决定无功补偿点。文献[4]提出基于 Tellegen 定理的电压稳定裕度指标确定无功补偿点。但以上所述方法在具

收稿日期: 2017-02-13

基金项目: 四川省科技厅支撑项目(2016GZ0145)。

体计算过程中,均涉及高维矩阵求逆、计算量大、很难实现在线应用。而局部电压稳定 L 指标结构简单,概念清晰明了,计算速度快,有确定的上下界,其不受负荷增长方式的影响这一优势使得其对于不同负荷模型都能给出归一化的指标值^[5]。

因此本文在局部电压稳定 L 指标的基础上定义负荷节点电压稳定裕度,此裕度可反映节点电压稳定程度,用于识别系统电压稳定弱节点,将其作为无功补偿点;然后用优化算法确定无功补偿点的补偿容量。传统的无功优化算法,诸如非线性规划法、线性规划法、内点法等此类算法存在速度慢,收敛性差的缺点。而近年的一些智能算法,如蚁群算法、模拟退火法^[6]、遗传算法^[7]和粒子群算法^[8]等相继用于电力系统无功优化的研究中,他们的出现在一定程度上弥补了传统优化算法的不足,其中遗传算法在解决多变量、多约束、非线性等优化问题时展现了其特有的优势,其有效性也被广大研究人员所证实。但是遗传算法在用于大系统无功优化时易早熟、收敛速度慢、难以满足实时性,其参数大多依靠经验设置,严重影响了解的质量。而粒子群算法法则简单、容易实现且其不需要调整太多参数,收敛速度快。

综上所述,考虑双方面因素,本文首先计算每个负荷节点的电压稳定裕度并按大小进行排序,设置一个电压稳定裕度门槛值,选择电压稳定裕度小于门槛值的负荷节点作为无功补偿点;再运用改进粒子群的算法,计算各个无功补偿点的补偿容量。最后使得补偿点得到最佳补偿,使无功源得到合理的设置,有效降低了系统有功网损,提高了电压稳定性。本文的优化算法中引入了二次插值算子及“飞回”策略,采用分阶段调整加速因子及惯性权重,增强了算法的局部搜索能力及收敛速度。最后对IEEE 30节点进行仿真计算,并且将本文方法与未改进的基本PSO算法相比较,更加说明了本文方法的有效性。

1 无功补偿点的确定

1.1 L 指标

L 指标是在基尔霍夫电流定律的节点电压法基础上建立的电力网络节点方程^[9],方程为

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} & Y_{GK} \\ Y_{LG} & Y_{LL} & Y_{LK} \\ Y_{KG} & Y_{KL} & Y_{KK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_G \\ U_L \\ U_K \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I_G 、 U_G 分别为发电机节点的电流向量及电压向量; I_L 、 U_L 分别为负荷节点的电流向量及电压向

量; U_K 代表系统联络节点的电压向量; Y_{GG} 、 Y_{GL} 、 Y_{GK} 、 Y_{LG} 、 Y_{LL} 、 Y_{LK} 、 Y_{KG} 、 Y_{KL} 、 Y_{KK} 为节点导纳矩阵的子矩阵。

系统中联络节点的注入电流为0,可消去该项,式(1)变成如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_G \\ U_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $Y_{GG} = Y_{GG} - Y_{GK} Y_{KK}^{-1} Y_{KG}$; $Y_{GL} = Y_{GL} - Y_{GK} Y_{KK}^{-1} Y_{KL}$; $Y_{LG} = Y_{LG} - Y_{LK} Y_{KK}^{-1} Y_{KG}$; $Y_{LL} = Y_{LL} - Y_{LK} Y_{KK}^{-1} Y_{KL}$ 。

令 $Z_{LL} = Y_{LL}^{-1}$,可将式(2)化为

$$\begin{bmatrix} I_G \\ U_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} - Y_{GL} Z_{LL} Y_{LG} & Y_{GL} Z_{LL} \\ -Z_{LL} Y_{LG} & Z_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_G \\ I_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

负荷参与因子矩阵定义为 $F_{LG} = -Z_{LL} Y_{LG}$,对于网络中的任一个负荷节点 $j \in \alpha_L$,由式(3)可得相量关系为

$$U_j = \sum_{i \in \alpha_L} Z_{ji} I_i + \sum_{k \in \alpha_G} F_{jk} U_{GK} \quad (4)$$

式中: U_j 为第 j 个负荷节点的电压相量; F_{jk} 为负荷参与矩阵 F_{LG} 的第 j 行、第 k 列的元素; U_{GK} 为第 k 个发电机节点的电压相量; α_L 为负荷节点集合; α_G 为发电机节点集合。

则负荷节点 j 的电压稳定指标 L_j 可表示为

$$L_j = \left| 1 - \frac{\sum_{i \in \alpha_G} F_{ji} U_{GK}}{U_j} \right| \quad (5)$$

L 指标所需数据取自于已解的潮流计算的变量和参数。该指标对1的接近程度表示潮流的分散程度^[5,9]。 $L < 1.0$,表示节点电压稳定; $L = 1.0$,表示节点电压临界稳定; $L > 1.0$,表示节点电压失稳。

1.2 负荷节点电压稳定裕度

由前文所述,计算各负荷节点的局部电压稳定指标 L_j 与1.0的距离,可确定各负荷节点的电压稳定裕度,定义 M_j 为负荷节点电压稳定裕度,表示为

$$M_j = 1 - L_j \quad (6)$$

由式(6)可得系统的负荷电压稳定裕度表示为: $M = [M_1, M_2, \dots, M_n]$,其中 $n \in \alpha_L$ 。 M_j 值的大小直接映射了负荷节点的电压稳定程度, M_j 值越小,系统电压失稳的可能性越大,因此根据负荷节点电压稳定裕度 M_j 可以识别系统的电压稳定弱节点。对于给定的系统运行状态,设定一个电压稳定裕度门槛值 M_{\max} ,利用负荷节点电压稳定裕度按大小对节点进行排序,将电压稳定裕度小于门槛值的负荷节点即电压稳定弱节点集合(VMNS), $VMNS = \{U_j | 0 \leq M_j \leq M_{\max}, j \in \alpha_L\}$,作为无功补偿点。

2 基于改进粒子群算法的无功优化

2.1 电力系统无功优化数学模型

2.1.1 无功优化目标函数

本文将有功网损最小化作为目标函数,公式为

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{b=1}^{N_b} G_{b(i,j)} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (7)$$

状态变量需将其作为惩罚项加入到目标函数中,公式为

$$\min F = P_{\text{loss}} + \lambda_v \sum_{l=1}^{N_l} \left(\frac{U_{li} - U_{li \cdot \min}}{U_{li \cdot \max} - U_{li \cdot \min}} \right)^2 + \lambda_Q \sum_{i=1}^{N_g} \left(\frac{Q_{Gi} - Q_{Gi \cdot \min}}{Q_{Gi \cdot \max} - Q_{Gi \cdot \min}} \right)^2 \quad (8)$$

式中: P_{loss} 为有功网损; N_b 为网络支路总数; N_l 为负荷节点个数; N_g 为发电机个数; $G_{b(i,j)}$ 为第 b 条支路的电导; i, j 为支路两端节点号; U_i, U_j 分别为节点 i, j 的电压值; θ_{ij} 为节点 i, j 的电压相角差; $U_{li}, U_{li \cdot \min}, U_{li \cdot \max}$ 分别为负荷节点实际电压、负荷节点电压下限、负荷节点电压上限; $Q_{Gi}, Q_{Gi \cdot \min}, Q_{Gi \cdot \max}$ 分别为节点 i 上的发电机实际无功出力、发电机无功出力下限、发电机无功出力上限; λ_v 与 λ_Q 为惩罚系数。

2.1.2 等式约束即是潮流方程

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} + Q_{Ci} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$; P_{Gi}, Q_{Gi} 分别为节点 i 所接发电机的有功和无功出力; P_{Li}, Q_{Li} 分别为节点 i 所连负荷的有功和无功功率; Q_{Ci} 为无功补偿点的补偿容量; $G_{ij}, B_{ij}, \theta_{ij}$ 分别为节点 i, j 之间的电导、电纳和电压相角差; n 为节点总数。

2.1.3 不等式约束

不等式约束由控制变量约束和状态变量约束组成。

控制变量约束为

$$\begin{cases} Q_{Gi \cdot \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \cdot \max} & i = 1, 2, \dots, N_c \\ U_{Li \cdot \min} \leq U_{Li} \leq U_{Li \cdot \max} & j = 1, 2, \dots, N_g \\ T_{lk \cdot \min} \leq T_{lk} \leq T_{lk \cdot \max} & k = 1, 2, \dots, N_t \end{cases} \quad (10)$$

状态变量的约束为

$$\begin{cases} Q_{Gi \cdot \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \cdot \max} & i = 1, 2, \dots, N_g \\ U_{Li \cdot \min} \leq U_{Li} \leq U_{Li \cdot \max} & i = 1, 2, \dots, N_l \end{cases} \quad (11)$$

式中: Q_{Ci} 为无功补偿器补偿容量; U_{Gi} 为发电机端电压; T_{lk} 为可调变压器变比; Q_{Gi} 为发电机无功出力; U_{Li} 为负荷节点电压; N_g, N_c, N_t, N_l 分别为

PV 发电机数、无功补偿数、变压器可调分接头数、负荷节点数。

2.2 算法研究

2.2.1 标准粒子群优化算法

粒子群算法 PSO (particle swarm optimization) 是近年来发展的一种新型群体智能优化算法,最早追溯到 1995 年,由 Kennedy 和 Eberhart 两人提出^[10-12],其从鸟群的捕食行为得到启发来求解优化问题。PSO 中将优化问题的每一个潜在解比喻成搜索空间的一只鸟,称之为“粒子”。假设一个由 n 个粒子所组成的种群记为 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 在一个 D 维的搜索空间中搜索。其第 t 代粒子 i 所处的空间位置记为 $X_i^t = (X_{i1}^t, X_{i2}^t, \dots, X_{id}^t)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 粒子的速度为 $V_i^t = (V_{i1}^t, V_{i2}^t, \dots, V_{id}^t)$, 其个体历史最优位置为 $P_i^t = (P_{i1}^t, P_{i2}^t, \dots, P_{id}^t)$, 第 t 代的全局最优位置为 $P_g^t = (P_{g1}^t, P_{g2}^t, \dots, P_{gd}^t)$ 。粒子在每一次的迭代进程中,自身的速度及位置更新为

$$\begin{cases} V_i^{t+1} = \omega V_i^t + c_1 r_1 (P_i^t - X_i^t) + c_2 r_2 (P_g^t - X_i^t) \\ X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \end{cases} \quad (12)$$

式中: c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为 $(0, 1)$ 之间的随机数; ω 为惯性权重。

2.2.2 粒子群算法的改进

1) 二次插值算子。为解决粒子群算法后期收敛速度慢、局部搜索能力差的问题,提出改进的粒子群算法,在算法中引入二次插值算子,如式(13)所示。其产生的点是通过 p_l, p_j 及 p_g 3 点所形成的二次曲面的极小值点,具有局部搜索能力功能,因此能对个体最优位置以及全局最优位置进行局部搜索。为了指引个体历史最优位置的局部搜索,在公式(13)中,始终选择全局最优位置。

在一个 D 维的搜索空间中,第 t 代粒子 i 所处的空间位置记为 $X_i^t = (X_{i1}^t, X_{i2}^t, \dots, X_{id}^t)$, $i = 1, 2, \dots, n$, 粒子的速度为 $V_i^t = (V_{i1}^t, V_{i2}^t, \dots, V_{id}^t)$, 第 t 代粒子的个体历史最优位置为 $P_i^t = (P_{i1}^t, P_{i2}^t, \dots, P_{id}^t)$, 第 t 代粒子的全局最优位置为 $P_g^t = (P_{g1}^t, P_{g2}^t, \dots, P_{gd}^t)$, 随机从 N 个历史最优位置中选取两个位置 P_l 及 P_j , $l, j \neq g$ 。

令:

$$q_{ik} = \frac{1}{2} \frac{(p_{jk}^2 - p_{gk}^2)f(p_l) + (p_{lk}^2 - p_{jk}^2)f(p_j) + (p_{lk}^2 - p_{gk}^2)f(p_g)}{[(p_{jk} - p_{gk})f(p_l) + (p_{lk} - p_{jk})f(p_j) + (p_{lk} - p_{gk})f(p_g)] + e} \quad (13)$$

式中: f 为目标函数; e 为一个防止分母为 0 的小正数,令 $Q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{id})$, $i = 1, 2, \dots, N$

$$P_i = \begin{cases} Q_i & f(Q_i) < f(P_i) \\ P_i & f(Q_i) \geq f(P_i) \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N \quad (14)$$

2)分阶段调整加速因子和惯性权重。学习因子 c_1 和 c_2 用于粒子的速度更新,分别调整粒子的“自身经验”和“群体经验”。基本 PSO 算法往往忽略了粒子在各个阶段搜索的重心不同的问题,使 c_1 和 c_2 相等,粒子以相同的权重追踪两个“最佳位置”。而实际在搜索前期,粒子主要跟随个体历史极值运动,在搜索后期,粒子主要跟随种群历史极值运动,既保持了全局搜索精度又加快了收敛速度。

因此本文算法采用分阶段调整加速因子的策略,当 $t < \text{iter}_{\max}/2$ 时, $c_1 = 2$, $c_2 = 1$, 该阶段粒子主要跟随“自身经验”;当 $t \geq \text{iter}_{\max}/2$ 时, $c_1 = 1$, $c_2 = 2$ 时,粒子主要跟随“群体经验”。其中, t 代表当前迭代次数, iter_{\max} 表示最大迭代次数。

有研究指出,惯性权重值较大有利于全局搜索,而惯性权重值较小则更有利于局部搜索。合理设置惯性权重值可均衡算法的全局搜索与局部搜索能力^[13],在优化前期设置一个较大惯性权重,后期设置一个较小的惯性权重。本文选用 ω 将随着迭代进行,由较大值单调递减至较小值,可增强 PSO 算法搜索效率及收敛精度。具体改进如式(15)。

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot t / \text{iter}_{\max} \quad (15)$$

式中: ω_{\max} 为惯性权重 ω 的最大值,通常取值为 0.9; ω_{\min} 为惯性权重 ω 的最小值,通常取值为 0.4; t 为当前迭代次数; iter_{\max} 为最大迭代次数。

3)“飞回”策略。采用“飞回”策略对粒子的位置可以起到限制的作用,即是:倘若粒子在每次的迭代更新后,位置超出了控制变量范围空间,则让粒子回到其上一次迭代的位置,以保证在优化进程中每一个候选解的合理性。避免粒子总在搜索空间边缘搜索,难以跳出边界值的后果。

2.3 改进粒子群算法的无功优化步骤

改进的粒子群算法无功优化步骤如下所示:

步骤 1:输入系统原始数据。包括系统支路参数、各负荷节点数据、无功控制变量描述与各约束条件等,进行潮流计算。

步骤 2:根据潮流计算结果应用本文方法计算各个负荷节点电压稳定裕度值,并按大小进行排序,选择前 m 个 M_j 值较小的节点作为无功补偿点。

步骤 3:随机初始化一组粒子的位置和速度,计算每个粒子的适应度值,即目标函数值。确定个体历史最优位置及全局最优位置。

步骤 4:根据公式(13)和公式(14)更新个体历

史最优位置和全局最优值。

步骤 5:由迭代次数确定学习因子的值,根据粒子速度和位置公式(12)更新粒子速度和位置。

步骤 6:用新获得的粒子位置,计算新的粒子适应度值,重新确定每个粒子的个体历史最优位置及全局最优位置。

步骤 7:如果算法达到终止条件,则停止,输出优化结果,计算网损和无功补偿点的电压稳定裕度值,否则令 $t = t + 1$,转至步骤 4。

3 算例分析

本文对 IEEE 30 节点进行仿真,该系统有 4 台变压器,分别在支路 9-6、10-6、12-4、28-27 上,其变比上下限分别为 1.10、0.90;6 台发电机,分别在节点 1、2、5、8、11、13 上(节点 1 为平衡节点,节点 2、5、8、11、13 为 PV 节点);各节点电压上下限为 1.06、0.94;共 41 条支路,基准功率为 100 MVA。其他参数详见 Matpower5.1 中 case_ieee30 文件。

经潮流计算,按本文提出的方法计算得到系统关键负荷节点的电压稳定裕度排序见表 1。

表 1 关键负荷节点电压稳定裕度排序
Table 1 Key load nodes voltage ranked according to voltage stability margin

次序	节点号	电压裕度
1	30	0.176 87
2	26	0.296 26
3	7	0.375 30
4	29	0.524 96
5	28	0.645 80
6	5	0.666 53
7	8	0.674 24
8	15	0.720 05
9	4	0.751 04
10	25	0.795 39

如前文所述,负荷节点的电压稳定裕度 M_j 值越小,表示该节点的电压稳定性越差,越需要无功补偿,提高稳定性。本文设置电压稳定裕度门槛值为 0.6,因此选择表 1 中排在前 4 位的负荷节点作为无功补偿点。

采用改进的粒子群算法对 IEEE30 节点系统进行无功优化计算,确定补偿节点的补偿容量、发电机机端电压及变压器变比等控制变量。设置算法的群体规模 $\text{sizepop} = 20$,迭代次数 $\text{iter}_{\max} = 100$,惯性权重 ω 随迭代次数递减,由 0.9 线性递减至 0.4,算法终止准则以最大迭代次数为准。控制变量及有功网损优化前后的结果对比见表 2。补偿节点得

到补偿后,再使用 1.2 节所提方法计算补偿后的节点电压稳定裕度,前后结果对照见表 3。

表2 IEEE30节点系统的优化结果
Table 2 Optimization result of IEEE30 node system

	参数	优化前	优化后
发电机端电压	U_{G1} /p.u.	1.060	1.060
	U_{G2} /p.u.	1.043	1.060
	U_{G5} /p.u.	1.010	1.013
	U_{G8} /p.u.	1.010	1.018
	U_{G11} /p.u.	1.082	1.025
	U_{G13} /p.u.	1.071	1.060
变压器变比	$T_{9,6}$ /p.u.	0.978	1.025
	$T_{6,10}$ /p.u.	0.969	0.975
	$T_{12,14}$ /p.u.	0.932	1.000
	$T_{28,27}$ /p.u.	0.968	0.975
无功补偿容量/p.u.	Q_{C30} /p.u.	0	0.050
	Q_{C26} /p.u.	0	0.025
	Q_{C7} /p.u.	0	0.038
	Q_{C29} /p.u.	0	0.047
有功网损/MW		17.557	17.380
网损降低幅度/%		—	1.008

表3 补偿前后节点的电压裕度值
Table 3 Voltage margin of the node before and after compensation

负荷节点	补偿前	补偿后
	电压裕度	电压裕度
30	0.176 87	0.242 46
26	0.296 26	0.332 39
7	0.375 30	0.493 84
29	0.524 96	0.654 22

从表 2 可明显看出:初始状态下,系统有功网损为 17.557 MW,节点 11 和节点 13 电压越限。经本文算法优化计算补偿电容,变压器变比及发电机端电压后,较大程度地将有功网损降低到了 17.380 MW,电压也都均在正常范围内,无功补偿点得到最佳补偿,无功源得到合理的设置。由表 3 可以看出:采用本文算法进行补偿后节点的电压稳定裕度均有了不同程度的提高,增强了这些节点的电压稳定性。从而说明了本文方法在降低网损的同时还能有效提高系统电压稳定性。

为了进一步验证本文改进粒子群算法的有效性,将本文算法与标准 PSO 算法进行比较。算法分别重复运行 20 次后,取平均值,结果见表 4。不同算法的系统有功网损收敛曲线对比如图 1 所示。

从表 4 和图 1 可以看出:本文提出改进的粒子群算法可以有效减少有功网损,与初始运行状态下的有功网损相比,网损降低幅度为 1.008%;而基本 PSO 算法较初始状态有功网损而言,变化并不明

显。且本文算法有更快的收敛速度和更好的寻优能力。本文算法的目标函数值从 39 代开始,已经下降至 17.400 MW 以下,且一直寻着优化目标方向搜索,最终找到最优解 17.380 MW,而基本 PSO 算法找到的最优解 17.544 MW。

表4 算法对比结果
Table 4 Comparison result of different algorithms

优化算法	最优值/MW	最差值/MW	平均值/MW
基本 PSO	17.501	17.554	17.544
本文算法	17.355	17.506	17.380

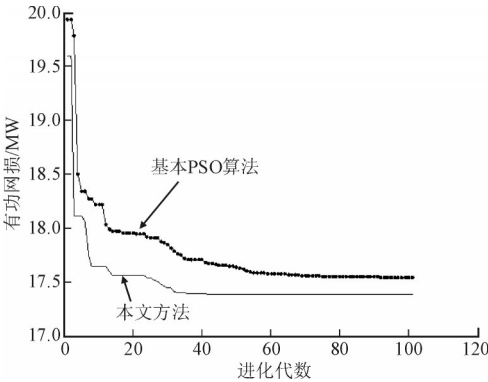


图1 不同算法的网损收敛曲线
Fig. 1 Network losses convergence curves with different algorithms

为说明所选无功补偿节点个数的准确性,将电压稳定裕度门槛值设为 0.7 时,选择表 1 中排在前 7 的负荷节点作为无功补偿点,进行无功补偿。结果见表 5。

表5 不同补偿方案结果对比
Table 5 Result comparison of different compensation proposals

方案	补偿节点	总无功补偿量/p.u.	有功网损/MW
1	30、26、7、29	0.160	17.380
2	30、26、7、29、28、5、8	0.483	17.365

从表 5 中可以看出,虽然采用方案 2 有功网损相应有所降低,但是需要的总无功补偿量却比方案 1 多了不少,因此说明了本文所选无功补偿点个数的合理性。

4 结束语

本文在局部电压稳定 L 指标的基础上提出负荷节点电压稳定裕度概念,计算每个负荷节点的电压稳定裕度按大小进行排序,选择电压稳定弱节点作为无功补偿点。针对粒子群算法后期收敛速度慢,局部搜索能力差的缺点,提出改进的粒子群算法来求解无功优化问题。在基本 PSO 算法的基础上,从惯性权重、加速因子等方面作了相应改进,并

引入“飞回”策略和二次插值算子。最后对 IEEE 30 节点进行仿真,从算例分析结果可知,该方法增强了算法的寻优能力和收敛速度,使得无功源得到合理配置,无功补偿点得到最佳补偿,有效减少了有功网损,提高了电压的稳定性。

参考文献

- [1] 张志强,苗友忠,李笑蓉,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-EPSA, 2015, 27(3):92-97.
- [2] 王勤,方鸽飞. 考虑电压稳定性的电力系统多目标无功优化[J]. 电力系统自动化, 1999(3):31-34.
WANG Qin, FANG Gefei. Multi-objective reactive power optimization considering voltage stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999(3): 31-34.
- [3] 刘传铨,张焰. 电力系统无功补偿点及其补偿容量的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(12):78-81.
LIU Chuanquan, ZHANG Yan. Confirmation of reactive power compensation node and its optimal compensation capacity[J]. Power System Technology, 2007, 31(12):78-81.
- [4] 杨晓萍,张强,薛斌,等. 考虑静态电压稳定性的多目标无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 138-144.
YANG Xiaoping, ZHANG Qiang, XUE Bin, et al. Multi-objective reactive power optimization with static voltage stability [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(1): 138-144.
- [5] 闻宇,谷君,王宁. 基于L指标的风电场静态电压稳定性研究[J]. 电气应用, 2015(S2):738-745.
WEN Yu, GU Jun, WANG Ning. Study on static voltage stability of wind farm based on L index [J]. Electrical Applications, 2015(S2):738-745.
- [6] 籍向兵. 基于模拟退火算法的区域电网无功补偿优化技术研究[J]. 科技信息, 2014(12):194-195.
- [7] 王银川,滕欢,邹彤阳. 含双馈风力发电机组的配电网无功电压优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(2): 60-66.
WANG Yinchuan, TENG Huan, ZOU Tongyang. Reactive power and voltage optimization for distribution system with doubly fed induction generators [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(2):60-66.
- [8] 陈兰芝,王克文. 基于粒子群算法的24小时综合无功协调优化[J]. 电测与仪表, 2016, 53(12):107-110.
CHEN Lanzhi, WANG Kewen. The 24 hours reactive power optimization and coordination based particle swarm algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(12):107-110.
- [9] 李国庆,姜涛,徐秋蒙,等. 基于局部电压稳定指标的裕度灵敏度分析及应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 1-5.
LI Guoqing, JIANG Tao, XU Qiumeng, et al. Sensitivity analysis based on local voltage stability margin and its application [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4):1-5.
- [10] 马草原,孙展展,葛森,等. 改进二进制粒子群算法在配电网重构中的应用[J]. 电测与仪表, 2016, 53(7):84-88.
MA Caoyuan, SUN Zhazhan, GE Sen, et al. The application of improved binary particle swarm optimization in distribution network reconfiguration [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(7):84-88.
- [11] 孙卓新,朱永强,倪一峰,等. 基于粒子群算法的含光伏电站的配电网无功优化[J]. 电力建设, 2014, 35(4):25-30.
SUN Zhuoxin, ZHU Yongqiang, NI Yifeng, et al. Reactive power optimization of distribution network with photovoltaic power plant based on PSO [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(4):25-30.
- [12] 郁磊. MATLAB智能算法30个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2015.
- [13] 吕锋,张健. 基于PSO的SVC附加阻尼控制器参数优化设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(2):11-15.
LYU Feng, ZHANG Jian. Parameter optimization design of PSO-based SVC additional damping controller [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(2): 11-15.

作者简介:

陶文娟(1992—),女,硕士研究生,研究方向为信号与信息处理、电压协调控制技术。

钟俊(1972—),男,副教授,研究方向为电力系统中的信号与信息处理、嵌入式系统技术。

黄宏光(1961—),男,副教授,研究方向为移动通信教学及研究、电力通信工程设计、计算机信息系统开发技术。