

一种适应于地区电网无功电压优化控制的新方法

董岳昕, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 提出了一种用于地区电网无功电压优化控制的新方法。根据目标函数中网损与节点电压和注入无功的相关性, 动态自适应调整罚因子, 以克服一般方法罚因子选取不灵活的问题; 针对基本粒子群算法易陷入局部最优的现象, 引入了一种改进的随机交叉粒子群算法, 利用群体最优位置的信息改善粒子自身信息, 增加种群多样性, 加快算法收敛速度; 为改善非理想运行情况下的电压质量以及实现省地自动电压控制(AVC)系统的协调控制, 运用逐级优化和二次优化策略。将所提算法和控制策略用于地区电网AVC系统, 运行结果表明该方法是可行有效的, 能够显著减小网损并改善电压质量。

关键词: 无功优化; 罚因子动态调整; 随机交叉; 逐级优化; 二次优化

A new approach for reactive power/voltage optimization control of regional grid

DONG Yue-xin, YANG Hong-geng

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper puts forward a new approach for reactive power/voltage optimization control. Based on the correlation between network power loss and node voltages/injected reactive power, a dynamic adaptive adjusting method for penalty factors is presented to overcome the problem that penalty factors are inflexible in usual methods. Particle swarm optimization algorithm (PSO) is utilized in the optimization process. Original PSO is easy to fall into a locally optimized point, to address this problem, an improved stochastic crossover PSO is proposed, which can modify the positions of the current particles using the information of the best particle. The proposed algorithm can increase the population diversity and enhance the convergence speed. In addition, stage-by-stage optimization and secondary optimization strategies are introduced in order to improve the voltage quality and achieve coordinated control with provincial and regional automatic voltage control (AVC) systems. The proposed algorithm and control strategy are applied to regional AVC, the results of practical grid verify the feasibility and effectiveness of the approach, and it can reduce the power loss and improve the voltage quality of power systems.

Key words: reactive power optimization; penalty factors dynamic adjusting; stochastic crossover; stage-by-stage optimization; secondary optimization

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0049-06

0 引言

地区电网无功电压优化对改善电压质量、减小网损, 保证电力系统安全、经济运行具有十分重要的意义。电压无功优化的控制变量主要指发电机机端电压、有载调压变压器分接头和并联补偿电容器组; 状态变量主要指负荷节点电压和发电机注入无功功率。以系统的有功损耗最小作为优化目标时, 将状态变量的不等式约束以罚函数的形式加入目标函数中, 但其中罚因子的选取对优化算法的结果影响很大。文献[1]给出了状态变量罚因子的大小, 但并未阐述罚因子是如何确定的。文献[2-3]中罚因子

与优化算法迭代次数成非线性关系, 且越界量越大, 罚因子越大, 罚因子过大时, 容易陷入局部最优。文献[4]中罚因子是算法迭代次数的线性表达式, 罚因子的最大与最小值难以选取, 随着迭代次数的增加, 罚因子线性增大, 没有考虑到网损与节点电压及注入无功功率间的相关性。

地区电网无功电压优化时, 因电网调节能力有限, 常常会遇到搜索范围内的优化解满足不了所有节点的电压无功约束条件的情况。文献[5]基于负荷预测确定控制时段后, 利用有载调压变压器(OLTC)对电压越限时刻进行二次调节, 以改善电压水平。文献[6-8]引入不可行度的概念, 在搜索

过程中允许约束条件有适度越界, 扩大算法的搜索域。文献[9]中当邻域解普遍不满足约束条件时, 将目标函数切换为以当前电压偏离额定电压最小为目标, 当邻域解普遍回到可行域后, 将目标函数重新切换为以全天内电能损耗最小为目标。

针对以上问题, 本文基于无功优化目标函数中网损与节点电压及注入无功的相关性, 提出了动态自适应调整罚因子的方法, 并采用粒子群优化算法(PSO)求解。为改善 PSO 算法在进化后期粒子失去多样性, 收敛速度变慢、易陷入局部最优等缺点, 引入了一种改进的随机交叉粒子群算法, 以产生优良粒子, 增加种群多样性, 提高收敛速度。当电网不具备足够的电压无功调节能力时, 提出了逐级优化策略, 在非理想运行情况下, 扩大算法搜索空间, 以保证具有优先级的节点电压无功不越界。同时为实现省地自动电压控制系统(AVC)联合协调控制, 采用二次优化控制策略。以本文算法作为核心优化算法的 AVC 系统, 已在多个地区电网投入运行。

1 无功优化数学模型

本文以系统的有功损耗最小为优化目标, 将 PQ 节点电压和发电机无功功率越限以罚函数的形式加入到目标函数中^[10-11], 同时将控制设备动作次数还原为经济成本^[12-13], 扩展的目标函数为:

$$\min F = P_{\text{loss}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{PQ}}} \lambda_{v_i} (U_i - U_{i\text{lim}})^2 + \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} \lambda_{q_i} (Q_i - Q_{i\text{lim}})^2 + \sum_{i=1}^{N_T} C_{T_i} \Delta X_{T_i} + \sum_{i=1}^{N_C} C_{C_i} \Delta X_{C_i} + \sum_{i=1}^{N_G} C_{G_i} \Delta Q_{G_i} \quad (1)$$

$$U_{i\text{lim}} = \begin{cases} U_{i\text{max}} & U_i > U_{i\text{max}} \\ U_i & U_{i\text{min}} \leq U_i \leq U_{i\text{max}} \\ U_{i\text{min}} & U_i < U_{i\text{min}} \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_{i\text{lim}} = \begin{cases} Q_{i\text{max}} & Q_i > Q_{i\text{max}} \\ Q_i & Q_{i\text{min}} \leq Q_i \leq Q_{i\text{max}} \\ Q_{i\text{min}} & Q_i < Q_{i\text{min}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{loss} 为系统的有功损耗; N_{PQ} 、 N_{PV} 、 N_T 、 N_C 、 N_G 分别为 PQ 节点个数、PV 节点个数、可调变压器台数, 补偿电容器节点数和参与无功调节的发电机台数; U_i 、 $U_{i\text{max}}$ 、 $U_{i\text{min}}$ 分别为节点电压、电压上限值和下限值; Q_i 、 $Q_{i\text{max}}$ 、 $Q_{i\text{min}}$ 分别为节点无功、无功上限值和下限值; λ_{v_i} 、 λ_{q_i} 分别为电压罚因子和无功罚因子; ΔX_{T_i} 、 C_{T_i} 为变压器抽头的变化量和调节代价; ΔX_{C_i} 、 C_{C_i} 为补偿电容器的组数变化量和调节代价; ΔQ_{G_i} 、 C_{G_i} 为发电机无功出力变化量和调节成本。

实际工程应用中, 设备调节代价的计算不必苛求精确^[12]。以变压器为例, 补偿电容器的调节代价可类似计算。若第 i 台变压器的成本为 F_{T_i} 元, 允许抽头的调节次数为 T_{T_i} 次, 抽头永远不调整时的预期寿命为 a_{T_i} 年, 经过 T_{T_i} 次调整后寿命缩短到 a'_{T_i} 年, 则该变压器抽头的调节代价(元/次)为

$$C'_{T_i} = F_{m_{T_i}} + F_{T_i} (a_{T_i} - a'_{T_i}) / (a_{T_i} T_{T_i}) \quad (4)$$

式中 $F_{m_{T_i}}$ 为调整设备所增加的运行维护工作量。

以功率形式表示的调节代价(kW/次)为

$$C_{T_i} = C'_{T_i} / \gamma \tau \quad (5)$$

式中: γ 为电能单价; τ 为优化的时间间隔。

电力市场环境下发电机无功出力的成本包括固定成本和变动成本, 固定成本指发电机总投资成本分摊到无功容量的那一部分, 变动成本指为提供无功服务所引起的损耗以及所造成的机会成本^[14]。发电机的调节成本(元/kvar)同样可按式(5)进行换算, 用功率形式表示(kW/kvar)。

2 罚因子的动态自适应调整

惩罚项的作用是把变量的越界信息融入目标函数, 使目标函数的增减趋势在越界点处发生改变; 越界量越大, 惩罚项数值也越大, 从而使目标函数额外地增大。如图 1 所示。

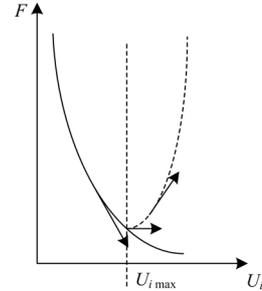


图 1 惩罚项的作用

Fig.1 Action of the penalty function

考虑到网损与节点电压和注入无功的相关性, 根据优化目标对每个节点电压无功的灵敏程度, 对每个节点分别求取其对应的罚因子, 区别于以往罚因子的统一化处理, 对其实现了动态自适应调整, 使目标函数构成更加合理, 有利于优化算法搜索到全局最优解。

2.1 电压罚因子的确定

在确定电压罚因子时, 单独考虑式(1)中第一项与第二项, 对节点 i 的电压 U_i 求偏导, 使其等于零, 如式(6)所示, 求出 λ_{v_i} 取其绝对值作为节点 i 处的电压惩罚因子, 体现了该节点与网损的相

关性。

$$\frac{\partial F}{\partial U_i} = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial U_i} + 2\lambda_{q_i}(U_i - U_{i\text{lim}}) = 0 \quad (6)$$

上式中的 $(U_i - U_{i\text{lim}})$ 可根据实际需要, 设为一个固定值, 其值越小, 目标函数对电压越限量越敏感。

其中 $\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial U_i}$ 的计算过程如下。

如图 2 所示的等值支路, K 为支路变比 (若为普通线路支路, $K=1$), Z_{ij} 为支路阻抗; 网损表达式如下:

$$P_{\text{loss}} = \sum G_{ij}(U_i^2 + \frac{U_j^2}{K^2} - \frac{2U_i U_j}{K} \cos \theta_{ij}) \quad (7)$$

式中: G_{ij} 为支路电导; U_i 和 U_j 分别为节点 i 和 j 的电压; θ_{ij} 为节点 i, j 间的电压相角差。

网损分别对节点 i, j 的电压求偏导, 可得

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial U_i} = \sum_{j \in i} G_{ij}(2U_i - \frac{2U_j}{K} \cos \theta_{ij}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial U_j} = \sum_{i \in j} G_{ij}(\frac{2U_j}{K^2} - \frac{2U_i}{K} \cos \theta_{ij}) \quad (9)$$

式中: $j \in i$ 表示求和仅针对与 i 节点相连的支路, $i \in j$ 表示求和仅针对与 j 节点相连的支路。

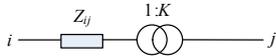


图 2 支路等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of a branch

2.2 无功罚因子的确定

如图 2 所示, 以节点 j 为例, j 点注入的无功功率会影响该节点的电压, 从而影响系统网损。单独考虑式 (1) 中第一项与第三项, 目标函数 F 对 j 侧的电压 U_j 求偏导, 令其为零, 如式 (10) 所示, 求出 λ_{q_j} 取其绝对值作为节点 j 处的无功惩罚因子。

$$\frac{\partial F}{\partial U_j} = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial U_j} + 2\lambda_{q_j}(Q_j - Q_{j\text{lim}}) \frac{\partial Q_j}{\partial U_j} = 0 \quad (10)$$

其中 $\frac{\partial Q_j}{\partial U_j}$ 的求取如下。如图 2 所示的支路, 流经 Z_{ij} 的电流为:

$$\dot{I}_{ij} = \frac{\dot{U}_i - \frac{\dot{U}_j}{K}}{Z_{ij}} \quad (11)$$

j 侧的功率为:

$$P_{ji} + jQ_{ji} = -\frac{\dot{U}_j}{K} \dot{I}_{ij}^* \quad (12)$$

由于输电线路两端有等值对地电容, 故从节点 j 侧

注入线路的无功功率还应加上线路的充电功率:

$$Q_j = Q'_{ji} + \frac{Y_0}{2} U_j^2 \quad (13)$$

式中, Y_0 为输电线路充电电容的容纳, 若为变压器支路, 其值为零。

将式 (11)、(12) 代入式 (13), 并以极坐标形式表示, 最终化简后可得:

$$Q_j = \sum_{i \in j} [\frac{U_i U_j}{K} (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) - \frac{B_{ij}}{K^2} U_j^2 + \frac{Y_0}{2} U_j^2] \quad (14)$$

式中 B_{ij} 为支路电纳。

式 (14) 对 U_j 求偏导, 可得:

$$\frac{\partial Q_j}{\partial U_j} = \sum_{i \in j} [\frac{U_i}{K} (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) - \frac{2B_{ij}}{K^2} U_j + Y_0 U_j] \quad (15)$$

3 改进的随机交叉粒子群算法

3.1 基本粒子群算法

1995 年, Kennedy 和 Eberhart 博士首次提出粒子群算法^[15]。PSO 算法是一种随机优化算法, 初始化一群随机粒子, 通过多次迭代搜索到最优解。每个粒子根据如下公式更新自己的速度和在解空间中的位置:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \cdot r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \cdot r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (16)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (17)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$, m 为种群规模; $d=1, 2, \dots, n$, n 为解空间的维数; k 为当前迭代次数; ω 为惯性权重, 在优化过程中, 可按式 (18) 线性减小; c_1 和 c_2 为加速因子; r_1 和 r_2 为均匀分布于 $[0, 1]$ 内的随机数; v_{id} 为粒子 i 的第 d 维空间速度; x_{id} 为粒子 i 的第 d 维空间位置; p_{id} 为粒子 i 的第 d 维个体极值; p_{gd} 为第 d 维群体极值。

$$\omega^k = \omega_{\text{max}} - \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{I_{\text{ter max}}} k \quad (18)$$

式中: $I_{\text{ter max}}$ 为最大迭代次数; ω_{max} 、 ω_{min} 为惯性权重的最大和最小值, 一般分别取为 0.9 和 0.4。

3.2 改进的随机交叉粒子群算法

PSO 算法在进化后期, 粒子失去多样性, 搜索效率不高、收敛速度变慢、易陷入局部最优解。为增加种群多样性, 基于文献^[16]的随机交叉粒子群算法, 本文提出了改进的随机交叉策略。

将每个粒子与当前的全局极值进行随机交叉, 从全局极值中随机选取一部分分量, 与粒子 i 中对应的分量进行交换, 得到交叉后的新粒子 i' , 计算 i'

的适应度，若 i 适应度较优，则用粒子 i' 代替 i 。因计算适应度值需要调用潮流程序，为了满足实时性要求，本文对每个粒子只随机交叉一次。粒子 i' 在解空间中的位置按式 (19) 产生：

$$x'_{id} = \begin{cases} x_{id} & rand(0,1) \geq C_r \\ p_{gd} & rand(0,1) < C_r \end{cases} \quad (19)$$

式中： $rand(0, 1)$ 为 $(0, 1)$ 间的随机数； C_r 为随机交叉率。

本文引入随机交叉策略，利用群体最优位置的信息改善当前粒子自身信息，以产生优良粒子，增加种群多样性，促使粒子快速向全局最优位置搜索，加快收敛速度，提高算法的寻优能力。

4 逐级优化和二次优化控制策略

4.1 逐级优化策略

通常的约束处理技术，仅在解空间的可行域内搜索。然而，对于约束较严的问题且控制变量搜索范围有限时，不可行解的空间很大，将寻优范围限制在可行域内很难找到最优解。此外，一些不可行解，尤其在可行解边界的不可行解，常常离最优解更近，如图 3 所示，不可行解 a_1 和 a_2 均比可行解 b 点更接近最优解。因此，可将约束条件放宽，形成图中虚线区域，有助于算法优化解更好地满足状态变量限值条件。

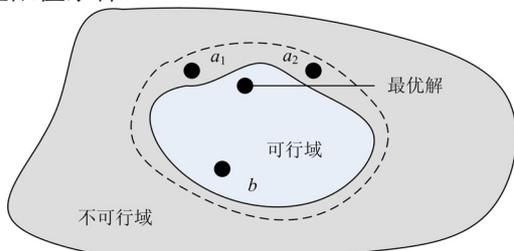


图 3 可行域与不可行域

Fig.3 Feasible region and infeasible region

基于以上原理，本文提出了逐级优化策略。地区电网优化控制时，可以设定具有优先级的母线侧，优先满足该侧电压不越界。遇到非理想情况，即当电网不具备足够的调节能力，算法优化解不能满足所有节点的电压无功约束条件时，根据控制目标优先级的高低，以及变电站的负载水平，利用辐射网中节点的树状关系，可以适当放宽相关联的非优先级节点的限值条件。

采用粒子群算法优化时，首先进行理想级优化，指在满足潮流平衡、电压无功限值约束、开关投切次数下的网损最小的控制方案。优化后，若所有节点的电压无功约束条件全部满足，则结束优化；否

则，若优先级节点有越限，转入下一级优化。

进入二级优化后，算法优先考虑每个站具有优先级的节点的电压无功，保证其不越界，适当放宽该站非优先级节点限值条件。优化后，若优先级节点还有越限，则继续转入下一级优化，在前一级优化放宽限值基础之上，搜索与该站相关联的上一电压等级的变电站，放宽上级站非优先级节点限值条件。

限值放宽量可根据实际电网情况适当选取。放宽限值时，还要考虑到变电站的负载水平。负载率公式定义如下：

$$\beta_i = \frac{S_i}{S_{i\max}} \quad (20)$$

式中： β_i 为变电站 i 的负载率； S_i 、 $S_{i\max}$ 分别为变电站 i 的负载量和最大负载能力。负载率应满足：

$$\beta_{i\min} \leq \beta_i \leq \beta_{i\max} \quad (21)$$

式中： $\beta_{i\min}$ 、 $\beta_{i\max}$ 分别为轻负载率和重负载率。根据经验，本文算例中取值分别为 0.3 和 0.8。

考虑到逆调压要求，若 β_i 超过上限 $\beta_{i\max}$ ，即变压器带重负载运行，电压偏低，则电压下限值不可放宽；若 β_i 超过下限 $\beta_{i\min}$ ，即变压器带轻负载运行，电压偏高，则电压上限值不可放宽；若负载率满足式 (21)，上下限可同时放宽。

4.2 二次优化策略

为实现省地 AVC 系统联合协调控制，省调 AVC 定时向地调传递协调变量的考核限值，即 220 kV 变电站关口功率因数及电压限值。本文设计了二次优化策略，以满足协调变量的控制要求。

图 4 给出了协调控制示意图，地区 AVC 系统首先完成本区域的电压无功优化。当接收到省调 AVC 下发的协调命令后，将协调变量控制目标作为本身控制的约束条件处理，完成二次优化，满足省调 AVC 下发的 220 kV 变电站功率因数及电压考核要求。正常情况下，二次优化不能违反本区域的约束

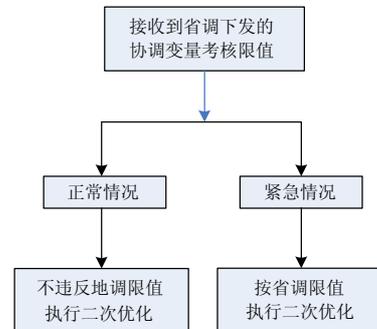


图 4 省地 AVC 协调控制示意图

Fig.4 Sketch of coordinated control with provincial and regional AVC

条件, 否则停止二次优化, 并将优化结果反馈给省调 AVC, 以便省调系统对协调控制策略进行修正。紧急情况下, 省调系统不具备调节能力, 只能利用地调侧作为无功支撑, 此时以地调侧的全部实际控制能力为准。

5 算例分析

以某 53 节点地区电网为例, 该电网包括 2 座 220 kV、3 座 110 kV 和 9 座 35 kV 变电站, 有 19 台有载调压变压器和 23 组可投切电容器。根据现场运行要求 220 kV、110 kV 和 10 kV 电压限值为 1.02~1.06, 35 kV 电压限值为 1~1.07, 功率基准值取为 100 MVA。本文算法采用 C# 语言编写, 基于 VS2005 平台, 运行环境为 Intel Pentium Dual 1.6 GHz, 1 G 内存。

粒子群算法中, 种群规模取为 40, 最大迭代次数为 100 次, 抽头调节代价取为 8 kW/次, 电容器组投切代价为 5 kW/次。潮流计算后可得到初始网损 0.014 484 7。将本文动态自适应调整罚因子的方法与静态罚因子法^[1]和线性罚因子法^[4]进行比较, 每种方法各计算 30 次, 表 1 给出了三种方法的优化结果。由表 1 可以看出, 本文方法最优网损为 0.013 269 9, 与初始值相比, 网损下降率为 8.3868%, 可见本文提出的动态自适应调整罚因子的方法得到了更好的全局最优解。

表 1 不同方法网损比较

Tab.1 Comparison of power loss by different methods

方法	最优网损	最差网损	平均网损	标准偏差
静态罚因子	0.0134543	0.0148107	0.0140992	0.0003631
线性罚因子	0.0133032	0.0145205	0.0139479	0.0003471
自适应罚因子	0.0132699	0.0138792	0.0136275	0.0001748

为了直观反映基本粒子群算法与本文的改进随机交叉粒子群算法的差别, 图 5 给出了两种算法的收敛特性曲线。从图中可见, 本文的改进粒子群算法优化结果更好, 且大约迭代 30 次时已经收敛, 表现出很高的优化效率。

为验证逐级优化和二次优化策略的有效性, 将本文策略与常规策略对电网优化的结果进行对比, 优化前整个电网有 6 个优先级节点越限, 优化后的结果如表 2 和图 6 所示。常规策略优化后仍有 4 个优先级节点越限, 而本文策略可以使优先级节点电压全部恢复到限值 1.02~1.06 以内。比较两种策略 PQ 节点电压越限量的 1-范数, 即

$\|U_i\|_1 = \sum_{i=1}^{N_{PQ}} |U_i - U_{lim}|$, 从表 2 可以看出, 虽然两种策

略的电压越限量之和相差不大, 但本文策略可以保证优先级节点全部满足约束条件。本文策略根据电网运行情况放宽限值进入逐级优化, 计算时间稍长, 然而可以有效地改善电压质量, 所以时间花费是值得的。

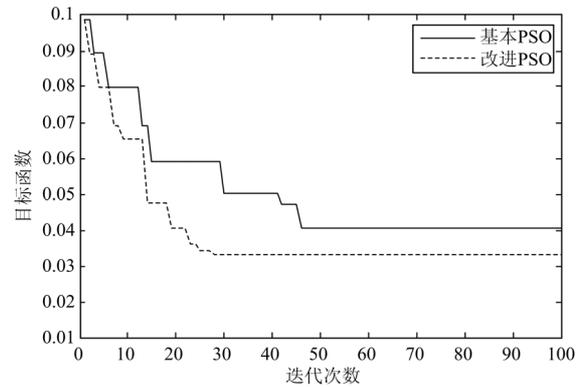


图 5 两种算法的收敛曲线图

Fig.5 Convergence curves of two algorithms

表 2 不同方法优化结果比较

Tab.2 Comparison of optimal results by different methods

方法	优先级节点越限个数	$\sum U_i - U_{lim} $	优化时间 / s
常规策略	4	0.030 51	3.298
本文策略	0	0.028 45	5.477

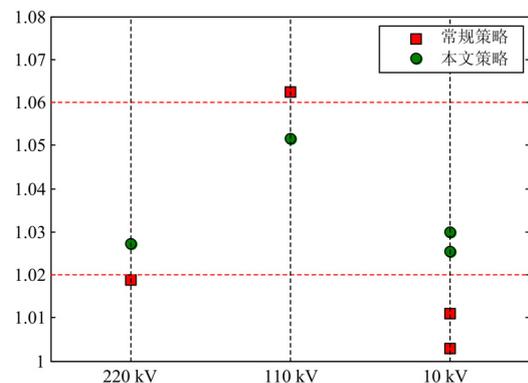


图 6 优先级节点电压值比较

Fig.6 Comparison of priority node voltages

6 结论

(1) 本文提出了动态自适应调整无功优化目标函数罚因子的方法。以网损最小为优化目标, 不等式约束采用罚函数法处理时, 根据优化目标对每个节点电压无功的灵敏程度, 分别求取其对应的罚因子, 实现了动态调整, 可以有效地提高优化算法的寻优能力。

(2) 针对粒子群算法易陷入局部最优的问题, 提出了一种改进的随机交叉粒子群算法。利用群体最优位置的信息改善粒子自身信息, 增加种群多样性, 能够加快算法收敛速度。

(3) 当电网不具备足够的电压无功调节能力时, 采用逐级优化策略, 适当放宽非优先级节点的约束边界, 扩大算法的搜索空间, 以保证优先级节点电压无功满足限值条件。

(4) 将本文算法用于地区 AVC 系统时, 为满足省地 AVC 系统协调控制要求, 引入了二次优化策略, 可以进一步优化无功潮流, 满足电网运行需要。

参考文献

- [1] Kenji Iba. Reactive power optimization by genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9 (2) : 685-692.
- [2] ZHAO Bo, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. Optimal power flow using particle swarm optimization and non-stationary multi-stage assignment penalty function[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19 (5) : 47-54.
- [3] 俞俊霞, 赵波. 基于改进粒子群优化算法的最优潮流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (4) : 83-88.
YU Jun-xia, ZHAO Bo. Improved particle swarm optimization algorithm for optimal power flow problems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17 (4) : 83-88.
- [4] 陈功贵, 李智欢, 孙永发, 等. 电力系统无功优化的 LRS_PSO算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20 (4) : 92-97.
CHEN Gong-gui, LI Zhi-huan, SUN Yong-fa, et al. LRS-PSO algorithm for optimal reactive power flow[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20 (4) : 92-97.
- [5] 王秀丽, 李正文, 胡泽春. 高压配电网无功/电压的日分段综合优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7) : 5-9.
WANG Xiu-li, LI Zheng-wen, HU Ze-chun. Time-interval based comprehensive control strategy for daily voltage/VAR optimization in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (7) : 5-9.
- [6] MU Sheng-jing, SU Hong-ye, MAO Wei-jie, et al. A new genetic algorithm to handle the constrained optimization problem[C].//Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas(USA): 2002: 739-740.
- [7] 王跃宣, 刘连臣, 牟盛静, 等. 处理带约束的多目标优化进化算法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2005, 45 (1) : 103-106.
WANG Yue-xuan, LIU Lian-chen, MU Sheng-jing, et al. Constrained multi-objective optimization evolutionary algorithm[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45 (1) : 103-106.
- [8] 王剑, 张善. 考虑不可行度的改进遗传算法在电压无功调整中的研究[J]. 山东大学学报:工学版, 2008, 38 (6) : 21-24.
WANG Jian, ZHANG Shan. Voltage regulation research of an improved genetic algorithm considering infeasibility degree[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 38 (6) : 21-24.
- [9] 摄伟, 刘健, 周艳. 考虑时段优化的地区电网无功电压优化控制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4) : 31-35.
SHE Wei, LIU Jian, ZHOU Yan. Power systems reactive power regulation considering schedule optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (4) : 31-35.
- [10] 张登科, 黄攀雄. 基于随机微粒群算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (12) : 35-38.
ZHANG Deng-ke, HUANG Zhi-xiong. Reactive power optimization based on stochastic particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (12) : 35-38.
- [11] LI Dan, GAO Li-qun, LU Shun, et al. Adaptive particle swarm optimization algorithm for power system reactive power optimization[C].//Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York City(USA): 2007: 4733-4737.
- [12] 张勇军, 任震. 无功电压动态控制的分布式协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4) : 34-38.
ZHANG Yong-jun, REN Zhen. Distributed cooperative optimization for reactive power/voltage dynamic control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (4) : 34-38.
- [13] 何佳, 吴耀武, 娄素华, 等. 基于微粒群优化算法的电力系统动态无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31 (2) : 47-51.
HE Jia, WU Yao-wu, LOU Su-hua, et al. Dynamic reactive power optimization based on particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31 (2) : 47-51.
- [14] 徐楠. 电力市场环境下的无功问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
XU Nan. Research on reactive power related issues in electricity market environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [15] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C].//IEEE International Conference on Neural Networks. Perth(Australia): 1995: 1942-1948.

(下转第 109 页 continued on page 109)

- process monitoring with independent components[C]. //IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference. 2004: 170-175.
- [9] 王加阳, 谢颖. 基于量子粒子群优化的最小属性约简算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(12): 148-150.
WANG Jia-yang, XIE Ying. Minimal attribute reduction algorithm based on quantum particle swarm optimization[J]. Computer Engineering, 2009, 35(12): 148-150.
- [10] WANG Xiang-yang, YANG Jie, TENG Xiao-long. Feature selection based on rough sets and particle swarm optimization[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(4): 459-471.
- [11] 程京, 等. 一个基于差别矩阵的属性约简改进算法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(4): 85-88.
CHENG Jing, et al. An updated algorithm for attribute reduction based on discernibility matrix[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2009, 36(4): 85-88.
- [12] 张利, 等. 基于粗糙集的启发式值约简的改进算法[J]. 仪器仪表学报, 2009(1): 82-85.
ZHANG Li, et al. Improved heuristic algorithm used in attribute value reduction of rough set[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009(1): 82-85.
- [13] ZHANG L, Lu X Y, WU H Y. An improved heuristic algorithm used in attribute reduction of rough set[C]. // Proceedings of the First International Symposium on Data, Privacy and E-Commerce(ISDPE). 2007: 44-46.
- [14] 徐凤生. 一种属性与值约简及规则提取算法[J]. 计算机工程与科学, 2008(2): 61-63.
XU Feng-sheng. An attribute and value reduction and rule extraction algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2008(2): 61-63.
- [15] 王英英. 基于粗糙集与决策树的配电网故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 794-798.
WANG Ying-ying, et al. Fault diagnosis method for distribution networks based on the rough sets and decision tree theory[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 794-798.
- [16] 孙卫祥, 等. 基于 PCA 与决策树的转子故障诊断[J]. 振动与冲击, 2007, 26(3): 72-74.
SUN Wei-xiang, et al. Rotor fault diagnosis based on PCA and decision tree[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(3): 72-74.
- [17] 高贇, 等. 连续量信息表决策值的离散化方法[J]. 西安科技大学学报, 2004, 24(4): 486-488.
GAO Bin, et al. Discretization methods on decision values of successive quantity information table[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2004, 24(4): 486-488.
- [18] 王国胤. Rough 集理论与知识获取[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
WANG Guo-yin. Rough set theory and knowledge acquisition[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [19] Quinlan J R. Introduction of decision trees[J]. Machine Learning, 1986 (1): 84-100.
- [20] 梁道雷, 等. 一种多变量决策树方法研究[J]. 计算机科学, 2008, 35 (1): 211-212.
LIANG Dao-lei, et al. A new multivariate decision tree algorithm[J]. Computer Science, 2008, 35 (1): 211-212.

收稿日期: 2009-08-04; 修回日期: 2009-09-30

作者简介:

张延松 (1983-), 男, 硕士研究生, 从事智能控制算法研究; E-mail: favourite200811@163.com

赵英凯 (1943-), 男, 教授, 博导, 从事智能控制、机器人控制研究。

(上接第 54 页 continued from page 54)

- [16] 王联国, 洪毅. 随机交叉粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (16): 69-71.
WANG Lian-guo, HONG Yi. Stochastic crossover particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45 (16): 69-71.

作者简介:

董岳昕 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化、电能质量; E-mail: dyxscu@126.com

杨洪耕 (1949-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电能质量分析与控制、区域电压无功控制等方面的研究与教学工作。

收稿日期: 2009-09-02; 修回日期: 2009-11-16