

基于模糊隶属度及区间算术的电网电压优化新算法

苏杰和, 陈旭, 张勇军

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 传统无功优化由于寻优策略复杂、计算机时较长, 目前尚较难应用于电网实时优化控制。基于最优电压模糊隶属度及区间潮流算法, 提出了一种简单快速的寻优新思路。先由电网能提供的控制变量区间求解对应的电压区间, 与电网安全约束电压区间求交后便得到既可行又能满足安全约束的电压区间。在此区间中找出隶属度最大的电压值, 以此电压值为已知量求解反潮流, 所得的控制变量解便为要求的最优控制变量组合。该方法与传统的智能算法比较, 结果说明该方法的确优化速度快, 适合作为省级电网的AVC系统电压优化的快速寻优方法。

关键词: Fuzzy隶属度; 区间潮流; 反潮流; 电压优化

A new approach for voltage optimization based on fuzzy membership and interval arithmetic

SU Jie-he, CHEN Xu, ZHANG Yong-jun

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Due to the complex optimization strategy and long computation of the traditional reactive power optimization, it is still difficult to apply to real-time optimization control for power grid, this paper proposes a simple and rapid idea of voltage optimization based on fuzzy membership and interval power flow algorithm. At first, it obtains the corresponding interval voltage by the interval control variable provided by the grid and intersecting with the security voltage interval to get feasible voltage range. Then it finds the voltage of maximal membership during this interval as known quantity to solve the power flow and require the optimal control variable combinations. Comparing to the traditional intelligent algorithms, the results of the algorithm is suitable for the voltage optimization in provincial power grid AVC system as a fast and efficient optimization method.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050209) and National Natural Science Foundation of China (No. 51377060).

Key words: fuzzy membership; interval power flow; inverse power flow; voltage optimization

中图分类号: TM561 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0052-07

0 引言

大电网发展的容性化、耦合化和复杂化, 使得其电压调控的难度越来越大^[1]。为缓解大电网电压调控失配问题, 各级调度部门纷纷建立和投运了自动电压控制(Automatic Voltage Control, AVC)系统, 而AVC主要基于无功优化^[2]。无功优化研究已经达到了较大的理论深度^[3], 然而纵观国内各级AVC系统, 其并没有应用到最新的研究成果。文献[4-9]都是采用智能算法或者是复杂的内点法寻求单一或者多目标优化, 使得全网的最优运行, 然而,

无功优化的理论研究过多地追求多目标及原理过于复杂(这一性质使得研究背景过于理想化), 使得其在大电网中的应用计算时间过长及与实际情况偏差较大, 难以达到实际工程应用的需求。

最新无功优化研究成果尚难以应用于实际的另外一个重要原因就是针对性不强。对于安全、经济、优质三大指标, 并不是何时何地都要求满足的, 而是有侧重点的。例如对于地区配网, 人们更关注的是降低网损, 而对于省级及以上主网, 运行人员更加关注其安全性, 在运行中为了使电压水平裕度满足需求, 往往不惜以牺牲网损为代价。因此特定条件下, 我们无需过分强调多目标, 因为这是以损害其他特性为代价。

省级及以上主网作为大电网的骨架, 其安全运

行有着深远的意义。在省级主网的日常运行控制中, 由于日负荷变化较大、峰谷差日益增大, 容易引起电压安全问题^[1], 因此需要一种能够响应负荷变化快速给出合理电压优化控制策略的方法, 并且要求这种算法原理简单, 适合实际工程应用。而面对日益庞大的电网, 传统的寻优方法对于这样的需求显得力不从心。

以此为出发点, 本文基于模糊隶属度及区间算法, 提出了一种快速电压优化方法, 其寻优原理简单, 因其算法过程简单、快速, 能够快速响应负荷变化并给出合理的电压优化控制策略方法。

1 相关数学概念

1.1 Fuzzy 隶属度

传统的普通集合所描述的是元素或子集属于或不属于(二者必居其一, 决不允许模棱两可)某特定集合的性质, 换言之, 普通集的特征函数仅取两个值, 只能表达“非此即彼”的现象, 不能表达现实中普遍存在的“亦此亦彼”的模糊现象。而模糊集则描述元素或者子集属于某个特定集合的程度, 于是可以定义^[4]为: 设在论域 X 上给定了一个映射

$$A: X \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

$$x \mapsto A(x) \quad (2)$$

则称 A 为 X 上的模糊 (Fuzzy) 集, $A(x)$ 称为隶属函数 (或称为 x 对 A 的隶属度), 其值反映了元素或子集 x 隶属于集合 A 的程度。

1.2 区间数及区间算术

在工程中, 当一个问题的原始数据不能精确地被知道, 而只知其包含在给定的界限范围内, 或者原始数据本身就是一个区间而非某个点值时, 即可利用区间数学来求解问题的未知解所在的范围或求取区间解^[10]。

区间数定义: 对于给定的数对, $\underline{x}, \bar{x} \in \mathbb{R}$, \mathbb{R} 为实数域, 若满足条件 $\underline{x} \leq \bar{x}$, 则闭有界数集合

$$X = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x \in \mathbb{R} \mid \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\} \quad (3)$$

即称为有界闭区间数。其中 \underline{x} 称为区间数 X 的下端点, \bar{x} 称为区间数 X 的上端点。若 $\underline{x} = \bar{x}$ 则定义区间数 $x = [\underline{x}, \bar{x}]$ 为点区间数。将实数域 \mathbb{R} 上所有有界闭区间数的集合记为 $I(\mathbb{R})$ 。

区间算术的具体运算规则及运算定理详见文献 [11-12]。

2 电力系统区间潮流算法

2.1 电力系统区间潮流算法

本文介绍的是基于区间概念的电压优化算法, 而潮流计算作为优化计算的基础, 因此先介绍区间

潮流计算的方法是十分必要的。目前的区间潮流算法主要考虑负荷的不确定性, 或者说负荷取值就是一个区间, 克服了传统潮流计算仅计及点负荷模型而造成的信息量少、不能全面真实地反映系统状态的缺点。将区间算法应用于电力系统潮流计算较早见于文献 [13], 该文提出了具有普适性的区间潮流求解的数学方法, 而文中也客观地指出: 所提出的数学方法适用于大部分情况下的区间潮流计算, 而对于区间变量宽度过大 (当然这种情形在电力系统中不普遍) 时会出现不收敛情况。

为克服这个缺点, 后来有不少文献针对特定的应用对象作了有益的改进。文献 [5] 针对配电系统环网结构、辐射型运行的特点, 提出了配电网潮流的前推回推三相区间算法, 具有编程简单, 求解速度快的优点。文献 [14] 利用高斯分布来描述负荷状况的不确定性, 也采用类似的技巧对辐射型配电网的区间潮流进行计算。文献 [15] 在文献 [11] 的基础上作了改进并给出了该算法的收敛判据。文献 [16] 所提出的非迭代方法实质上与前述的方法一致。文献 [17-18] 在计算配电网区间潮流时则更进一步地考虑了配电网三相不平衡的特性。针对辐射型配电网的区间潮流算法的研究得到了广泛的重视, 然而因其仅适用于具有辐射结构特性的低压配网, 因而很难广泛应用于耦合度日益加强的大电网。

文献 [19] 提出了利用牛顿-拉夫逊潮流法的修正方程来计算区间量, 这种方法简单易用, 为求解区间方程提供一种独特的思路。因此, 本文在文献 [19] 所提方法的基础上进行改进, 即考虑的不是以负荷作为区间量, 而是以变压器的调节区间, 可调节的发电机端电压的区间以及无功设备容量的区间作为区间量代入潮流方程, 接着对区间潮流方程进行求解, 其主要的思路和方法见于 2.2 节。

2.2 区间方程组的求解

本文根据无功补偿设备出力的区间, 可调节的发电机的机端电压区间以及变压器可调节的区间, 设系统有 n 个节点, 其中, 节点 1, 2, ..., m 为 PQ 节点, 节点 $(m+1)$, ..., $(n-1)$ 为 PV 节点, 节点 n 为平衡节点, 则区间潮流方程可写为

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j ([\underline{G}_{ij}, \overline{G}_{ij}] \cos \theta_{ij} + [\underline{B}_{ij}, \overline{B}_{ij}] \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, (n-1)$$

$$\Delta Q_i = [\underline{Q}_{Gi}, \overline{Q}_{Gi}] - Q_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j ([\underline{G}_{ij}, \overline{G}_{ij}] \cos \theta_{ij} + [\underline{B}_{ij}, \overline{B}_{ij}] \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

式中: P_{Gi} 和 $[\underline{Q}_{Gi}, \overline{Q}_{Gi}]$ 为节点 i 的有功和无功功率注入量 (包含了无功补偿设备区间出力); P_{Di} 和 Q_{Di} 为节点 i 的有功和无功负荷; $[\underline{G}_{ij}, \overline{G}_{ij}]$ 和 $[\underline{B}_{ij}, \overline{B}_{ij}]$ 分别是线路的电导和电纳 (计及变压器区间变比); V_i 为节点电压, θ 为节点电压相角。

由式(4)和式(5)得到的方程组为 $(n+m-1)$ 阶方程组, 为了方便表述, 将其表示为

$$h(x) = 0 \quad (6)$$

首先求 Krawczyk-Moore 算子^[12,19], 给定初始区间为

$$X = \begin{bmatrix} V \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [v_{\min}, v_{\max}] \\ [\theta_{\min}, \theta_{\max}] \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: V 为电压幅值, 为 m 维向量; θ 为电压相角, 为 $(n-1)$ 维向量; 下标 \max 、 \min 分别表示上、下限。取中点 $\text{mid}(X)$ 作为近似零点 x^* , $h(x)$ 在此点的值为 $h(x^*)$ 。

在方程组(6)中, $h(x)$ 的雅可比矩阵的具有包含单调性的区间扩展为

$$H'(X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial V_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial P_j}{\partial V_i} & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: $i=1, 2, \dots, m; j=(m+1), (m+2), \dots, (n-1)$ 。

令 $T = [m(H'(X))]^{-1}$, 这就得到 Krawczyk-Moore 算子为

$$K = x^* - Th(x^*) + [I - TH'(X)](X - x^*) \quad (9)$$

利用 K 算子进行迭代

$$X(k+1) = X^{(k)} \cap K^{(k)}, k=1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

即可得到潮流方程电压和相角的区间解。

3 电网电压优化新算法

在本节中, 主要介绍新算法的原理和计算步骤。

3.1 算法原理

以往的将区间算法应用于潮流计算的研究着眼于负荷往往并非一个确定值而是在一个确定区间中变化这一特性, 而本文将区间算法应用于电压优化则是着眼于电压 (状态变量) 的安全运行约束是一个区间 X (多维区间空间)。而电网所能提供的无功电压调控手段 V (包括变压器档位、无功补偿装置、发电机机端电压等) 也是一个区间 (多维区间空间), 由潮流计算的基础知识可知, 当潮流不病态时, 一

组控制变量组合对于一组状态变量解, 也就是说确定的区间 V 可以对应一个确定的区间 X' 。区间 V 由电网规划所决定, 由于电网规划的粗糙性, 使得区间 X 与 X' 并不完全重合, 这意味着不合理的控制变量组合会使得运行点状态变量会超出区间 X , 引起电压安全和质量问题。因此, 本文的一个重要的思想就是利用区间算术来求解出既满足电压水平约束, 又能通过电网现有调控手段可以在实际运行中达到的状态变量区间 X'' ($X'' = X \cap X'$)。

另一个重要的思想就是建立电压安全水平的 fuzzy 隶属函数。电压值超出区间时, 隶属度为 0, 电压为设定值时, 隶属度最大, 为 1。本方法的寻优思路是: 在 X'' 中筛选出各节点隶属度最大的电压值 X^* , 将此电压值代入潮流方程, 进行反潮流计算 (潮流计算是给定控制变量, 求解状态变量, 本文定义给定状态变量来求解相应的控制变量为反潮流计算), 求解出在这个最优电压水平下相对应的控制变量 V^* 。

以上便为基于模糊隶属度及区间算法的电网电压优化算法的思路。

3.2 计算步骤

步骤 1: 建立各节点电压安全水平的 fuzzy 隶属函数 $A(X)$ (如图 1)。电压值超出区间 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 时, 隶属度为 0, 电压为设定值 x_{set} 时, 隶属度最大, 为 1。

步骤 2: 求解区间 X' 。根据电网电压调控资源的实际情况确定区间 V , 以 V 为已知区间量, X' 为未知区间变量并求解以下区间潮流方程 (此时的负荷取某一运行断面下的确定值, 而不是以往文献中的区间负荷, 求解方法见 2.2 节)。

$$F(X', V) = 0 \quad (11)$$

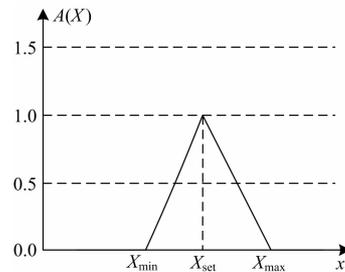


图 1 电压安全水平的模糊隶属度

Fig. 1 Fuzzy membership of voltage security level

步骤 3: 求可行区间 X'' 。 X'' 为 X 与 X' 的交集, 于是可以由式(12)方便求得。

$$X'' = X \cap X' \quad (12)$$

步骤 4: 求解隶属度最大的节点电压值 X^* 。对于区间 X , 隶属度最大的各节点电压值无疑是 X_{set} , 而当可行区间缩小为 X'' 时, 就需要一个简单的筛选过程了, 如下:

$$X^* = \{X | \max A(X), X \in X^*\} \quad (13)$$

步骤 5: 进行反潮流计算, 求解 X^* 对应的最优控制变量组合 V^* 。以 X^* 为已知量、 V^* 为自变量代入求解以下潮流方程如式(14)。此方程的求解在原理和方法上与传统最基本的潮流计算是一样的, 只是在自变量个数上有小差异, 需要进行略微的调整。

$$F(V^*, X^*)=0 \quad (14)$$

至此, 一个电压优化的过程结束。由以上步骤可以看出: 本算法的求解过程也就是在求解潮流方程, 在理论上, 其计算规模与传统潮流计算是一样的, 比以往的传统或智能优化算法都耗费更少的计算机时。

4 算例分析

在本节中, 应用本文所提新算法与基于粒子群算法的电压优化在广州鹿鸣电网 14 节点系统进行仿真比较, 如图 2, 具体数据参考文献[20]。

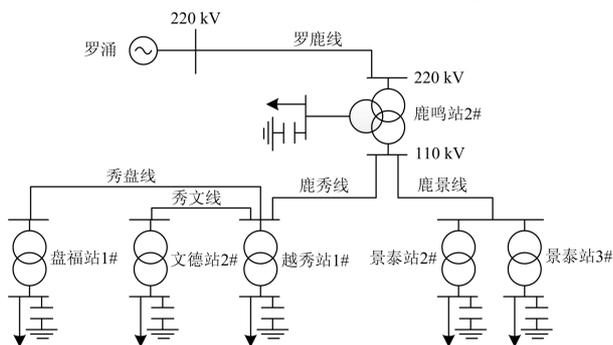


图 2 广州鹿鸣电网 14 节点系统的网路接线示意图

Fig. 2 Guangzhou Luming 14 bus power system

本文采用 Matlab 编写区间潮流程序和粒子群算法程序, 其中, 图 3 是根据电网现有的可用资源, 即给出变比区间、无功补偿设备容量的区间以及发电机端电压的可调节区间, 得到的电网电压的运行区间。本文假定电网电压额定电压的隶属度为 1, 额定电压的 $1 \pm 30\%$ 的隶属度为 0, 由此建立服从三角形的节点电压隶属函数, 得到电压的理想隶属度, 并将图 3 得到的电压区间映射到所建立的隶属函数, 得到各个站点实际电压的隶属度如图 4 所示, 其中站点的名称所对应的变化在表 1 中节点及对应的站名已标出。表 1 是本文所提算法得到的电压优化及控制变量。

由图 3 可知, 由现有电网可调控资源可得出节点电压的区间, 并与节点的安全电压求交集, 得到满足约束的安全电压区间, 然后由已建立的电压隶属函数挑选出隶属度最大的电压组合, 如表 1 中优化电压组合所示。

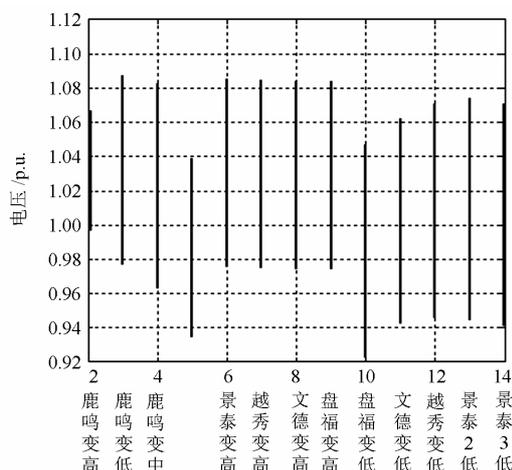


图 3 电网已有调控资源可调节的区间电压

Fig. 3 Adjustable interval voltage based on regulation resources of the grid

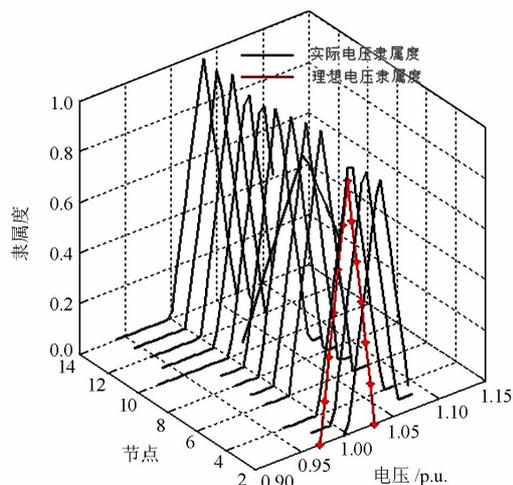


图 4 实际电压和理想电压的隶属度

Fig. 4 Fuzzy membership of actual voltage and ideal voltage

将已知的电压组合代入潮流方程, 求解出方程组中的可调节发电机机端电压、变压器变比、无功补偿容量这三组控制变量如表 1 所示。

为了验证本文所提的算法的可行性, 本文利用粒子群算法求解电网运行的最优电压以及对应的控制变量。其中, 以式(15)为目标函数, 即节点电压与理想电压的差值之和最小化。式(16)为等式约束, 即潮流方程等式约束, 式(17)为不等式约束, 即电网可调控的控制变量约束 (包括变压器变比, 无功补偿设备出力, 可调节发电机机端电压)。

$$F = \min \sum_{i=1}^n (V_i - V_{iopt})^2 \quad (15)$$

表 1 本文所提算法的控制方案

Table 1 Control scheme of the algorithm proposed by this paper

节点号/站名	优化电压	变比	补偿容量	发电机端电压
1 罗涌				1.074
2 鹿鸣变高	1.017	鹿明站	鹿鸣变低	
3 鹿鸣变低	1.015	0.912 175	0.107 495	
4 鹿鸣变中	1.016	盘福站	盘福变低	
5 鹿鸣中性点	1.002	0.981 507	0.030 756	
6 景泰变高	1.001 8	文德站	文德变低	
7 越秀变高	1.023	0.991 291	0.024 96	
8 文德变高	1.018	越秀站	越秀变低	
9 盘福变高	1.015	0.965 58	0.022 45	
10 盘福变低	1.012	景泰站 2#	景泰 2#低	
11 文德变低	1.016	0.976 95	0.054 45	
12 越秀变低	1.015 5	景泰站 3#	景泰 3#低	
13 景泰 2#低	1.019	0.964 276	0.053 898	
14 景泰 3#低	1.014			

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (16)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (17)$$

$$\begin{cases} k_{i \min} \leq k_i \leq k_{i \max} \\ Q_{ci \min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci \max} \\ V_{Gi \min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi \max} \end{cases}$$

式中： V_i 为节点电压； V_{iopt} 为图 2 所求得最大隶属度所对应的最优电压值； P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别为节点 i 的区间有功和无功功率注入量； P_{Di} 和 Q_{Di} 分别为节点 i 的区间有功和无功负荷； G_{ij} 和 B_{ij} 分别是线路的电导和电纳； θ 为节点电压相角； k_i 、 $k_{i \min}$ 和 $k_{i \max}$ 分别为第 i 个变压器的变比以及变比的上下限； Q_{ci} 、 $Q_{c \min}$ 和 $Q_{c \max}$ 分别为补偿设备补偿容量以及补偿容量的上下限。 V_{Gi} 、 $V_{Gi \min}$ 、 $V_{Gi \max}$ 分别为第 i 台机端电压可调节发电机的电压值及其上下限。

根据上述所建立的目标函数及约束条件，采用粒子群算法进行求解，得到粒子群在寻优过程的迭代曲线如图 5 所示，以及求解的控制变量如表 2 所示。

由图 5 可知，基于粒子群的电压优化算法迭代曲线趋近于 0，也即基于粒子群算法优化的电压值逼近于本文所提算法得到的优化电压。

由表 1 和表 2 可知，两种算法优化之后得到的

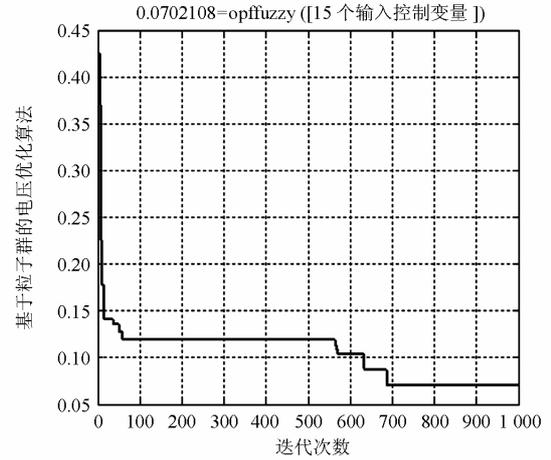


图 5 基于粒子群算法的电压优化迭代曲线

Fig. 5 Voltage optimization iteration curve based on PSO

表 2 基于粒子群算法的电压优化控制方式

Table 2 Voltage optimization control scheme based on PSO

节点号/站名	优化电压	变比	补偿容量	发电机端电压
1 罗涌				1.082 6
2 鹿鸣变高	1.049 8	鹿明站	鹿鸣变低	
3 鹿鸣变低	1.016 8	0.91	0.080 16	
4 鹿鸣变中	1.007 9	盘福站	盘福变低	
5 鹿鸣中性点	1.005 7	0.985	0.033	
6 景泰变高	1.001 5	文德站	文德变低	
7 越秀变高	1.014 9	0.985	0.020 16	
8 文德变高	1.014 4	越秀站	越秀变低	
9 盘福变高	1.014 1	0.97	0	
10 盘福变低	1.015 3	景泰站 2#	景泰 2#低	
11 文德变低	1.016 0	0.97	0.03	
12 越秀变低	1.015 1	景泰站 3#	景泰 3#低	
13 景泰 2#低	1.017 6	0.97	0.03	
14 景泰 3#低	1.014 8			

控制变量的值基本相同，但由于本文所提的算法涉及的控制变量是连续的，而基于粒子群算法优化方法在处理变压器变比是离散的，这也是粒子群算法在搜索过程中不能使得目标函数值为 0 的原因，但这也正是验证了本文所提算法的正确性。

5 结语

通过仿真计算，可以得到以下结论：(1) 通过区间潮流可得到电网现有调控资源所对应的电压区间；(2) 对可调节的电压区间与节点的安全电压区间求交集，并根据已建立的电压隶属函数，可以筛

选出隶属度最大的电压组合; (3) 提出了反潮流这个新概念, 将所得到的电压组合代入潮流方程, 通过反求潮流方程得到控制变量组合; (4) 利用粒子算法求解得到的优化电压所对应的控制变量与本文所提的方法结果基本一致, 而本文所提算法的求解只是反解潮流方程, 并不像智能算法需要较长的搜索时间, 因此, 该方法能够快速响应负荷变化并给出合理电压优化控制策略的方法, 并且该算法原理简单, 适合实际工程应用。

参考文献

- [1] 杨银国, 李扬絮, 李立, 等. 广东电网春节期间无功电压调控存在的问题与对策[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 135-138.
YANG Yin-guo, LI Yang-xu, LI Li, et al. Analysis and countermeasures for Volt/Var control in Guangdong Power Grid during the period of Spring Festival[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 135-138.
- [2] 丁晓群, 周玲, 陈光宇. 电网自动电压控制(AVC)技术及案例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
DING Xiao-qun, ZHOU Ling, CHEN Guang-yu. Grid automatic voltage control (AVC) technology and cases[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [3] 张勇军, 任震, 李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 50-56.
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, LI Bang-feng. Survey on optimal reactive power dispatch of power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 50-56.
- [4] 董岳昕, 杨洪耕. 一种适应于地区电网无功电压优化控制的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 49-54.
DONG Yue-xin, YANG Hong-geng. A new approach for reactive power/voltage optimization control of regional grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 49-54.
- [5] 汝锐锐, 周步祥, 林楠, 等. 基于 NCP 理论的光滑牛顿法在无功优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 99-104.
RU Rui-rui, ZHOU Bu-xiang, LIN Nan, et al. Application of NCP based smoothing Newton method in reactive power optimization[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 99-104.
- [6] 李娟, 杨琳, 刘金龙, 等. 基于自适应混沌粒子群优化算法的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 26-31.
LI Juan, YANG Lin, LIU Jin-long, et al. Multi-objective reactive power optimization based on adaptive chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 26-31.
- [7] 程军照, 李澍森, 程强. 一种无功优化预测校正内点算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 152-157.
CHENG Jun-zhao, LI Shu-sen, CHENG Qiang. A predictor-corrector interior point method for optimal reactive power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 152-157.
- [8] 李智欢, 李银红, 段献忠. 无功优化多目标模型转换方法的等值线分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 153-160.
LI Zhi-huan, LI Yin-hong, DUAN Xian-zhong. Analysis of objective-converting methods in multi-objective reactive power optimization using contour lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 153-160.
- [9] 李鑫滨, 朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 137-143.
LI Xin-bin, ZHU Qing-jun. Application of improved particle swarm optimization algorithm to multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 137-143.
- [10] 王成山, 王守相. 基于区间算法的配电网三相潮流计算及算例分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 58-62.
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Distribution three-phase power flow based on interval algorithm and test results[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 58-62.
- [11] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
YANG Lun-biao, GAO Ying-yi. Principle and application of fuzzy mathematics[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006.
- [12] 王德人, 张连生, 邓乃扬. 非线性方程的区间算法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
WANG De-ren, ZHAN Lian-sheng, DENG Nai-yang. Interval algorithm for nonlinear equations[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1986.
- [13] WANG Zi-an, ALVARADO F L. Interval arithmetic in

- power flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 1341-1349.
- [14] CHATURVEDI A, PRASAD K, RANJAN R. Use of interval arithmetic to incorporate the uncertainty of load demand for radial distribution system analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 1019-1021.
- [15] 刘秋野, 张化光, 刘兆冰. 配电网模糊潮流计算方法及其收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 46-50.
LIU Qiu-ye, ZHANG Hua-guang, LIU Zhao-bing. Fuzzy flow calculation in power distribution system and its convergence[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 46-50.
- [16] DAS D. A non-iterative load flow algorithm for radial distribution networks using fuzzy set approach and interval arithmetic[J]. Electric Power Components and Systems, 2005, 33(1): 59-72.
- [17] DAS B. Consideration of input parameter uncertainties in load flow solution of three-phase unbalanced radial distribution system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1088-1095.
- [18] 王守相, 王成山. 基于区间算法的配电网三相潮流计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 52-58.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan. Distribution three-phase power flow models based on interval algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 52-58.
- [19] 裴爱华, 刘明波, 张弛. 考虑负荷不确定性的区间潮流计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(6): 24-28.
PEI Ai-hua, LIU Ming-bo, ZHANG Chi. Interval algorithm for power flow calculation with uncertain load[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(6): 24-28.
- [20] 刘明波, 谢敏, 赵维新. 大电网最优潮流计算[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
LIU Ming-bo, XIE Min, ZHAO Wei-xin. OPF of large grid[M]. Beijing: Science Press, 2010.

收稿日期: 2013-12-17; 修回日期: 2014-04-01

作者简介:

苏杰和(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统无功优化与无功电压控制研究; E-mail: 574033244@qq.com

陈旭(1975-), 男, 博士研究生, 高工, 主要从事电网规划研究;

张勇军(1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统无功优化和电压稳定、电力系统可靠性与规划等研究。