

基于两阶段优化算法的配电网状态估计

状态估计是当前配电网中的研究重点，为了获得更加理想的配电网状态估计结果，提出一种基于两阶段优化算法的配电网状态估计方法。首先建立配电网状态估计目标优化函数，并采用遗传算法对其求解，得到配电网状态初始估计结果；然后采用粒子群算法对配电网状态初始估计结果进行优化；最后采用配电网状态估计仿真实验测试其有效性和优越性。结果表明，该算法加快了配电网状态估计的求解速度，获得了较高的配电网状态估计准确度，且配电网状态估计性能要优于其他配电网状态估计方法。

朱毅勇 郭建钊/国网泉州供电公司



朱毅勇/高级工程师

随着经济的迅速发展，人民生活水平越来越高，人们对配电网的稳定性和可靠性要求也日益提高^[1]。要保证配电网的安全性，首先要对配电网的状态进行准确估计，根据估计结果进行科学决策，因此配电网状态估计已经成为电力系统研究中的重大课题^[2]。

针对配电网状态估计问题，大量的学者和研究人员投入了很多心血并展开了广泛的研究，取得了丰富的研究结果，同时提出许多行之有效的配电网状态估计方法^[3]。当前配电网状态估计方法主要分为两类：传统方法和现代方法^[4]。传统最具代表性的为加权最小二乘法（Weight Least Square, WLS），它将配电网状态估计看作是一种目标函数优化问题，通过对目标函数的求解，得到最优配电网的状态^[5]，但是其假设配电网状态是一种线性、固定的变化规律，然而实际配电网受到天气、经济和市场等因素的综合影响，具有强烈的时变性和非平稳性，这样WLS算法得到的配电网状态估计结果误差大，实际应用

价值低^[6]。为了解决WLS算法存在的不足，有学者提出改进的加权最小二乘法，在一定程度上提高了配电网状态估计的准确度^[7]。现代配电网状态估计方法是一类基于非线性理论的电网估计算法，如基于神经网络的配电网状态估计，其通过神经网络的自适应非线性学习性能对配电网状态进行估计，获得了比较理想的配电网估计结果，然而神经网络需要的样本多，这样导致配电网估计的成本过高，实际应用比较困难。近几年，随着人工智能技术研究的不断深入，一些学者将粒子群算法、遗传算法等引入到配电网状态估计中，通过模拟生物行为找到目标函数的最优解，但是面对复杂多变的配电网状态估计问题，单一的群智能算法存在搜索效率低的不足，因此难以找到配电网优化的最优解^[14]。

遗传算法和粒子群算法均属于群智能算法，它们存在不足，但是也有各自的优点，为了提高配电网状态估计准确度，利用遗传算法和粒子群算法的优点，提出一种两阶段优化算法的配电网状态估计的方法。结果表明，本文算法加快了配电网状态估计的求解速度，获得了较高的配电网状态估计准确度，且配电网状态估计性能要优于其他配电网状态估计方法。

配电网状态估计问题描述

与传统输电电网系统不同，配电网系统更加复杂，存在许多不同的分支，这样就能采用传统输电电网系统的状态估计对配电网状态进行估计，寻求适合配电网

关键词/Keywords

配电网状态估计·
遗传算法·
粒子群算法·
仿真测试·

网状态变化特点的估计方法。对于配电网系统，其各个部件的功率是固定不变的，发端电压和功率因子已知，这样可以通过量测数据对配电网状态进行估计，具体如图1所示。

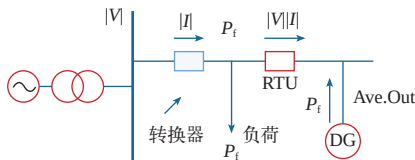


图1 量测数据配置

图中， $|V|$ 为电压； $|I|$ 为电流； P_i 为功率；Ave.Out为平均输出。设配电网系统的有功输出为 x ，即也是电网状态变量； z_i 为量测量 i 的测量值，那么在配电网状态估计过程中采用式（1）作为其目标函数，即

$$\begin{aligned} \min J(x) &= \sum_{i=1}^m w_i [z_i - h_i(x)]^2 \\ \text{s. t.} \\ x_{j\min} &\leq x_j \leq x_{j\max} \end{aligned} \quad (1)$$

式中， w_i 为权重因子； h_i 为量测量函数； $x_{j\min}$ 和 $x_{j\max}$ 分别为第 j 个变量的下界和上界。

配电网状态估计主要是使量测值和估计值之间的误差尽可能小，因此式（1）是一种典型的非线性、带约束的目标优化问题，采用传统穷举法或者单一的群智能算法难以正确求解，为此本文联合遗传算法和粒子群算法构建基于两阶段优化算法的配电网状态估计方法。

两阶段进化算法

1. 遗传算法

遗传算法是一种起源于生物界的达尔文进化理论的群智能算法，具有较好的寻优能力，在许多领域得到了成功的应用。其基本工作原理为：首先随机产生包含多个个体的初始种群，每一个个体通常与待求解问题的潜在解一一对应；然后通过模拟生物的选择、交叉和变异等操作产生新的种群，并通过优胜劣汰等机制搜索问题的最优解；最后找到问题的最优解。遗传算法的工作流

程具体如图2所示。

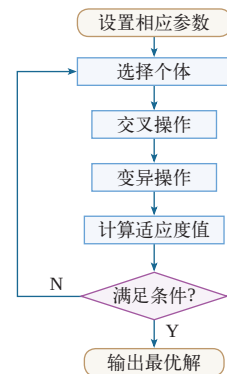


图2 遗传算法的工作流程

在标准遗传算法的工作过程中，其存在“早熟”现象，以及难以搜索到全局最优解等缺陷，为此，本文通过交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 进行相应的改进，提高种群个体的多样性，加快搜索速度，克服“早熟”现象，改进策略具体如下

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f' \geq f_{\max} \\ k_2 & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f' \geq f_{\max} \\ k_4 & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $f_{\max}$ 和 f_{avg} 分别为最大和平均适应度； f' 为交叉个体中较大的适应度； f 为变异个体的适应度； k_1 、 k_2 、 k_3 和 k_4 为调整参数。

2. 粒子群优化算法

设第 i 个位置和飞行速度向量分别为 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $V_i = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ ，其历史的最好位置为 $p_{\text{best}}(i) = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ ，粒子群的历史最好位置为 $g_{\text{best}}(i) = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{in})$ ，每一个粒子的速度和位置更新方式为

$$V_i = \omega V_i + c_1 r_1 [p_{\text{best}}(i) - X_i] + c_2 r_2 [g_{\text{best}} - X_i] \quad (4)$$

$$X_i = X_i + V_i \quad (5)$$

式中， ω 为惯性权重； c_1 和 c_2 为学习因子； r_1 和 r_2 为随机数。

3. 两阶段优化算法

基于组合优化理论，将遗传算法用于粒子群算法的初始种群产生。首先通过遗传算法得到问题的初始解，将初始解作为粒子群的最优位置向量，然

后通过粒子群算法进行解的进一步优化，从而形成两阶段的优化算法。其工作流程如图3所示。

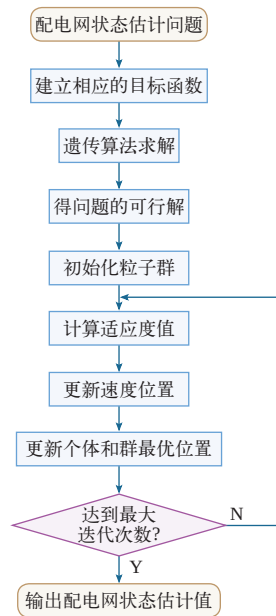


图3 两阶段优化法的工作流程

两阶段优化算法求解配电网状态估计问题

- 1) 首先对优化配电网系统进行分析，测试其输出值和负荷值的变化关系，并将其作为配电网状态的初始变量。
- 2) 对遗传算法的种群个数、交叉和变异概率以及最大进化代数进行设置。
- 3) 采用均匀设计方法产生初种群，计算每一个个体的适应度值，并对它们的优劣进行评估。
- 4) 根据适应度值对个体进行排序，部分优秀个体直接进入下一代种群。
- 5) 通过交叉和变异操作产生部分优秀的个体，从而得到新的种群，并计算每一个个体的适应度值。
- 6) 如果进化代数达到最大进化代数，终止问题的求解，并输出配电网状态估计值，进入第二阶段优化；否则返回步骤4) 继续进行。

仿真实验

1. 实验平台

为了测试两阶段优化算法的性能，在Matlab 2012平台进行仿真测试，选择单一粒子群算法和

遗传算法进行对比实验，配电网模型如图4所示。从电压估计值、电流估计值和工作效率几个方面对其性能好坏进行分析。

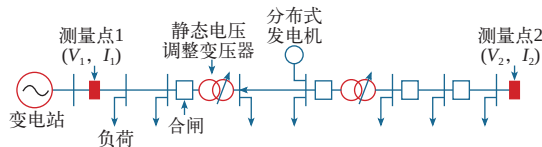
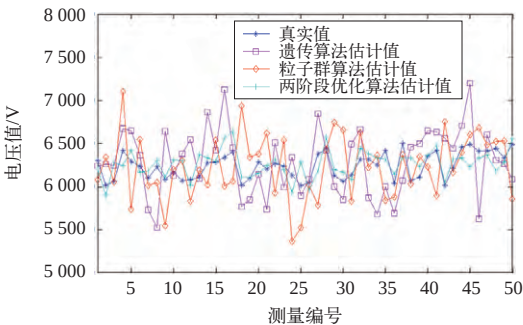


图4 配电网模型

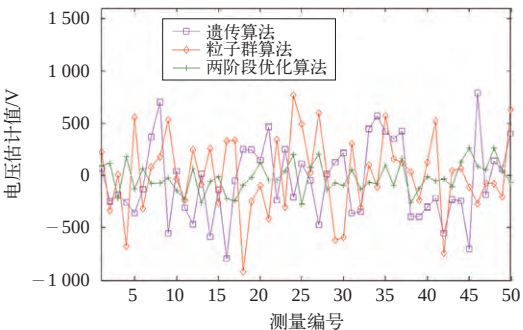
2. 结果与分析

(1) 电压的量测值估计性能对比

首先进行50次采样，得到50个电压的量测值；然后采用粒子群算法、遗传算法和两阶段优化算法对电压量测值进行估计，实验结果如图5所示。从图5可知，相对于对比算法，两阶段优化算法的电压估计值与实际测量的真实电压值几乎重合，两者之间没有区别，偏差可以忽略不计。实验结果表明，两阶段优化算法集成了粒子群算法和遗传算法的优点，解决了它们各自存在的难题，获得了更优的配电网状态估计结果。



(a) 电压估计值与真实值比较



(b) 电压估计偏差比较

图5 不同算法的电压估计结果对比

(2) 电流的量测值估计性能对比

同时进行50次采样，得到50个电流的量测

值,所有算法的电流估计结果如图6所示。从图6可知,两阶段优化算法的电压估计结果明显优于粒子群算法和遗传算法,可以更好地描述配电网状态的变化。

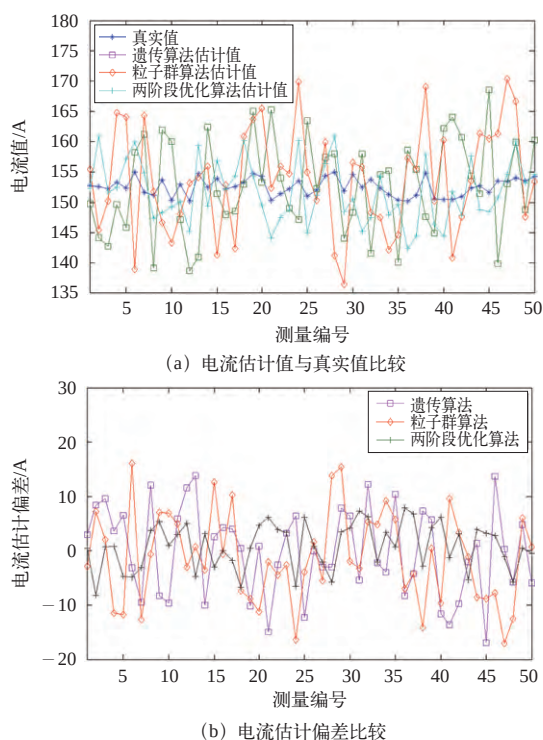


图6 不同算法的电流估计结果对比

(3) 工作效率对比

对于大型配电网系统,配电网状态估计速度十分关键,直接影响配电网工作效率的高低,为此每一种算法均进行五次实验,采用最优配电网状态估计的求解时间来衡量算法的工作效率,所有算法的仿真结果如图7所示。从图7可知,相对对比算法,两阶段优化算法的最优配电网估计的求解时间最少,求解速度最快,从而有效提高了配电网系统的工作效率,同时提高了实际应用价

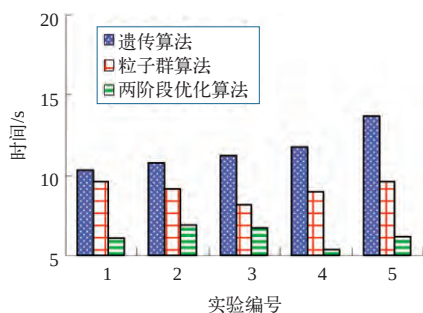


图7 不同算法的工作效率对比

值,可以大幅度节约成本。

结束语

配电网状态估计是当前电力系统研究中的一个热点,由于受到许多作用的影响,具有复杂、多变的特点,针对单一智能算法难以获得较高准确度的配电网估计结果,本文提出一种两阶段优化算法的配电网状态估计方法。首先采用遗传算法对其求解,得到配电网状态初始解,然后采用粒子群算法对配电网状态初始估计结果进行优化,配电网状态估计仿真实验测试结果表明,两阶段优化算法不仅解决了当前配电网状态估计方法存在的不足,而且提高了配电网状态的估计准确度,是一种有效、性能优异的配电网状态估计方法。

参考文献

- [1] 刘健,毕鹏翔,董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] Atish K G, David L Lubkern, et al. Distribution circuit state estimation using a probabilistic approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12 (2) : 45-51.
- [3] 刘健,程红丽,毕鹏翔. 配电网的简化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (12) : 77-82.
- [4] 卫志农,顾桦,鞠平,等. 三相辐射配网状态估计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (3) : 84-87.
- [5] Shig E, Nor I N, Takamug, et al. A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (1) : 60-68.
- [6] Li K. State estimation for power distribution system and measurement impacts [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11 (2) : 911-916.
- [7] Baran M E, Kelley A W. State estimation for real-time monitoring of distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9 (3) : 1601-1609.

(收稿日期:2015-04-22) EA