

基于改进差分进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，提出一种基于改进差分进化算法的配电网状态估计方法。首先在标准差分进化算法中引入混沌变异策略，保持种群个体的多样性，增强全局搜索能力，然后建立配电网状态估计目标优化函数，并采用改进差分进化算法对其求解，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，改进差分进化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，配电网状态估计性能要优于其他配电网状态估计方法。

何卫华^{1,2}/1. 四川大学计算机学院 2. 四川机电职业技术学院信息工程系



何卫华/讲师

随着人民生活水平的提高以及低碳经济时代的到来，电力作为主要的能源消费形式，成为低炭经济改革的先锋，基于风能、太阳能的可再生能源发电技术引起了人们的广泛关注，其并入电网，导致配电网规模越来越大，结构复杂，再加可再生能源有季节性与难以估计性，为配电网的稳定性和安全性带来挑战。配电网状态估计作为一种电网系统监控手段，显得越来越重要，成为电网领域中的研究重点^[1]。

配电状态估计实质是根据配用电网的量测信息，对配电系统状态进行高准确度的估计，管理者根据估计结果对配电网进行优化^[2]。自从20世纪60年代开始，针对配电网状态估计问题，国内许多研究机构和科研院所进行了广泛、深入的研究，涌现出许多配电网状态的估计方法。当前经典的配电网状态估计方法为加权最小二乘法（Weight Least Square, WLS），其认为配电网状态与目标函数是一种线性的变化关系，而配电网系统受到多种因素的综合作用，是

一种复杂的非线性系统，WLS采用线性方式进行建模，估计结果的偏差比较大^[3]。文献[4]提出一种基于增量WLS的配电网状态估计策略，通过迭代WLS拟合配电网系统的非线性变化规律，提高了配电网状态估计准确度。文献[5]提出了基于牛顿法的配电网状态估计算法，采用Jacobi矩阵进行迭代，取得了不错的估计结果。近年来，随着遗传算法等随机优化算法的不断成熟，一些学者将其引入到配电网状态估计的研究中^[6-7]，但是这些随机优化算法均存在各自的不足，如遗传算法的遗传算子设置比较复杂、粒子群优化算法后期寻优的能力差，因此设计新的随机优化算法以提高配电网状态估计准确度，仍然是一个有待解决的难题^[8]。

差分进化（Differential Evolution, DE）算法是一种为求解切比雪夫多项式而提出来的随机搜索优化算法，具有原理简单、受控参数少及全局搜索能力强等优点。为了获得理想的配电网状态估计准确度，提出一种改进差分进化（Improved Differential Evolution, IDE）算法的配电网状态估计方法，实验结果表明，相对于其他配电网状态估计方法，IDE算法的优势比较明显，为解决配电网状态估计问题提供了一种新的工具。

配电网状态估计的目标函数设计

1. 配电网系统的量测数据

相对于输电网系统，配电网系统的分支更多，线路更加复杂，因此传统输电网系统的状态估计方法不适合应用于

关键词/Keywords

状态估计 ·
DE算法 ·
混沌变异策略 ·
配电系统 ·

配电网系统。

(1) 实时量测

实时量测是指采用监控系统对配电网系统的状态进行实时控制，并采用数据采集设置对配电网系统上的相关实时数据进行采集，相关实时数据主要包括：根节点注入功率、支路功率等。为了方便说明问题，做如下假设：①所有子变电站的发端、断面的发电功率因数已知，而且每一个断面的约束值也已知；②可以根据分布式发电机输出状态，得到其相应的输出和功率因数^[9]。

基于以上假设，可以采用如图1所示的量测数据估计配电网状态。

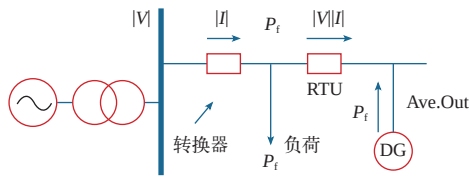


图1 量测数据配置

图1中， $|V|$ 为电压的大小； $|I|$ 为电流的大小； P_i 为电流的大小；Ave.Out为平均输出。

(2) 伪量测

在整个配电网系统中，伪量测数据对没有办法测量的实时量测点状态估计具有重要的作用，主要是因为实时量测冗余度十分小，伪量测主要通过用户负荷的历史数据得到。

2. 配电网状态估计的目标函数设计

设配电网状态系统的有功输出为 x ，即电网状态变量； z_i 为量测量 i 的测量值。那么在配电网状态估计过程，采用式(1)作为其目标函数，即

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m w_i [z_i - h_i(x)]^2 \quad (1)$$

s. t.

$$x_{j\min} \leq x_j \leq x_{j\max}$$

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。

配电网状态估计目标：尽可能降低量值和计算值间的偏差。因此式(1)可以看作一个非线性目标函数的优化过程，本文采用进化差分算法用于非线性目标函数求解。

IDE算法

1. 基本DE算法

DE算法的基本思想：首先随机初始化种群，通过种群中个体差异产生变异个体，然后与其他个体相量进行加权求和，根据杂交概率产生试验矢量，如果试验矢量优于目标矢量，那么将较优个体矢量保持到下一代，最后不断迭代找到问题的最优解。对于具有D维数的优化问题，DE算法的工作过程主要包括如下几个步骤。

1) 初始化种群。利用随机方式产生DE算法的包括 n 个个体的初始种群为

$$x_{ij,1} = x_{j\min} + \text{rand}(x_{j\max} - x_{j\min}) \quad i=1,2,\dots,n \quad j=1,2,\dots,D \quad (2)$$

式中，rand为随机数； $x_{j\min}$ 和 $x_{j\max}$ 分别为第 j 个变量的下界和上界。

2) 变异操作。设 G 为进化代数，变异矢量定义如下

$$D_G = x_{r1,G} - x_{r2,G} \quad (3)$$

式中， r_1 、 r_2 分别为不同的个体。

通过将差分矢量与其他个体矢量(r_3)进行叠加，实现变异操作，具体如下

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (4)$$

式中， F 为变异因子。

3) 交叉操作。将群体中的目标矢量个体 $x_{i,G}$ 与变异矢量 $v_{i,G+1}$ 进行交叉操作，产生试验矢量个体 $u_{i,G+1}$ ，如下

$$u_{ij,G+1} = \begin{cases} v_{ij,G+1} & \text{rand}(j) \leq CR \text{ or } j = \text{randn}(i) \\ x_{ij,G} & \text{rand}(j) > CR \text{ and } j \neq \text{randn}(i) \end{cases} \quad (5)$$

式中， CR 为交叉概率因子。

4) 选择操作。根据目标函数选择试验矢量 $u_{i,G+1}$ 和目标矢量 $x_{i,G}$ ，具体如下

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1} & f(u_{i,G+1}) < f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & f(u_{i,G+1}) \geq f(x_{i,G}) \end{cases} \quad (6)$$

式中， f 为目标函数。

如果 $f(u_{i,G+1})$ 优于 $f(x_{i,G})$ ，则 $x_{i,G} = u_{i,G+1}$ ，否则保留 $x_{i,G}$ 生成新矢量。

2. DE算法的改进

基本DE算法与其他随机优化一样,存在一些不足,为了提高DE算法的寻优性能,本文对DE算法进行改进,充分利用混沌映射的遍历性,提高群体个体的多样性,采用Chebyshev混沌映射,其迭代方程为

$$x_{n+1} = \cos[\mu a \cos(x_n)] \quad x_n \in [-1, 1] \quad (7)$$

采用目标函数变化阈值分析,获得子代重构的判定标准,具体如下式所示

$$f(x_n) - f(x_{n+1}) \leq \varepsilon \quad (8)$$

如果目标函数变化小于 ε 时,采用混沌重构模式,对矢量中的每一维数据加入混沌变异量,具体如下式所示

$$x_{ij}^{\text{cm}} = x_{j\min} + x_{i,j}(x_{j\max} - x_{j\min}) \quad (9)$$

加入到原始矢量中,得到新的种群,具体如下式所示

$$x_{ij}^{\text{new}} = x_{ij} + \lambda x_{ij}^{\text{cm}} \quad (10)$$

式中, λ 为混沌映射编译比例系数。

3. DE算法改进的有效性测试

采用两个标准函数3.3DE算法改进的有效性测试,两个标准函数具体定义如下。

1) 标准测试函数1为

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 100 \cos(2\pi x_i) + 10] \frac{1}{4000} \quad (11)$$

$$x_i \in [-5.12, 5.12] \quad i=1, 2, \dots, n$$

2) 标准测试函数2为

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2] \quad (12)$$

$$x_i \in [-2.048, 2.048] \quad i=1, 2, \dots, n$$

DE算法和IDE算法的综合性能对比结果如表1所示。从表1可知,IDE算法的各项指标均要优于DE算法,对比结果表明,本文对标准DE算法进行改进是有效的,可以提高算法的寻优准确度和

表1 DE算法和IDE算法的性能对比

函数	算法	最优值	优化均值	最差值	标准方差
f_1	DE算法	17.665	21.826	35.285	9.114
	IDE算法	9.510	13.860	17.502	4.407
f_2	DE算法	35.852	43.303	70.937	21.637
	IDE算法	16.674	32.403	40.664	11.695

效率。

IDE算法估计配电网状态的步骤

1) 读取配电网的输出值和负荷值,并将其作为状态变量。

2) 初始化DE算法参数,并产生初始种群,并对初始种群个体进行评价。

3) 判断是否达到最大进化代数,如果是则终止进化,输出最优配电网状态估计值,否则继续。

4) 通过变异操作、交叉操作产生新的个体,并加入到种群中。

5) 进行选择操作,产生新的种群。

6) 个体优劣采用配电网估计结果偏差进行衡量。

7) 进化代数增加,并返回步骤3)。

仿真实验

1. 实验平台

为了测试IDE算法配电网估计的准确性,在Intel 4核 2.8 GHz CPU, 8 GB内存, Windows 7操作系统的计算机上,采用Matlab 2014进行仿真实验,选择粒子群优化算法、标准DE算法和遗传算法进行对照实验,采用配电网估计结果的相对误差作为评价标准,其定义如下

$$\text{error} = \frac{x_{\text{pred}} - x_{\text{true}}}{x_{\text{true}}} \times 100\% \quad (13)$$

式中, x_{pred} 为估计值; x_{true} 为实际值。

2. 结果与分析

(1) 电压和电流的量测值估计性能对比

图2和图3为粒子群优化算法、标准DE算法、遗传算法及IDE算法的电压量测值和电流量测值的估计值与实际值的相对偏差。从图2可以看出,IDE算法电压量测值的估计相对偏差在0.1%以内,远远小于粒子群优化算法、标准DE算法及遗传算法的估计相对偏差;从图3可以看出,IDE算法电流量测值的估计相对偏差在2%以内,也小于对比算法的估计相对偏差,这主要是由于IDE算法可以得到更优的配电网状态估计结果,对比结果证明了IDE算法的有效性和优越性。

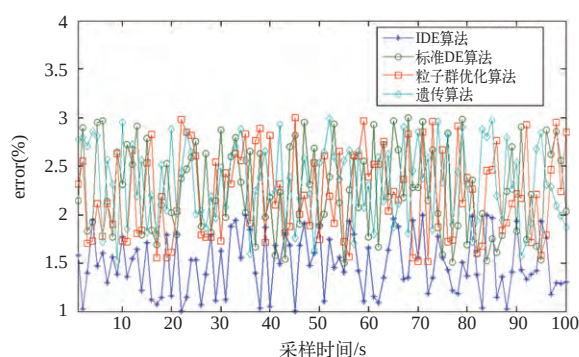


图2 不同算法的电压量测值估计偏差变化曲线

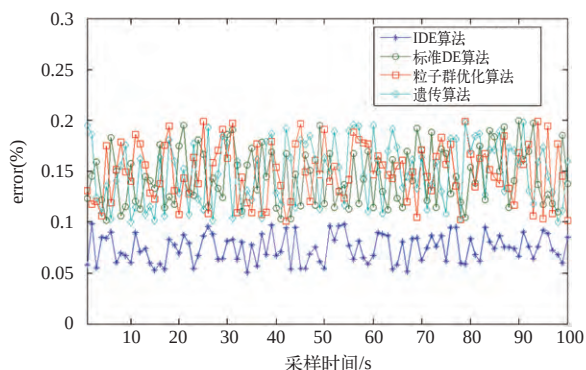


图3 不同算法的电流量测值估计偏差变化曲线

(2) 不同算法的运行速度估计

在实际应用中，配电网状态估计算法的运行速度十分重要，为此统计每一种算法的运行耗时，找到最优解的迭代次数，结果如表2所示。从表2可知，相对于粒子群优化算法、标准DE算法和遗传算法，IDE算法加快了收敛速度，提高了收敛准确度，加快了配电网状态估计问题的求解度，迭代次数越少，稳定性更好，运行效率得到了不同程度的提高，可以应用于大规模配电网的状态估计中。

表2 不同配电网估计算法的运行速度对比

算法	运行时间/s	迭代次数
遗传算法	0.557	120
粒子群优化算法	0.470	100
DE算法	0.485	108
IDE算法	0.393	92

结束语

结合配电网状态估计复杂变化特点，针对DE

算法存在的不足，为了提高配电网状态估计的准确性，提出一种IDE算法的配电网状态估计方法。实验结果表明，相对于当前其他配电网状态估计方法，IDE算法获得了更高准确度的配电网状态估计的结果，为配电网状态估计问题的解决提供了一种新的工具。

参考文献

- [1] 张立梅,唐巍,赵云军,等. 分布式发电对配电网影响的综合评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (21): 132-135, 140.
- [2] Atwa Y M, Elsaadany E F. Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (4): 1815-1822.
- [3] 王韶,江卓翰,朱姜峰,等. 计及分布式电源接入的配电网状态估计 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (13): 82-87.
- [4] 许琼,王媛媛,史晓楠. 基于增量最小二乘算法的配电网状态估计 [J]. 西安科技大学学报, 2008, 28 (3): 547-550.
- [5] 卫志农,顾杵,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.
- [6] 许琼,代粉蕾. 基于改进遗传算法的配电网状态估计 [J]. 航空计算技术, 2008, 38 (3): 107-110.
- [7] 王斌,丁晓群,沈茂亚. 带变异算子的PSO算法在配电网状态估计中的应用 [J]. 江苏电机工程, 2006, 25 (4): 18-20.
- [8] 黄若霖,王宽,詹开翅. 基于自适应免疫粒子群优化算法的配电网状态估计 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (11): 54-57.
- [9] 张立梅,唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算 [J]. 电工技术学报, 2010, 12 (8): 123-130.

(收稿日期: 2015-01-02) EA