

DOI: 10.7667/PSPC151943

# 基于可信状态集合的状态估计方法在最优潮流中的应用

公茂法<sup>1</sup>, 柳岩妮<sup>1</sup>, 姜文<sup>2</sup>, 王来河<sup>1</sup>, 侯林源<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学, 山东 青岛 266590; 2. 国网山东平度市供电公司, 山东 潍坊 261000)

**摘要:** 针对电力系统状态估计的可信度问题和执行效率问题, 提出了一种状态估计新方法。在该方法中, 求取的状态估计结果不再按照设定的估计准则求得唯一“最优解”或“次优解”, 而是包含若干个可行解(即电力系统状态)的解集。根据可信度已知的求解约束条件求取可信状态集合, 解决了电力系统状态估计可信度的问题。将该算法应用在最优潮流模型中, IEEE-118 节点测试系统算例表明, 该算法能够确保节点电压安全, 计算效率较高, 且具有较好的经济性。

**关键词:** 电力系统; 可信状态集合; 状态估计; 最优潮流; 煤耗最低

## State estimation method based on trusted state set in the application of the optimal power flow

GONG Maofa<sup>1</sup>, LIU Yanni<sup>1</sup>, JIANG Wen<sup>2</sup>, WANG Laihe<sup>1</sup>, HOU Linyuan<sup>1</sup>

(1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. State Grid Shandong Weifang Electric Power Company, Weifang 261000, China)

**Abstract:** A new method is proposed to solve the reliability of power system state estimation problem and the execution efficiency problem. In this method, the state estimation result is no longer computed by estimation criterion to obtain the only "optimal" or "suboptimal solution", but contains a result set of several feasible solutions (that is, the power system state). According to the known reliability of the solution, the trusted state set is obtained, and the reliability of power system state estimation is solved. As a result, the computational efficiency is improved and the time of state estimation is reduced effectively. Applying the algorithm to optimal power flow model, the IEEE-118 node test system example shows that the algorithm can ensure the security of the node voltage, has high computational efficiency, moreover, it is cost-efficient.

**Key words:** power system; trusted state set; state estimation; optimal power flow; minimum coal consumption

## 0 引言

最优潮流(Optimal Power Flow, OPF)主要思想是指当系统的结构参数和负荷情况都已经给定时, 通过添加控制策略使系统的潮流分布符合安全约束条件, 同时实现经济性最优。求解最优潮流, 需要运用系统的拓扑结构、网络参数和节点负荷等信息, 只有确保这些信息完备、准确, 才能使约束条件成立, 进而确保求得准确最优解。而调度控制中心收集到信息可靠性不足, 采用此类生数据求得的控制策略不能保证潮流最优。

传统状态估计方法, 如牛顿法、线性规划法、内点法<sup>[1]</sup>等, 以及现在常用的加权最小二乘法方法<sup>[2]</sup>

和人工智能算法<sup>[3-4]</sup>, 都是将状态估计看作是优化问题: 假定量测误差或量测数据服从某一特定的分布准则, 求取与其分布准则拟合最好的状态变量。由大多数定理可知, 确保此类状态估计方法可行的前提是量测误差或数据数目要足够多。然而实际中, 往往样本数量有限, 估计存在一致性问题。此外, 电力系统规模庞大, 运行方式多样, 求取的状态估计结果不一定是全局最优解。考虑到上述问题, 很难将一般性状态估计方法运用到 AGC、AVC 等闭环控制系统中。

在本文中提出了基于可信状态集合<sup>[5-6]</sup>的状态估计方法, 抛弃了对估计准则的假定, 避开了求解单一最优值, 而是根据可信度已知的求解约束条件求取可信状态集合。可信状态集合状态估计方法不存在假定估计准则带来的风险, 满足了闭环控制系

统对状态估计可信度的要求。并将该方法运用在最优潮流的求解中, 实例证明具有一定的参考价值。

## 1 最优潮流模型建立

### 1.1 最优潮流模型

最优潮流<sup>[7]</sup>通过引入控制变量, 实现目标最优。通常最优潮流可以表示为式(1)所示的形式。

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g(x, u) = 0 \\ h(x, u) \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f(x)$ 表示最优潮流的目标函数, 文中主要指的是发电机组的用煤损耗(简称煤耗);  $u$ 为控制变量;  $g(x, u)$ 表示潮流等式约束;  $h(x, u)$ 表示系统运行限值约束。

将系统的可信状态集合定义为  $X$ , 进行最优潮流控制前系统的初始状态为  $x_0^\zeta$ , 最优潮流控制后系统的状态为  $x^\zeta$ 。与之类似, 将控制变量的初始状态定义为  $u_0^\zeta$ , 控制变量当前状态定义为  $u^\zeta$ 。由于  $x_0^\zeta$  是系统的真实状态, 显然满足  $x_0^\zeta \in X$ 。利用随机规划模型<sup>[8]</sup>, 将式(1)具体化:

$$\begin{cases} \min \int_{\varphi(x_0^\zeta, u_0^\zeta, \Delta u)}^{\varphi(x_0^\zeta, u_0^\zeta, \Delta u)} f(x^\zeta) \rho(x_0^\zeta) dx \\ \text{s.t. } x^\zeta = \varphi(x_0^\zeta, u_0^\zeta, \Delta u) \\ h(x^\zeta, u_0^\zeta, \Delta u) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\rho(x)$ 是关于  $x$  的权重函数, 在随机规划模型中, 最优潮流寻求目标函数的数学期望最小, 则  $\rho(x)$  应为概率密度函数, 用来表示  $x$  的概率分布。

式(2)中目标函数为积分形式, 直接求解计算量大, 耗时长, 需对其进行转化。分层抽样法根据随机变量的概率分布, 通过随机模拟方法, 产生于随机变量概率分布相一致的样本数据, 较好地满足了要求。经过分层抽样, 最优潮流模型变为

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N p(x_0^i) \cdot f(x_i) \\ \text{s.t. } x_i = \varphi(x_0^i, u_0^i, \Delta u) \\ h(x_i, u_0^i, \Delta u) \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $N$ 表示抽取样本的个数;  $p(x_0^i)$ 表示  $x_0^i$  对应的概率分布权重, 其求解公式为式(4)。

为保证样本的真实代表性, 抽取样本的数量往往比较大。此时, 若直接采用式(3)求解, 计算量仍然很大, 需要对样本进行消减。将样本集中类似的样本进行合并, 用一个有代表性的样本代替若干类似样本。

$$p(x_0^i) = \int_{x_0^i - (x_0^{\text{up}} - x_0^{\text{down}})/2N}^{x_0^i + (x_0^{\text{up}} - x_0^{\text{down}})/2N} \rho(x_0^i) dx_0^i \approx \rho(x_0^i) \cdot \frac{x_0^{\text{up}} - x_0^{\text{down}}}{N} \quad (4)$$

### 1.2 以煤耗最低为目标的最优潮流模型

假定状态量均准确无误, 则煤耗最低对应的最优潮流目标函数为

$$\bar{f}_{x_0} = \sum_{G_j \in \{G\}} K_{G_j}(p_{x_0}) = \sum_{G_i \in \{G\} \cap G_i \neq G_s} K_{G_i}(p_{x_0}) + K_{G_s}(p_{x_0}) \quad (5)$$

式中,  $\{G\}$ 表示电力系统中所有发电机的集合, 包括调频机组  $G_s$  和非调频机组  $G_i$ 。  $K_{G_s}(p)$ 表示调频机组的耗量特性函数,  $K_{G_i}$ 表示非调频机组的耗量特性函数。调频机组用于保持系统有功平衡, 其有功输出不可作为控制变量。调频机组的有功输出可表示为

$$P_{G_s} = P_s(U, \theta) + P_{L_s} \quad (6)$$

式中:  $P_s(U, \theta)$ 为发电机节点  $s$  的注入有功功率;  $P_{L_s}$ 为节点的有功负荷。

随机概率模型下, 目标函数  $f$  是关于控制变量  $u$  和状态变量  $x$  的函数, 可表示为

$$f = \sum_{i=1}^M \rho(x_i) \cdot \bar{f}(u, x_i) = \sum_{i=1}^M \rho(x_i) \cdot [ \sum_{(G_j \in G) \cap (G_j \neq G_s)} K_{G_j}(p_{G_j}) + K_{G_s}(p_s(x_i) + p_{L_s}) ] \quad (7)$$

状态转移方程为

$$\begin{cases} P_{G_i} - P_{L_i} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{G_i} - Q_{L_i} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad \forall i \in S_N \quad (8)$$

式中,  $S_N$ 表示节点集合。

最优潮流的不等式约束条件为

$$\begin{cases} P_{G_m}^{\text{low}} \leq P_{G_m} \leq P_{G_m}^{\text{up}} (m \in S_G) \\ P_{G_n}^{\text{low}} \leq P_{G_n} \leq P_{G_n}^{\text{up}} (n \in S_R) \\ V_i^{\text{low}} \leq V_i \leq V_i^{\text{up}} (i \in S_N) \\ |P_l| = |P_{ij}| = |V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij}| \leq P_l^{\text{up}} (l \in S_L) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $S_G$ 表示电力系统发电机的集合;  $S_R$ 表示电力系统无功源的集合;  $S_L$ 表示电力系统支路的集合。

发电机对应控制变量单次改变量的取值约束条件为

$$\forall i \in N_G \begin{cases} \Delta V_{G_i}^{\text{low}} \leq \Delta V_{G_i} \leq \Delta V_{G_i}^{\text{up}} \\ \Delta P_{G_i}^{\text{low}} \leq \Delta P_{G_i} \leq \Delta P_{G_i}^{\text{up}} \end{cases} \quad (10)$$

式(7)~式(10)共同组成了以煤耗最低为目标的最优潮流模型。其中,式(7)为目标函数,其余公式为约束求解条件。

## 2 模型求解

本文中采用分布式最优潮流求解,主要是基于分布式状态估计。主要思路如下所述。

**Step1:** 将电网划分为若干子分区电网。划分电网一般按照电网架构,应尽量降低各子分区电网之间的耦合性;

**Step2:** 以子分区电网为单元,利用可信状态集合状态估计方法进行状态估计;

**Step3:** 各子分区电网将边界节点的可信状态集合传送至协调侧,协调侧根据约束条件,对子分区电网边界节点状态集合进行约束计算;

**Step4:** 判断边界节点的可信状态集合是否收缩。若收缩,则将收缩后的边界节点可信状态集合传送至对应子分区电网,然后跳转到 Step3,重新求取子分区电网的可信状态集合;若未收缩,则状态估计求解完成,得到可信状态集合;

**Step5:** 针对各个子分区电网,按照 1.1 节和 1.2 节中建立的模型,求取其最优潮流控制策略;

**Step6:** 各子分区电网的最优潮流控制策略组成了电网整体的最优潮流控制策略。

最优潮流求解问题是非线性优化问题,且包含非等式约束,求解较为复杂。求解此类问题通常采用现代内点算法<sup>[9]</sup>。此处为求解方便,采用基于现代内点算法的计算程序 IPOPT。

## 3 算例分析

算法测试分为两部分:算法有效性测试和计算效率测试。算法有效性测试是在系统运行状态不确定的情况下,测试算法能否提供安全、有效的最优潮流控制策略;算法计算效率测试则是测试执行时间,观察其执行效率。本文为了对比算法性能,设计了两种最优潮流求解方案:(1)采用加权最小二乘法求取状态估计<sup>[10-11]</sup>,然后基于状态估计结果求取最优潮流,称为对比方案 1;(2)直接运用未经状态估计处理的生数据求取最优潮流,称为对比方案 2。

### 3.1 构建测试系统

算例采用 IEEE-118 节点测试系统,测试系统包含 23 台火力发电机组,29 台水力发电机组以及 1 台核能发电机组。将 IEEE-118 节点测试系统划分成 3 个子分区电网,划分如图 1 所示。

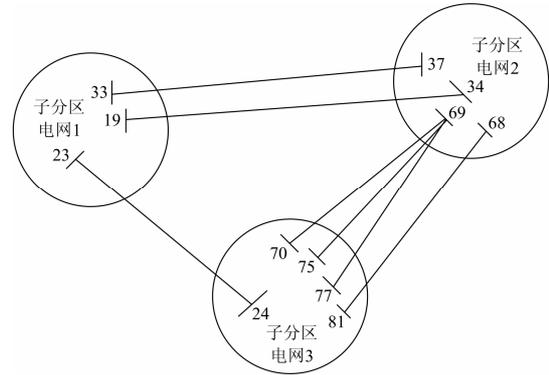


图 1 IEEE-118 节点测试系统划分示意图

Fig. 1 Partition chart of IEEE-118 test case

按照经济性原则,水力发电机组和核能发电机组作为基荷优先出力,在算例计算中假定该类机组出力恒定。火力发电机组中的高温高压机组发电效率高,算例中也假定为出力恒定。假定剩余的火力发电机组中有 8 台参与 AGC(自动发电控制),其发出有功和无功可作为控制变量。以煤耗最低为准则,算例将讨论此 8 台发电机组的出力分配方案。设定火力发电机组的煤耗特性曲线为: $F(p)=ap^2+bp+c$ ,式中各参数取值如表 1 所示。

表 1 AGC 机组煤耗曲线函数参数及厂用电

Table 1 AGC unit coal consumption curve function parameters and auxiliary power

机组编号	$a/(t/MW^2 \cdot h)$	$b/(t/MW \cdot h)$	$c/(t/h)$	$\gamma$	$R/(MW \cdot h)$
1	0.001 35	1.128 50	100	0.080	300
2	0.002 30	1.128 00	84	0.080	200
3	0.002 61	1.535 40	72	0.085	260
4	0.002 84	1.270 40	58	0.069	200
5	0.001 29	1.126 90	100	0.065	300
6	0.002 89	1.126 43	49	0.075	250
7	0.002 48	1.234 50	68	0.080	255
8	0.001 48	1.213 00	82	0.075	300

8 台发电机的出力参数如表 2 所示。

表 2 发电机组出力参数表

Table 2 Output parameter table of generating set

发电机编号	有功输出		无功输出		所属子分区电网
	最大有功	最小有功	最大无功	最小无功	
1	300	140	100	-70	1
2	300	140	100	-70	1
3	600	400	200	-60	2
4	300	140	100	-70	2
5	25	5	8	0	2
6	200	50	50	-30	3
7	600	400	200	-60	3
8	330	150	110	-75	3

假设测试系统配有完整的测量装置, 量测数据具有足够的冗余度。以 IEEE-118 节点测试系统的潮流数据为基础生成量测数据。为模拟不良数据, 从 3 个子分区电网中分别选择 1 个量测数据, 为其添加 10%~35%范围内的随机误差, 作为不良数据<sup>[12-13]</sup>。

### 3.2 算例计算

针对测试系统, 按照基于可信状态集合的分布状态估计方法进行状态估计。计算结果表明, 上述状态估计方法全部辨识出设置的不良数据, 并对不良数据进行了较大幅度的修正, 取得了较好的效果。

状态估计完成后, 按照 1.2 节介绍的算法求解以煤耗最低为目标的最优潮流。首先, 将状态估计求得的可信状态集合按照分层抽样法抽取状态样本, 本算例中共抽取了 8000 个状态样本。然后, 对状态样本进行消减。样本消减采用基于 Kantorovich 距离的样本消减方法<sup>[14]</sup>。通过样本消减, 将状态集合中状态数量消减至 20 个。针对该 20 种状态, 采用 IPOPT 计算程序进行最优潮流求解, 求解结果如表 3 所示。

表 3 不同控制策略下煤耗情况统计表

Table 3 Coal consumption of different control strategies

	初始状态	算法求解	对比方案 1	对比方案 2
煤耗	3 875.282	3 848.105	3 846.578	3 851.482

检查求解结果发现, 测试系统各节点无电压越界情况, 仅节点 9、10 偏离程度较大。将节点 9、10 电压偏离情况与对比方案 1、对比方案 2 下的电压偏离情况进行对比, 结果如表 4 所示。

表 4 测试系统特殊节点电压幅值表

Table 4 Test system special node voltage amplitude table

节点编号	算法求解	对比方案 1	对比方案 2
9	1.085 2	1.090 4	1.089 8
10	1.093 6	1.098 1	1.095 5

由表 3 和表 4 数据分析可知, 本文选用算法对应的煤耗比方案 1 煤耗略高, 但节点 9、10 电压偏离幅度小, 安全性上更具优势。对比方案 2, 本文选用算法对应的煤耗和电压安全性均优于后者。综上所述, 本文算法能确保节点电压安全, 且具有较好的经济性。

## 4 结论

基于可信状态集合的电力状态估计, 提出了一种可靠、高效的状态估计方法, 为最优潮流计算的精准、快速控制提供了可靠运行数据。本文主要以追求煤耗最低的最优潮流为例, 通过对 IEEE-118 节点测试系统做了详细求解分析, 算例结果表明该

算法在运行效率和准确率上都有较好的效果, 具有一定的实用价值。

### 参考文献

- [1] 郑伟业, 吴文传, 张伯明, 等. 基于内点法的交直流混联系统抗差状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 1-8.  
ZHENG Weiye, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Robust state estimator for AC/DC hybrid power system based on an interior point method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 1-8.
- [2] 黄知超, 谢霞, 王斌. 综合模糊综合评判与决策的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 65-69.  
HUANG Zhichao, XIE Xia, WANG Bin. Power system state estimation combined with fuzzy comprehensive evaluation and decision-making[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 65-69.
- [3] 刘前进, 许慧铭, 施超. 基于人工蜂群算法的多目标最优潮流问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 1-7.  
LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao. Research on power flow optimization based on multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 1-7.
- [4] 王晶, 陈骏宇, 蓝恺. 基于实时电价的微网 PSO 最优潮流算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 34-40.  
WANG Jing, CHEN Junyu, LAN Kai. PSO optimal power flow algorithm for a microgrid based on spot power prices[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 34-40.
- [5] 刘文学, 梁军, 负志皓, 等. 基于可信理论的多目标模糊机会约束无功优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 82-89.  
LIU Wenxue, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained optimal reactive power flow based on credibility theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 82-89.
- [6] 卢志刚, 赵号, 刘雪迎, 等. 基于可靠度与可观度的量测优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 180-187.  
LU Zhigang, ZHAO Hao, LIU Xueying, et al. Optimal measurement configuration based on degree of reliability and observability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 180-187.
- [7] 赵晋泉, 钱莉, 陈刚. 一种基于 EEAC 和轨迹灵敏度的暂态稳定约束最优潮流模型与方法[J]. 电力系统保护

- 与控制, 2015, 43(9): 9-14.  
ZHAO Jinquan, QIAN Li, CHEN Gang. A novel EEAC and sensitivity based model and algorithm of transient stability constrained optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 9-14.
- [8] 胡泽春, 王锡凡. 考虑负荷概率分布的随机最优潮流方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 14-18.  
HU Zechun, WANG Xifan. Stochastic optimal power flow approach considering load probabilistic distributions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 14-18.
- [9] WATCHTER A, GIEGLER L T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming[J]. Mathematical Programming, 2006, 106(1): 25-57.
- [10] 王冰, 李积捷, 王春瑛, 等. 基于改进 IGGIII 和快速分解法的电力系统状态估计算法[J]. 继电器, 2008, 36(11): 1-5.  
WANG Bing, LI Jijie, WANG Chunying, et al. State estimation algorithm based on the improved method of IGGIII and fast decoupled arithmetic[J]. Relay, 2008, 36(11): 1-5.
- [11] 李滨, 杜孟远, 祝云, 等. 基于准实时数据的智能配电网状态估计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 34-44.  
LI Bin, DU Mengyuan, ZHU Yun, et al. A state estimator for smart distribution networks with quasi-real time data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 34-44.
- [12] 卫志农, 张云岗, 郑玉平. 基于量测突变检测的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 34-37.  
WEI Zhinong, ZHANG Yungang, ZHENG Yuping. The improvement of measurement suddenly-change detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 34-37.
- [13] 黄彦全, 肖建, 李云飞, 等. 基于量测数据相关性的电力系统不良数据检测和辨识新方法[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 70-74.  
HUANG Yanquan, XIAO Jian, LI Yunfei, et al. A new method to detect and identify bad data based on correlativity of measured data in power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 70-74.
- [14] HEITSCH H, ROMISCH W. Scenario reduction algorithms in stochastic programming[J]. Computational Optimization Applications, 2003, 24(2): 187-206.

收稿日期: 2015-11-04; 修回日期: 2016-01-09

作者简介:

公茂法 (1959-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统自动化, 电力电子技术与应用等方面的研究; E-mail: sdgmf@163.com

柳岩妮 (1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事电力系统自动化的研究。E-mail: yanniliu99@163.com

(编辑 姜新丽)