

# 一种计及暂态稳定约束最优潮流的快速方法

谢俊,陈星莺

(河海大学电气工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要:** 给出了一种求解暂态稳定约束下最优潮流 (OTS)的快速方法。在该方法中,首先将势能边界法与最小二乘法相结合,建立系统暂态稳定裕度与系统运行参数变化之间非线性关系的函数表达式;然后基于该函数表达式形成暂态稳定约束条件引入到常规最优潮流 (OPF)模型中,从而形成 OTS问题的数学模型。该文建立的 OTS分析方法不仅使得 OTS的求解规模与常规 OPF相同,而且计算量亦与常规 OPF基本一样。对新英格兰 10机 39节点典型系统的算例仿真表明了该 OTS分析方法的有效性。

**关键词:** 暂态稳定; 最优潮流; 势能边界法; 最小二乘法

**中图分类号:** TM71      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2006)10-0015-03

## 0 引言

自从 20世纪 60年代最优潮流 (OPF)模型被提出以来,广大学者对该问题进行了广泛的研究。由于传统的最优潮流没有考虑暂态稳定约束,使得其得出的最优运行方式可能无法保证系统运行的暂态稳定裕度要求。随着电力市场的推行,系统需要统一协调考虑运行的安全性和经济性。计及暂态稳定约束的最优潮流 (OTS)由于能将系统的动态安全性和经济性纳入到同一框架中进行分析,近年来引起了各国学者的广泛兴趣<sup>[1-5]</sup>。

与 OPF问题相比,研究 OTS问题的难点和重点都在于如何描述和处理约束条件中的暂态稳定约束。文献 [1]利用能量函数灵敏度系数描述暂态稳定性约束,将一组以暂态能量函数灵敏度系数描述的动态安全约束引入到 OPF模型中。该方法得到的优化模型是一类非光滑优化问题,这类问题的求解目前在数学上还是个难题。文献 [2]将常微分方程表示的暂态稳定约束离散化为对应时间序列上的一系列不等式约束,使得 OTS问题可以采用常规的优化算法求解,但是其变量数和约束条件数较常规 OPF问题急剧增加,存在计算负担过重和收敛困难的问题。文献 [3]采用约束转换技术将微分方程描述的暂态稳定约束等值成相应状态变量的初值约束,把 OTS问题转化为相同规模的 OPF问题,有效的降低了问题规模,但该方法在求解过程中的每一次迭代,均需要计算大量的灵敏度信息和暂态稳定约束函数的雅可比矩阵,使得这种方法计算量较大。文献 [4]将 OTS问题分解为 2个子问题:OPF子问

题和最优控制子问题,通过交替优化 2个子问题的方式得到 OTS解。

本文提出了一种构造 OTS问题的新方法。首先,采用 PEBS法暂态稳定分析技术与数值拟合技术,建立系统暂态稳定裕度与系统运行参数变化之间非线性关系的函数表达式;然后,基于该函数表达式形成暂态稳定约束条件引入到常规 OPF模型中,从而形成 OTS问题的方法框架。该方法不仅使得 OTS的求解规模与常规 OPF相同,而且计算量亦与常规 OPF基本一样。通过对新英格兰 10机 39节点系统的算例仿真表明了该方法框架的有效性。

## 1 多机电力系统的暂态稳定性

本文采用多机电力系统的经典数学模型,各发电机采用  $X_d$ 后的恒定电势  $E$ 来模拟,负荷用恒定阻抗模型。关于惯性中心坐标系 (COI)的发电机转子运动方程为<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} M_i \frac{d\tilde{\omega}_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \\ \frac{d\tilde{\omega}_i}{dt} = \tilde{\omega} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=i}^n (C_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (2)$$

式中: $\tilde{\omega}$ 为发电机  $i$ 的转子角速度; $P_{mi}$ 是发电机  $i$ 被原动机输入的机械功率; $P_{ei}$ 是发电机  $i$ 的输出功率; $P_{COI} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei})$ ;  $M_T = \sum_{i=1}^n M_i$ ;  $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ )为发电机内电势节点的自导纳 ( $i = j$ )和互导纳 ( $i \neq j$ );  $C_{ij} = E_i E_j B_{ij}$ ;  $D_{ij}$

$$= E_i E_j G_{ij0}$$

基于线性路径的假定,系统的暂态能量函数可以描述为:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \dot{\delta}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\delta_i - \delta_i^s) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \delta_{ij} - \cos \delta_{ij}^s)] + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \frac{(\delta_i + \delta_j) - (\delta_i^s + \delta_j^s)}{\delta_{ij} - \delta_{ij}^s} \cdot (\sin \delta_{ij} - \sin \delta_{ij}^s) \quad (3)$$

式中:  $\delta_i^s$  为故障前稳定平衡点发电机  $i$  的转子角;  $P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii0}$

令给定系统在某一扰动时的临界能量为  $V_{cr}$ , 系统在扰动结束时的能量为  $V_c$ , 则可以用  $V_{cr} - V_c$  作为系统稳定裕度的定量描述, 实际应用中采用规格化的稳定裕度  $V_n$ , 通常定义为:

$$V_n = \frac{V_{cr} - V_c}{V_k} \quad (4)$$

对于某一研究系统, 给定一种故障和故障清除方式, 可以采用最小二乘法建立稳定裕度  $V_n$  与发电机  $i$  的输出功率  $P_e$  和故障清除时间  $T_c$  的关系<sup>[7]</sup>:

$$V_n = (P_{ei}, T_{ci}) \quad (5)$$

## 2 OTS问题描述

### 2.1 目标函数

本文采用发电燃料总费用作为目标函数, 机组的燃料特性采用二次函数的形式:

$$\begin{cases} \min F = \sum_{i \in S_G} f_i(P_{gi}) \\ f_i(P_{gi}) = a_i + b_i P_{gi} + \frac{c_i}{2} P_{gi}^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $f_i(P_{gi})$  为机组的燃料特性采用二次函数表示的发电费用;  $a_i, b_i, c_i$  分别为发电机  $i$  的燃料费用系数;  $S_G$  为可调发电机的集合。

### 2.2 等式约束

本文采用极坐标形式的潮流方程作为等式约束, 其表达式为:

$$P_g - P_L - P(V, \theta) = 0 \quad (7)$$

$$Q_r - Q_L - Q(V, \theta) = 0 \quad (8)$$

式中:  $P_g$  和  $Q_r$  分别为有功和无功注入功率向量;  $P_L$  和  $Q_L$  分别为母线有功和无功负荷向量。

### 2.3 不等式约束

#### a 运行约束

$$P_{gi}^{\min} < P_{gi} < P_{gi}^{\max}, i \in S_G \quad (9)$$

$$Q_{ri}^{\min} < Q_{ri} < Q_{ri}^{\max}, i \in S_R \quad (10)$$

$$V_i^{\min} < V_i < V_i^{\max}, i \in S_N \quad (11)$$

$$S_{ij} < S_{ij}^{\max}, (i, j) \in S_{CL} \quad (12)$$

式(9)~(12)分别表示有功电源出力的上下界约束, 可调无功电源的上下界约束, 节点电压幅值的上下界约束, 线路热稳定约束;  $S_G$  为可调无功电源集合,  $S_N$  为节点集合,  $S_{CL}$  为线路集合。

#### b 暂态稳定约束

假定故障前系统处于稳态, 0秒时系统发生故障,  $t_c$ 时刻切除故障; 对于某一扰动, 要求故障切除时刻系统的稳定裕度  $V_n$  不小于  $V_n^*$  ( $V_n^*$  是一个大于 0 的实数), 则:

$$(P_e^*, t_{c1}) \geq V_n^* \quad (13)$$

式中:  $P_e^*$  为受扰最严重发电机组的出力。

## 3 稳定裕度与 $V_n$ 系统参数之间的关系

为了给出以式(6)为目标函数和式(7)~(13)为约束条件的 OTS问题求解方法, 必须分析稳定裕度  $V_n$  与系统参数变化之间的关系。

给定研究系统为新英格兰 10 机 39 节点系统<sup>[6]</sup>, 预想故障的设置方式如下: 该系统在 0 s 时母线 4 发生三相接地短路故障, 在 0.18 s 通过切除线路 4-14 的方式清除故障。对于这样的预想故障, 系统中受扰最严重的发电机是 #2 发电机, 该发电机的输出功率对系统的稳定裕度  $V_n$  影响较大。

在上述情形下, 为了得到稳定裕度  $V_n$  与系统参数变化之间的关系, 即  $V_n$  与不同  $P_{e2}$  和  $t_{c1}$  的关系, 在 3.50 pu ~ 6.00 pu (以 0.25 pu 为步长) 范围内改变  $P_{e2}$  的值, 在 0.13 ~ 0.23 s (以 0.20 s 为步长) 范围内改变  $t_{c1}$  的值。对于每一种不同的  $(P_{e2}, t_{c1})$  情形, 采用 PEB S 法<sup>[6]</sup> 获得系统的稳定裕度  $V_n$ 。

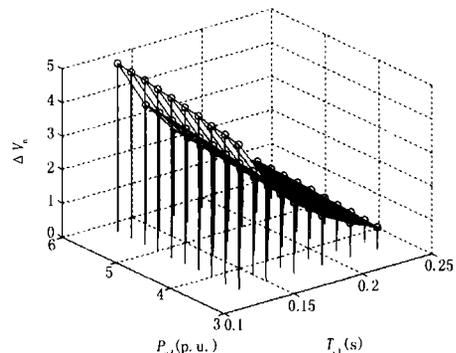


图 1 稳定裕度  $V_n$  与系统参数变化之间的关系

Fig 1 Relationship of  $V_n$  with  $P_{ei}$  and  $T_{c1}$

图 1 显示了  $V_n$  与  $P_{ei}$  和  $t_{cl}$  变化的关系。由图 1 可见,  $V_n = (P_{ei}, T_{cl})$  可以采用以下函数关系式描述<sup>[7]</sup>:

$$V_n = {}_1 P_{ei}^2 + {}_2 T_{cl}^2 + {}_3 P_{ei} + {}_4 T_{cl} + {}_5 P_{ei} T_{cl} + {}_6 \quad (14)$$

式中:系数  ${}_1, {}_2, \dots, {}_6$  可以基于大量仿真结果数据 ( $V_n, P_{ei}, T_{cl}$ ) 采用最小二乘法获得。

#### 4 求解方法

对待研究电力系统进行 OTS 分析之前需要建立该系统的暂态稳定信息数据库,其基本步骤如下:

给定一个预想故障,辨识出系统在该预想故障下受扰最严重的发电机(假定为发电机  $i$ ),在常规 OPF 运行点和极限故障清除时间附近设置不同的数据对 ( $P_{ei}, t_{cl}$ ),采用 PEB S 法求解相应的  $V_n$ ; 基于仿真结果数据对 ( $V_n, P_{ei}, T_{cl}$ ),采用最小二乘法确定该预想故障情形下式 (14) 中各未知系数; 若预想故障遍历完毕,则该系统的暂态稳定信息数据库建立完毕;否则转步骤。

针对待考察电力系统,对某一个预想故障进行 OTS 分析的基本步骤如下: a 求解待考察系统不计暂态稳定约束的常规 OPF 问题; b 设定该预想故障需要满足的稳定裕度  $V_n^*$ , 根据常规 OPF 问题的优化结果采用 PEB S 法检验该优化结果是否满足设定的稳定裕度  $V_n^*$  要求,若满足则停止该预想故障的 OTS 分析并输出计算结果,否则转步骤 c; c 对于给定预想故障,从暂态稳定信息数据库中提取该预想故障情形下方程 (14) 中各系数; d 根据设定的稳定裕度约束  $V_n^*$  求解问题,输出计算结果。

#### 5 算例分析

采用新英格兰 10 机 39 节点典型电力系统验证本文方法框架的有效性。故障设置及数据采集方式同第 3 节所述,利用仿真结果数据,采用最小二乘法得到式 (14) 的未知参数,其表达式为:

$$V_n = -0.02P_{ei}^2 + 293.71T_{cl}^2 - 0.41P_{ei} - 153.78T_{cl} + 2.21P_{ei}T_{cl} + 20.62 \quad (15)$$

当 OTS 分析中  $V_n^*$  的设置不同值时,其优化结果及实际的系统稳定水平  $V_n$  如表 1 所示。由表 1 可见,随着稳定裕度  $V_n^*$  的提高,发电总成本增加, #2 发电机出力下降,这是可以预见的;同时实际的系统稳定水平  $V_n$  与优化结果  $V_n^*$  十分接

近,相对误差在 1.50% 以下,表明了该 OTS 分析方法的有效性。

表 1 不同稳定裕度约束水平下的 OTS 优化结果

Tab 1 Optimal results of OTS with different stability margin constraint  $V_n^*$

$V_n^*$	$V_n$	相对误差 / (%)	$P_{e2}$ / MW	总成本 / (\$ / h)
1.80	1.82	1.04	546.52	36154.39
1.85	1.87	0.81	524.29	36176.96
1.90	1.91	0.55	501.12	36211.50
1.95	1.95	0.25	476.90	36260.31
2.00	2.01	0.50	451.44	36327.92
2.05	2.04	0.28	424.56	36410.84

#### 6 结语

本文将暂态稳定分析技术中的 PEB S 法与数据分析技术中的最小二乘法相结合,建立了一种快速分析 OTS 问题的方法框架。在该方法中,OTS 问题可以采用任何一种有效的常规 OPF 算法求解。最后,通过在新英格兰 10 机 39 节点系统的优化计算结果,证实了本文 OTS 分析方法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] David A K, LU Xu-jun Dynamic Security Enhancement in Power Market Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 431-438
- [2] Scala M L, Trovato M, Antonelli C On-line Dynamic Preventive Control: an Algorithm for Transient Security Dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 15(3): 601-610
- [3] Chen L, Tada Y, Okamoto H, et al Optimal Operation Solutions of Power System with Transient Stability Constraints[J]. IEEE Trans on Circuits & Systems - I Fundamental and Applications, 2001, 48(3): 327-339
- [4] 孙景强,房大中,钟德成. 暂态稳定约束下的最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 12-17. SUN Jing-qiang, FANG Da-zhong, ZHONG De-cheng Optimal Power Flow with Transient Stability Constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 12-17.
- [5] 孙元章,杨新林,王海风. 考虑暂态稳定性约束的最优潮流问题[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 57-59. SUN Yuan-zhang, YANG Xin-lin, WANG Hai-feng Optimal Power Flow with Transient Stability Constraints in Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 57-59.
- [6] Pai M A. Energy Function Analysis for Power System Stability[M]. USA: Kluwer Academic Publisher, 1989.

(下转第 22 页 continued on page 22)

- tion of Electric Power Systems, 1999, 23 (9) : 23-27.
- [11] 李欣然, 刘艳阳, 陈辉华, 等. 遗传算法与传统优化方法应用于电力负荷建模的比较研究 [J]. 湖南大学学报, 2005, 32 (2) : 39-32
- LIXin-ran, LU Yan-yang, CHEN Hui-hua, et al Comparative Study of Genetic Algorithm and Traditional Optimization in Power Load Modeling [J]. Journal of Hunan University, 2005, 32 (2) : 29-32
- [12] 张红斌. 电力系统负荷建模模型结构与参数辨识的研究 (博士学位论文) [D]. 北京: 华北电力大学, 2003
- ZHANG Hong-bin The Research of Load Modeling

Structure and Parameter Identification in Power System, Doctoral Dissertation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003

收稿日期: 2005-10-19; 修回日期: 2005-12-09

作者简介:

金群 (1981 - ), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统动态负荷建模; E-mail: jinqun1981@126.com

李欣然 (1957 - ), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制及负荷建模的教学和研究工作。

### Synthetically improved genetic algorithm in power load modeling

JIN Qun<sup>1</sup>, LIXin-ran<sup>1</sup>, LU Yan-yang<sup>1</sup>, CHEN Hui-hua<sup>2</sup>, TANG Wai-wen<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Power Dispatcher and Communications Center, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcoming of basic genetic algorithm as slow rapidity of convergence and easy to precocity, this paper presents a synthetically improved genetic algorithm and has applied it into power system aggregate load modeling. This improved genetic algorithm has comprehensive scientific designs in many aspects such as choosing original colony, reserving the best individual, adaptive crossover and mutation probability, preventive policy to precocious phenomenon, which can overcome precocity effectively, avoid close relative propagation, enhance rapidity of convergence obviously, and has good adaptive characteristic. The practical modeling based on the field measured data from power substation proves that this improved genetic algorithm has great effects on shortening convergence time, improving model precision, conquering the decentralization of parameters, and is an excellent optimum arithmetic and fairly fits for power system load modeling.

**Key words:** power system; load modeling; parameter identification; genetic algorithm; synthesis improvement

(上接第 17 页 continued from page 17)

- [7] Song Y H, YAO Liang-zhong, MAO Pei-lin, et al Fast Estimation of Transient Stability Limit by Combining Direct Method with Least Squares Technique [J]. Electric Power Systems Research, 1998, 48: 121-126

作者简介:

谢俊 (1979 - ), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场;

陈星莺 (1964 - ), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行分析与控制, 输配电自动化以及电力市场等方面的研究。E-mail: xychen@hhu.edu.cn

收稿日期: 2005-10-18; 修回日期: 2006-02-15

### Fast method for solutions of optimal power flow with transient stability constraints

XIE Jun, CHEN Xing-ying

(Electrical Engineering Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The procedure of the new fast method is as follows. Firstly, by combining potential energy boundary surface (PEBS) method with least squares technique, the functional relation of transient energy margin with different generator power output and different clearing time is established. Then, the transient stability constraint based on the functional relation is formed and added into the traditional optimal power flow (OPF) mathematical model, and the OTS model is established. The OTS problem can be solved by traditional OPF optimization method with the same order of computation complexity. Simulation results on the 10-generator 39-bus New England test system are given to verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** transient stability; optimal power flow; PEBS method; least square techniques