

文章编号:1005—0523(2007)02—0087—05

基于 PSAT 软件的多目标最优潮流计算

陈佳琰, 彭春华

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:介绍了一个把电力系统安全性和市场效益同时作为优化目标的多目标最优潮流计算模型. 通过一个 IEEE6 节点的实例在功能强大的新型电力系统分析软件工具 PSAT 中进行验证, 结果表明采用所描述的方法既可提高电力系统的安全性, 同时还由于电能交易总额的增加和节点边际价格的调整而获得更大的市场效益.

关键词:多目标最优潮流计算; PSAT; 系统安全性.

中图分类号: TM744

文献标识码: A

0 引言

随着电力系统规模的不断发展, 最优潮流计算 OPF 作为一种离线分析工具或一种在线最优控制手段正在得到广泛应用. 用 OPF 可以解决电力市场中的一系列问题^[1].

在当今不断发展的电力市场中, 维持电力系统的安全性对于市场参与者来说特别的重要. 传统的电力系统 OPF 模型, 一般只对系统运行成本最小、有功传输损耗最小等单个的目标进行最优潮流计算. 可靠性准则仅是确定性的“N-1”校验准则^[2], 没有将可靠性问题有机地结合到优化目标中去. 然而, 系统的经济性和安全性是相互矛盾的两个方面. 因此, 处理好市场效益和系统安全性这两方面的问题是电力系统在电力市场机制下面临的一个重要问题. 传统的多目标最优潮流计算模型一般是以发电总量和有功网络损耗, 或以全网总耗量和有功网络损耗最小等为优化目标^[3]. 本文是针对混合市场把安全限制包括在内建立了一个把电力系统安全性和市场效益同时作为优化目标的多目标最优潮流计算模型^[4], 即把系统的经济性和安全性有机的结合起来.

目前 OPF 的经典算法主要是指以简化梯度法、

牛顿法和内点法为代表的几种计算方法. 其中的内点法是解决 OPF 问题的热门算法. 它的显著特征是其迭代次数与系统规模关系不大. 本文所介绍的模型就是用内点法来对多目标 OPF 进行求解.

1 PSAT 软件介绍

PSAT 是一种基于 Matlab 的用于分析和设计中小型的电力系统的软件. PSAT 可以解决潮流计算 PF、连续潮流计算 CPF、最优潮流计算 OPF、小信号稳定性分析 SSA、时域仿真 TD 和静态模型建立等功能^[5]. PSAT 还具有良好的界面 UWPFLIW 和 GAMS^[5]. 除了数学算法和模型, PSAT 还包括一些不错的工具, 例如: 友好的用户界面 GUI、用于编辑电路图的 Simulink 库等.

PSAT 通过在 Matlab 的提示符下敲入如下字符后启动:

```
>>psat
```

PSAT 中提供的最优化模型有简单拍卖模型、市场清空机制模型、标准 OPF 模型、电压稳定性的 OPF 模型、最大负荷条件模型、CPF 和阻塞管理机制.

总之, 因为它的开放性源代码, 简便和友好的 GUI 以及可以解决电力系统多种计算分析等优点,

收稿日期: 2007—01—08

(作者简介: 陈佳琰(1982—), 女, 浙江东阳人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化调度.
(Copyright © 2007 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

非常适合学习和研究之用.

2 多目标最优潮流计算模型

2.1 多目标最优潮流计算的模型

最优潮流计算如果实现最优只涉及一项指标, 则称为单目标最优化, 若同时要求几项指标达到最优, 则称为多目标最优化.

典型的 OPF 模型, 如下:

$$\text{Min. } -(\sum C_{Di}(P_{Di}) - \sum C_{Si}(P_{Si})) \quad (1)$$

s.t.

$$g(\delta, V, Q_G, P_S, P_D) = 0 \quad (2)$$

$$0 \leq P_S \leq P_{Smax} \quad 0 \leq P_D \leq P_{Dmax} \quad (3)$$

$$|P_{ij}(\delta, V)| \leq P_{ijmax} \quad |P_{ji}(\delta, V)| \leq P_{jimmax}$$

$$I_{ij}(\delta, V) \leq I_{ijmax} \quad I_{ji}(\delta, V) \leq I_{jimmax}$$

$$Q_{Gmin} \leq Q_G \leq Q_{Gmax} \quad V_{min} \leq V \leq V_{max}$$

(1)式的目标函数表示市场效益最大, 等式约束(2)为节点的潮流平衡约束. 不等式约束(3)中包括发电机有功出力约束、负荷有功需求约束、输电线功率约束、支路电流约束、发电机无功出力约束以及电压安全约束. C_{Di} 和 C_{Si} 分别表示供方和需求方的竞价单位价格, 用\$/MWh表示; Q_G 为发电机的无功功率; V 和 δ 分别表示母线的电压幅值和相角; P_{ij} 和 P_{ji} 表示流过输电线的有功功率, 为了确保安全应小于输电线的极限功率; I_{ij} 和 I_{ji} 为热限制. P_D 和 P_S 分别表示竞价需求功率和竞价提供功率. 这种模型是有安全约束的 OPF, 此安全约束是指输电线上的功率约束. 流过输电线的极限功率通过离线计算或从电压稳定性研究中得到. 但是, 这样得到的功率极限在实际上并不真正是模型的稳定条件, 而且往往会得到不安全的结果或不合适的价格信号.

因此, 通过利用电压稳定性条件来建立系统安全的模型. 模型如下:

Min.

$$G = -\omega_1(\sum C_{Di}(P_{Di}) - \sum C_{Si}(P_{Si})) - \omega_2 \lambda_c \quad (4)$$

(4)式中的多目标函数 G 包括两部分, 第一部分代表市场效益, 第二部分代表系统的安全性. 通过权值因数 ω_1 和 ω_2 的取值, 可以平衡目标函数中不同量级的差别和体现优化项的重要程度. 在 PSAT 中, 设 $\omega_2 = \omega$, 则 $\omega_1 = 1 - \omega$.

等式约束条件为:

s.t.

$$g(\delta, V, Q_G, P_S, P_D) = 0 \quad (5)$$

$$g(\delta_c, V_c, Q_{Gc}, \lambda_c, P_S, P_D) = 0 \quad (6)$$

(6)式约束为临界负荷平衡约束.

不等式约束条件为:

$$\lambda_{Cmin} \leq \lambda_c \leq \lambda_{Cmax} \quad (7)$$

$$0 \leq P_S \leq P_{Smax} \quad 0 \leq P_D \leq P_{Dmax}$$

$$I_{ij}(\delta, V) \leq I_{ijmax} \quad I_{ji}(\delta, V) \leq I_{jimmax}$$

$$I_{ij}(\delta_c, V_c) \leq I_{ijmax} \quad I_{ji}(\delta_c, V_c) \leq I_{jimmax}$$

$$Q_{Gmin} \leq Q_G \leq Q_{Gmax} \quad Q_{Gmin} \leq Q_{Gc} \leq Q_{Gmax}$$

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad V_{min} \leq V_c \leq V_{max}$$

不等式约束(7)中除了(3)式中的约束, 还包括临界负荷约束, 支路临界电流约束, 发电机提供的临界无功约束以及电压安全约束. 定义发电机提供功率和负荷需求功率如下:

$$P_G = P_{G0} + P_S \quad (8)$$

$$P_L = P_{L0} + P_D$$

定义发电机提供的临界功率和负荷临界需求功率如下:

$$P_{GC} = (1 + \lambda_c + k_{GC}) P_G$$

$$P_{LC} = (1 + \lambda_c) P_L \quad (9)$$

其中 P_{G0} 和 P_{L0} 分别为不参与竞价的发电机出力和不参与竞价的负荷需求功率. k_{GC} 为分布式松弛母线系数, 与 P_G 的值成比例. 在这里 λ_c 是一个表示网络最大负荷能力的参数. 定义临界负荷为:

$$\text{MLC} = (1 + \lambda_c) \sum P_{Di} \quad (10)$$

此文中, 在 λ_c 的计算中系统的阻塞不考虑.

2.2 模型求解方法

内点法将对数壁垒函数、拉格朗日函数和牛顿法结合起来应用到非线性规划问题中. 该方法收敛迅速, 鲁棒性强, 对初值的选择不敏感, 其迭代次数与系统规模关系不大, 在求解电力系统优化问题中已得到广泛的应用. 使用内点法使(4)式变为如下形式:

$$\text{Min. } L \quad (11)$$

$$= G - \rho^T f(\delta, V, Q_G, P_S, P_D) - \rho_c^T f(\delta_c, V_c, Q_{Gc}, \lambda_c, P_S, P_D)$$

$$- \mu_{\lambda_{Cmax}}(\lambda_{Cmax} - \lambda_c - S_{\lambda_{Cmax}}) - \mu_{\lambda_{Cmin}}(\lambda_c - S_{\lambda_{Cmin}})$$

$$- \mu_{P_{Smax}}^T(P_{Smax} - P_S - S_{P_{Smax}}) - \mu_{P_{Smin}}^T(P_S - S_{P_{Smin}})$$

$$- \mu_{P_{Dmax}}^T(P_{Dmax} - P_D - S_{P_{Dmax}}) - \mu_{P_{Dmin}}^T(P_D - S_{P_{Dmin}})$$

$$- \mu_{I_{ijmax}}^T(I_{ijmax} - I_{ij} - S_{I_{ijmax}}) -$$

$$\mu_{I_{jimmax}}^T(I_{jimmax} - I_{ji} - S_{I_{jimmax}})$$

$$- \mu_{I_{jcmax}}^T(I_{jcmax} - I_{jc} - S_{I_{jcmax}}) -$$

$$\mu_{I_{jicmax}}^T(I_{jicmax} - I_{ji} - S_{I_{jicmax}})$$

$$-\mu_{QG_{max}}^T(Q_{G_{max}}-Q_G-S_{QG_{max}})-$$
$$\mu_{QG_{min}}^T(Q_G-Q_{G_{min}}-S_{QG_{min}})$$
$$-\mu_{QG_{cmax}}^T(Q_{G_{cmax}}-Q_{G_c}-S_{QG_{cmax}})-$$
$$\mu_{QG_{cmin}}^T(Q_{G_c}-Q_{G_{min}}-S_{QG_{cmin}})$$
$$-\mu_{V_{max}}^T(V_{max}-V-S_{V_{max}})-\mu_{V_{min}}^T(V-V_{min}-S_{V_{min}})$$
$$-\mu_{V_{cmax}}^T(V_{max}-V_c-S_{V_{cmax}})-\mu_{V_{cmin}}^T(V_c-V_{min}-$$
$$S_{V_{cmin}})-\mu_S(\sum_i lns_i)$$

其中 $\mu_S \in \mathbb{R}$, $\mu_S > 0$, 是障碍参数. s_i 是松弛变量且 $s_i > 0$, 当 s_i 靠近边界时, 式 (11) 趋于无穷大, 因此满足式 (11) 的极小解不可能在边界上找到, 只能在 $s_i > 0$ 的条件下才可能得到最优解. ρ 、 $\rho_c \in \mathbb{R}^n$ 和其他的 $\mu(\mu_i > 0)$ 都是拉格朗日乘子, 所以极小值存在的条件是对所有变量和乘子的偏导数为 0.

通过边际费用, 现场报价可以为市场参与者提供可靠的价格指导. 而基于 OPF 的市场模型不仅可以得出最优点, 而且还可以通过拉格朗日乘子得到一些灵敏变量, 这些变量与每个节点的边际价格 LMPs 有关.

在这, 我们定义各节点的边际价格 LMPs^[3]如下:

$$LMP_{Si} = \rho_{PSi} = C_{Si} + \mu_{PS_{maxi}} - \mu_{PS_{mini}}$$
$$-\rho_{cPSi}(1 + \lambda_c^* + k_{Gc}^*) \quad (12)$$

$$LMP_{Di} = \rho_{PDi} = C_{Di} + \mu_{PD_{mini}} - \mu_{PD_{maxi}}$$
$$-\rho_{cPDi}(1 + \lambda_c^*) - \rho_{cQDi}(1 + \lambda_c^*) \tan(\varphi_{Di})$$
$$-\rho_{QDi} \tan(\varphi_{Di}) \quad (13)$$

λ_c^* 和 k_{Gc}^* 是在求解式 (11) 时产生的附加值, φ_{Di} 是恒定负荷的功率因数角. 从定义中看出 LMPs 不直接依赖权值因数 ω , 而直接与发电机有功出力 and 负荷需求功率的单位竞价价格有关. 因此, 如果已经算出最优点, 那么, 计算 LMPs 很方便.

3 实例分析

本文以 6 节点为例^[4], 如图 2. 运用 PSAT 工具通过和标准的 OPF 比较, 具体对多目标 OPF 进行分析.

图 1 是用 PSAT 自身带的 Simulink 库画的电路图, 各元件在画图时已设置. 见表 1. PSAT 软件还可以自动把电路模型转化为另一种 .m 文件的格式保存.

表 1 中, C 为煤耗费的一次系数, P_{bid} 为最大竞价功率, P_{L0} 、 Q_{L0} 分别代表负荷的基本有功、无功功

率, P_{G0} 为发电机的基本有功出力, Q_{Glim} 为发电机的无功出力上下限.

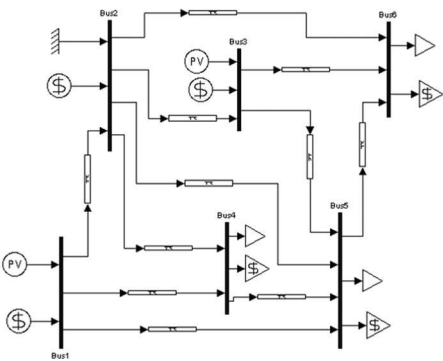


图 1 IEEE 6 节点的电路模型

表 1 系统参数

节点	C [\$ / MWh]	P_{bid} [MW]	P_{L0} [MW]	Q_{L0} [MVar]	P_{G0} [MW]	Q_{Glim} [MVar]
1	9.7	20	0	0	90	± 150
2	8.8	25	0	0	140	± 150
3	7.0	20	0	0	60	± 150
4	12.0	25	90	60	0	0
5	10.5	10	100	70	0	0
6	9.5	20	90	60	0	0

先对 (1) 式所对应的标准 OPF 模型进行计算, 即它的 MLC 值由离线算出. 得到的结果如表 2^[4].

表 2 标准 OPF 计算结果

节点	电压幅值 [p.u.]	ρ [\$ / MWh]	P_{BID} [MW]	P_0 [MW]
1	1.100	9.70	14.4	90
2	1.100	8.80	2.4	140
3	1.084	8.28	20.0	60
4	1.028	11.64	15.6	90
5	1.013	10.83	0.0	100
6	1.023	9.13	20.0	90
总	总需求功率			315.60MW
	总损耗			11.20MW
计	竞价功率			43.069MW
	Pay _{IMO}			388 \$ / h
	MLC			520MW

表 2 中, ρ 表示竞价单位价格, P_{BID} 为参与竞价的有功功率, P_0 为基本有功功率. Pay_{IMO} 表示付给独立市场机构的费用, 例如, 因网络阻塞引起的费用. 再进行式 (4) 的多目标 OPF 计算, 此例中我们设置 ω 的取值为 0~1, 其中步长为 0.05. $0.1 \leq \lambda_c \leq 0.8$. OPF 计算的方法选用预测/校正法, 比牛顿法能更好的收敛. 当 $\omega=0.1$ 时计算结果如表 3.

从表 3 中我们可以看出, 对比标准 OPF 模型,

多目标 OPF 模型中的竞价价格已经调整, 调整后的 LMPs, 使得 PayIMO 更少, 虽然总损耗增加, 但是网络阻塞的费用减少, 而且总电能交易额跟着增加.

表 2 和表 3 中的数据只是其中的一部分, PSAT 工具可以提供更详细的多样式的数据报告. 相比其他电力系统分析工具, PSAT 更方便直观的是, 可以用图表来表示各变量间的关系. 接着我们就取几个变量间的关系来分析和展示 PSAT 软件的优点.

表 3 多目标 OPF 计算结果

节点	电压幅值 [p.u.]	ρ [\$/MWh]	P_{BD} [MW]	P_0 [MW]
1	1.100	8.12	0.0	90
2	1.100	8.08	25.0	140
3	1.100	8.23	20.0	60
4	1.021	8.60	25.0	90
5	1.013	8.69	10.0	100
6	1.040	8.48	8.1	90
总计	总需求功率			323.069MW
	总损耗			11.807MW
	竞价功率			43.069MW
	PayIMO			55.90 \$/h
	MLC			489.92MW

下面对参数 λ_c 、总交易额 TTL、各节点竞价功率以及各节点的边际价格 LMPs 随着 ω 的变化进行分析.

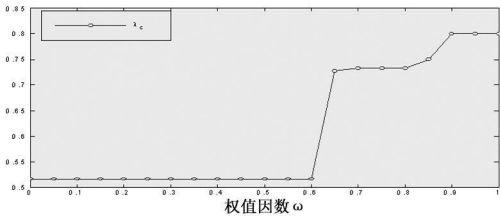


图 2 λ_c 与 ω 间的关系

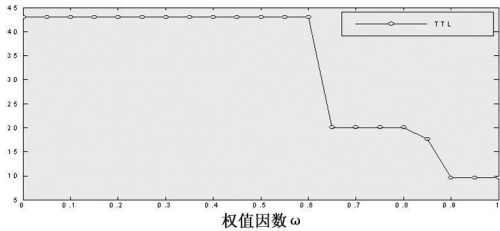


图 3 TTL 与 ω 间的关系

图 2 和图 3, 分别描述了权值因数 ω 对总交易额 TTL 和参数 λ_c 的影响. 安全性的权值越大, 表安全性的参数 λ_c 也越高, 但是, TTL 却越低. 这是因为在本文中假设需求是弹性变化的(需求固定, 即非弹性变化, 本文不再讨论), 即参与竞价的功率是变化的, 因此, 当 ω 增大时, 阻塞减小(安全性增大), PayIMO 减小, λ_c 增大, TTL 减小.

图 4 和图 5 分别描述了随着 ω 变化, 各节点竞价功率和 LMPs 的变化. 从中, 我们可以看出当 $\omega < 0.61$ 左右时, 各母线的竞价功率没什么变化, LMPs 变化也很小. 当 ω 为 0.9 左右时, 竞价功率和 LMPs 下降到了最低水平. 从图 3 中可以看出, 当 $\omega < 0.61$ 时, λ_c 一直维持在同一水平, LMPs 也是最优的; 当 λ_c 继续增大但在 λ_c 最大极限内(即 $\lambda_{cmax} = 0.8$)时, 系统越来越关注安全性问题, 所以参与竞价的功率开始减少, 但 LMPs 没有显著变化. 当 $\lambda_c > 0.8$ 时, 在最优问题中, 系统安全性变的很重要了, 系统不再考虑市场效益问题, 因此竞价功率和 LMPs 都下降到了最低水平, 为了获得更大的利润, 这种情况是市场参与者都不期望的.

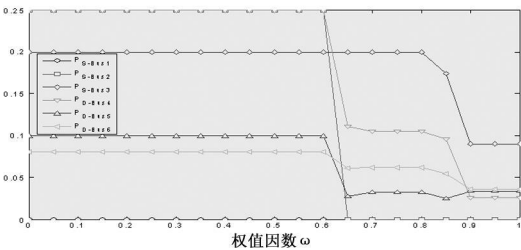


图 4 各节点竞价功率与 ω 间的关系

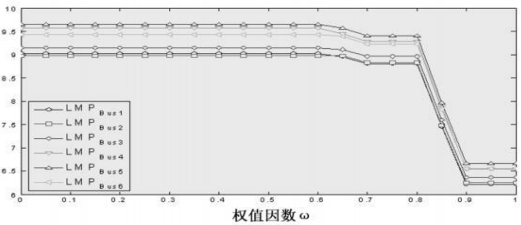


图 5 LMPs 与 ω 间的关系

在上面的分析中看出了从市场最优潮流问题到安全最优潮流问题的过渡和转变. OPF 的电压稳定性限制使得系统的 TTL 需要维持在要求的临界条件内. 通过控制不同目标函数的权值系数 ω 来控制系统的安全水平, 但在典型的有输电线路极限功率约束的 OPF 中就不行. 因此市场各参与者在竞价的同时, 要考虑系统的安全性. 这个多目标最优模型就是给操作者和市场参与者一套参考方案, 帮助分析系统安全性在竞价功率中的作用, 从而可以制定出更合理的操作和竞价决策.

PSAT 工具的这种用图形来表示各变量间的关系非常直观, 这只是其中的几个变量间的关系, 还可以画出更多的, 如 ω 与各支路变量间的关系、 λ_c 与其它变量间的关系等等, 非常方便使用者分析和决策.

4 结论

1) 本文描述了一个结合经济性和系统安全性为目标的最优潮流计算模型,采用了收敛迅速,迭代次数与系统规模关系不大的内点法对其进行求解.通过举例证明,此例迭代次数只有 13 次,规模再大,迭代次数也不会增加很多.

2) 在 PSAT 工具中,通过对 IEEE6 节点的系统进行测试,得到结论,即文中所描述的方法可以通过控制不同目标函数的权重系数来控制系统的安全水平,但在典型的有输电线极限功率约束的 OPF 中就不行.同时,还由于电能交易总额的增加和节点边际价格的调整而获得更大的市场效益.

3) 用 PSAT 进行的多目标潮流计算有速度快,载入数据方便,图表分析直观清楚等优越性.还能指导市场参与者制定出更合理的竞价决策方案.本文中 PSAT 用的是 V1.3.4 版本,到目前为止,PSAT 已经出了更新的版本 V2.0.0,添加了更多的功能.本

文中所有数据结果都是 PSAT 运行在 Matlab7.0.1 上得出的.

参考文献:

[1]卢险峰.最优化方法应用基础[M].上海:同济大学出版社,2003.

[2]程浩忠,张焰.电力网络规划的方法与应用[M].上海:上海科学技术出版社,2002.

[3]卓峻峰,赵冬梅.基于混沌搜索的多目标模糊优化潮流算法[J].电网技术,2003,27(2):41—44.

[4]Federico·Milano,Claudio·A·Caizares,M·Invernizzi·Multi-Objective Optimization for Pricing System Security in Electricity Markets[J].IEEE Trans·on Power Systems,2003,18(2):596—604.

[5]Federico·Milano·An Open Source Power System Analysis Toolbox [J].IEEE Trans·on Power Systems,2005,20(3):1199—1206.

[6]王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.

Multi-objective Optimal Power Flow Based on Software of PSAT

CHEN Jia-yan,PENG Chun-hua

(School of Electrical Engineering,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China)

Abstract:This paper introduced a model of Multi-objective Optimal Power Flow,which taken both market benefit and system security as optimal objective.A example of IEEE6-bus system is tested by using new Power System Analysis Toolbox (PSAT).The results obtained show that the proposed technique is able to improve electric power system security while yielding better market benefit through increased total transaction amount and improved locational marginal prices.

Key words:multi-objective optimal power flow; PSAT; system security