

基于内点法的多目标 OPF 计算方法及其在 PSAT 软件中的应用

彭春华, 陈佳琰, 仲晓春

(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。并用与系统规模关系不大的内点法对模型进行求解。通过 IEEE6 节点系统和 Italian129 节点系统 2 个例子在功能强大的 PSAT 软件中进行验证, 结果表明此多目标模型可以有效地优化不同的目标, 且 PSAT 软件具有一定的实用性。

关键词: 多目标最优潮流计算; 电力系统分析软件工具 PSAT; 系统安全性; 内点法

Multi-objective optimal power flow based on interior point and application in software of PSAT

PENG Chun-hua, CHEN Jia-yan, ZHONG Xiao-chun

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

Abstract: This paper introduces a model of multi-objective optimal power flow, which takes both market benefit and system security as optimal objective. An interior point method is used to solve the multi-objective OPF. Two examples of IEEE6-bus system and Italian 129-bus system is tested by using PSAT. The results obtained show that the proposed multi-objective model can effectively optimize different objectives, and PSAT has the advantage of practicability.

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

中图分类号: TM76; TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)08-0035-05

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, 人们越来越关注电力系统的安全性。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 OPF 模型一般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^[2]。为了把系统的经济性和安全性有机的结合起来, 本文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^[3]。

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电力系统的软件。PSAT 可以解决潮流计算、连续潮流计算、最优潮流计算、小信号稳定性分析、时域仿真等功能^[4]。PSAT 还有良好的界面 UWPFLIW 和 GAMS^[4]。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, 非常适合学习和研究之用。

基金项目: 江西省教育厅基金项目

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

OPF, 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.

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

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

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

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

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

式(1)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)中有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。 G_i 和 G_r 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_b 和 P_s 分别表示竞价需求功率和竞价提供功率, 单位为 MW。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。

因此, 本文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.

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

式(4)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。式(4)中的 λ 是随运行点变化的系统负荷参数, 即运行点负荷和系统基准负荷的差的模相对基准负荷的比值, $0 < \lambda \in R < 1$ 。下标 c 表示系统的临界运行点。 ω_1 和 ω_2 是权值因数 ($\omega_1 > 0$, $\omega_2 > 0$)。通过 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.

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

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

式(5)为节点的潮流平衡约束, 式(6)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)中除了式(3)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^[3]:

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

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

定义发电机提供的临界功率和负荷临界需求功率如下^[3]:

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

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

其中: P_{G0} 和 P_{L0} 分别为固定的发电机出力和基本的负荷需求功率。 k_{Gc} 为分布式松弛母线系数, 与 P_G 的值成比例。定义临界负荷为:

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

本文中, 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, 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。

使用内点法和拉格朗日乘子法使式(4)变为如下形式:

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

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

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

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

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

$$\mu_{I_{ijmax}}^T (I_{ijmax} - I_{ij} - s_{I_{ijmax}}) - \mu_{I_{jimmax}}^T (I_{jimmax} - I_{ji} - s_{I_{jimmax}}) -$$

$$\mu_{I_{jicmax}}^T (I_{jicmax} - I_{jic} - s_{I_{jicmax}}) - \mu_{I_{jicmin}}^T (I_{jicmin} - I_{jic} - s_{I_{jicmin}}) -$$

$$\mu_{Q_{Gmax}}^T (Q_{Gmax} - Q_G - s_{Q_{Gmax}}) - \mu_{Q_{Gmin}}^T (Q_G - Q_{Gmin} - s_{Q_{Gmin}}) -$$

$$\mu_{Q_{Gcmax}}^T (Q_{Gcmax} - Q_{Gc} - s_{Q_{Gcmax}}) - \mu_{Q_{Gcmin}}^T (Q_{Gc} - Q_{Gcmin} - s_{Q_{Gcmin}}) -$$

$$\mu_{V_{max}}^T (V_{max} - V - s_{V_{max}}) - \mu_{V_{min}}^T (V - V_{min} - s_{V_{min}}) -$$

$$\mu_{V_{Cmax}}^T (V_{Cmax} - V_C - s_{V_{Cmax}}) - \mu_{V_{Cmin}}^T (V_C - V_{Cmin} - s_{V_{Cmin}}) - \mu_s (\sum_i \ln s_i)$$

其中: $\mu_s \in R, \mu_s > 0$, 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。 $\rho, \rho_c \in R^n$ 和它的 $\mu (\mu > 0)$ 都是拉格朗日乘子, 所以式 (11) 的极小值存在的条件是对所有变量和乘子的偏导数为 0。

3 实例分析

本文以 IEEE6 节点系统和 Italian 129 节点系统为例^[3]。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。

(1) IEEE6节点系统的分析

图1是用PSAT自身带的Simulink库画的IEEE6节点的电路模型图, 各元件参数在画图时已设置。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。

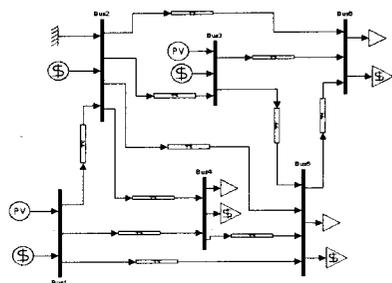


图 1 IEEE 6 节点的电路模型

Fig.1 Circuit model of IEEE6-bus system

表1中, C 代表供方或需求方的竞价单位价格, 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} 代表发电机的基本有功出力, Q_{Glim} 为发电机的无功出力上下限。

表1 系统参数

Tab.1 System parameter

节点	C /\$ \cdot (MWh)^{-1}	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

先对式 (1) 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^[3]。

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。PayIMO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。

表2 标准OPF计算结果

Tab.2 Results of standard OPF

节点	电压幅值 /p.u.	ρ /\$ \cdot (MWh)^{-1}	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		315.60 MW	
共	总损耗		11.20 MW	
	PayIMO		388 \$/h	
	MLC		520 MW	

再进行式 (4) 的多目标OPF计算, 先在PSAT的OPF Setting中进行设置, 此例中我们设置 ω 的取值为0~1。 $0.1 \leq \lambda_c \leq 0.8$ 。OPF计算的方法选用 Mehrotra的预测/校正法, 比牛顿法能更好的收敛。然后运行多目标OPF。当 $\omega = 0.001$ 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, 虽然总损耗增加, 但是PayIMO减少, 而且总电能交易量跟着增加。

表3 多目标OPF计算结果

Tab.3 Results of multi-OPF

节点	电压幅值 /p.u.	ρ /\$ \cdot (MWh)^{-1}	P_{BID} /MW	P_0 /MW
1	1.100	8.93	0.0	90
2	1.100	8.89	25.0	140
3	1.100	9.05	20.0	60
4	1.021	9.47	25.0	90
5	1.013	9.56	10.0	100
6	1.040	9.33	8.1	90
总	总需求功率		323.069 MW	
共	总损耗		11.807 MW	
	PayIMO		61.499 \$/h	
	MLC		489.921 MW	

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。相比其它电力系统分析工具, PSAT更方便直观的是, 可以用图表来表示各变量间的关系。

下面对负荷参数 λ_c 、总交易水平TTL和各节点竞价功率随着 ω 的变化进行分析。

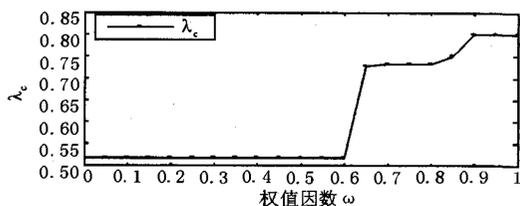


图2 λ_c 与 ω 间的关系

Fig.2 The relation between λ_c and ω

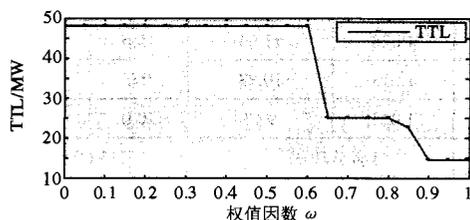


图3 TTL与 ω 间的关系

Fig.3 The relation between TTL and ω

图2和图3,分别描述了权值因数 ω 对TTL和 λ_c 的影响。安全性的权值越大, 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。

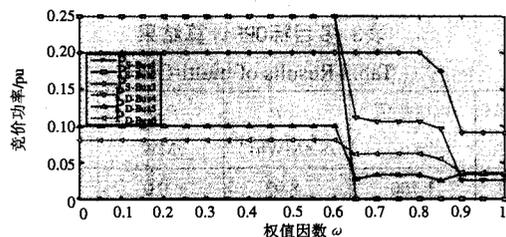


图4 各节点竞价功率与 ω 间的关系

Fig.4 The relation between power bids and ω

图4描述了随着 ω 变化,各节点竞价功率的变化。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。当 ω 为0.9左右时,各母线竞价功率下降到了最低水平。从图2中可以看出,当 $\omega < 0.61$ 时, λ_c 一直维持在同一水平;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,但市场竞价总费用没有显著变化。当 $\omega > 0.9$ 时,系统安全性变的很重要,各母线竞价功率都下降到最低,系统不再考虑市场效益问题。

(2) Italian 129 节点系统的分析

Italian 129 节点系统模型图和具体参数见 GRTN

网站(www.grtn.it)。

在 PSAT 中的仿真结果表明,在 IEEE6 节点系统计算中,标准 OPF 迭代次数为 4 次,多目标 OPF 迭代次数为 13 次。Italian 129 节点系统虽然比 IEEE6 节点系统规模增加很多,但是在各 OPF 的计算中迭代次数并没有增加很多。这充分的体现出了内点法其迭代次数与系统规模关系不大的优点。两个系统的仿真结果呈现类似的特性。

表 4 和表 5 分别列出了 Italian 129 节点系统进行标准 OPF 计算和多目标 OPF (其中, $\omega=0.001$) 计算的部分结果。

表4 标准OPF计算结果

Tab.4 Results of standard OPF

参与者	V /p.u	ρ /\$ \cdot (MWh)^{-1}	P_{BD} /MW	P_0 /MW
Trino	1.132	33.6	221	266
Tavazzano	1.130	34.3	0	879
Turbigo	1.129	34.1	413	764
Fusina	1.132	34.6	756	77
Villarodin	1.132	32.0	127	541
Lavorges	1.132	32.0	133	451
S.Sofia	1.069	35.2	39	307
Galatina	1.120	35.2	119	191
Colunga	1.111	31.4	131	210
Roma()	1.083	34.8	207	330
总	总需求功率		24.8 GW	
共	总损耗		135 MW	
	PayIMO		13.8 10^3 \$/h	
	MLC		27.8 GMW	

表5 多目标OPF计算结果

Tab.5 Results of multi-OPF

参与者	V /p.u	ρ /\$ \cdot (MWh)^{-1}	P_{BD} /MW	P_0 /MW
Trino	1.132	33.3	280	266
Tavazzano	1.132	34.5	0	879
Turbigo	1.132	34.2	753	764
Fusina	1.132	34.1	884	77
Villarodin	1.132	33.4	223	541
Lavorges	1.132	34.1	186	451
S.Sofia	1.101	35.1	192	307
Galatina	1.127	34.2	83	191
Colunga	1.110	34.7	132	210
Roma()	1.103	34.7	204	330
总	总需求功率		26.1GW	
共	总损耗		164MW	
	PayIMO		13.2 10^3 \$/h	
	MLC		28.7 GMW	

参数 ω 、 λ_c 、TTL 和各节点的竞价功率等相互之间的关系与 IEEE6 节点系统中的类似,在这不再进行分析。

从上面的分析中看出,在多目标 OPF 中,通过控制不同目标函数 ω 来控制系统的安全水平,但在典型的有输电线路功率约束的 OPF 中就不行。因此市场各参与者在获得更大的市场效益的同时,要考虑系统的安全性。

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、 λc 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 OPF 模型,采用收敛迅速,迭代次数与系统规模关系不大的内点法对其进行求解。在 PSAT 软件中得到了充分的验证。

2) 通过对 IEEE6 节点系统和 Italian 129 节点系统进行多目标 OPF 计算和分析,文中所描述的方法可以通过调整权重系数对不同的目标进行协调,实现最优化。

3) 用 PSAT 进行的多目标 OPF 计算有速度快,载入数据方便,图表分析直观清楚等优越性。此外,PSAT 具有完善的友好的 GUI 界面和 Simulink 仿真库,非常方便用户使用和学习。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,增加了更多的功能。本文中所有数据结果都是 PSAT 运行在 Matlab7.0.1 上得出。

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] 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.
ZHUO Jun-feng,ZHAO Dong-mei.A Chaos Optimization Based Algorithm for Multi-objective Fuzzy Optimal Power Flow[J]. Power System Technology,2003,27(2):41-44.
- [3] Milano F, Cañizares C A, Invernizzi M. Multi-objective Optimization for Pricing System Security in Electricity Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(2):596-604.
- [4] Milano F. An Open Source Power System Analysis Toolbox[J]. IEEE Trans on Power Systems,2005,20(3):1199-1206.
- [5] 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.

收稿日期:2007-09-10; 修回日期:2007-12-14

作者简介:

彭春华(1973-),男,副教授,博士,主要从事电力市场、热工自动化、电力监控信息系统等方面的研究;

陈佳琰(1982-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化。E-mail:chenjy1128@163.com

(上接第 34 页 continued from page 34)

YAN Zhen-kun, LI Ji-wen, LI Xiao-hua. Study of Voltage and Reactive Power Integrative Control Strategy Based on Fuzzy Boundary and Double Nine-area Control Method[J]. Relay, 2005,33(10):36-39.

- [7] 苏永春,陈星莺,刘存凯.基于遗传算法的变电站电压无功综合控制[J].继电器,2002,30(10):11-14.

SU Yong-chun, CHEN Xing-ying, LIU Cun-kai. Reactive Power/voltage Control in the Substation Based on GA[J]. Relay, 2002,30(10):11-14.

- [8] 耿光飞,杨仁刚.高压配电网无功优化集中控制系统研究[J].继电器,2005,33(24):45-48.

GENG Guang-fei, YANG Ren-gang. Research on Reactive Power Optimization Control System in High Voltage Distribution Power Network[J]. Relay, 2005,33(24):45-48.

- [9] 顾丹珍,徐瑞德.一种地区电网多目标无功优化的新方法—改进模拟退火算法[J].电网技术,1998,22(1):71-74.

GU Dan-zhen, XU Rui-de. A New Approach for Multiple Objective Reactive Power Optimization—Improved Simulated Annealing[J]. Power System Technology,1998,22(1):71-74.

- [10] 张文,刘玉田.自适应粒子群优化算法及其在无功优化中的应用[J].电网技术,2006,30(8):19-24.

ZHANG Wen, LIU Yu-tian. Adaptive Particle Swarm Optimization Method and Its Application in Reactive Power Optimization[J]. Power System Technology, 2006,30(8):19-24.

- [11] 杨银国,张伏生,贺春光,等.基于主动禁忌搜索的配电网无功电压优化控制[J].西安交通大学学报,2005,39(8):895-899.

YANG Yin-guo, ZHANG Fu-sheng, HE Chun-guang, et al. Volt/Var Control in Distribution Systems with Reactive Tabu Search[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005,39(8):895-899.

收稿日期:2007-09-19; 修回日期:2007-12-11

作者简介:

任晓莉(1978-),女,硕士研究生,研究领域为信息与信号处理;E-mail:seaskyrxl@126.com

程红丽(1966-),女,教授,硕士,研究领域为自动化与测控技术;

刘健(1967-),男,教授,博士生导师,博士,研究领域为电力系统及其自动化。