

1-8-2019

GAMS-based Active Power Optimization with Reactive Power Compensation

Weiqing Sun

1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;;

Ye Lei

1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;;

Yiyun Tu

2.College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electrical Power, Shanghai 200090, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

GAMS-based Active Power Optimization with Reactive Power Compensation

Abstract

Abstract: Based on the safe operation of the electric system, aiming at the problems of large power loss and high generation cost, it is unreasonable to schedule electricity through only one index, so *a combined model of economic dispatch with reactive power optimization and a linearized model of unit commitment are proposed. The ideal point method changes multi-objective optimization problem which is combined with the generation cost and power loss into a single objective optimization problem and solved by GAMS.* The case analysis for IEEE-39 bus system and a regional transmission network, by adjusting the generator active and reactive power and the reactive power compensation, demonstrate the effectiveness of reducing the power loss and the generation cost.

Keywords

GAMS, reactive power compensation, economic dispatch, unit commitment

Recommended Citation

Sun Weiqing, Ye Lei, Tu Yiyun. GAMS-based Active Power Optimization with Reactive Power Compensation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3082-3091.

基于 GAMS 的电力系统有功-无功综合优化

孙伟卿¹, 叶磊¹, 涂轶昀²

(1.上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 2.上海电力学院 电气工程学院 上海 200090)

摘要: 在系统安全运行的基础上, 针对线路网损大、发电成本高的问题, 只通过其中某个指标进行发电调度是不合理的, 提出了配合无功优化的经济调度以及线性化后机组组合模型, 采用理想点法将结合线路网损以及发电成本的多目标优化问题转化为单目标优化问题, 利用 GAMS 进行优化求解。在 IEEE-39 节点系统以及华东某地区电网上进行算例分析, 通过调节机组有功、无功出力以及向节点注入适当的无功功率的方式能够有效降低线损和发电成本。

关键词: GAMS; 无功补偿; 经济调度; 机组组合

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 08-3082-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808032

GAMS-based Active Power Optimization with Reactive Power Compensation

Sun Weiqing¹, Ye Lei¹, Tu Yiyun²

(1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2.College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electrical Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Based on the safe operation of the electric system, aiming at the problems of large power loss and high generation cost, it is unreasonable to schedule electricity through only one index, so a combined model of economic dispatch with reactive power optimization and a linearized model of unit commitment are proposed. The ideal point method changes multi-objective optimization problem which is combined with the generation cost and power loss into a single objective optimization problem and solved by GAMS. The case analysis for IEEE-39 bus system and a regional transmission network, by adjusting the generator active and reactive power and the reactive power compensation, demonstrate the effectiveness of reducing the power loss and the generation cost.

Keywords: GAMS; reactive power compensation; economic dispatch; unit commitment

引言

电力系统在提供大量电能的同时, 它也是一个高耗能的产业。如今, 传统化石燃料价格逐年提高, 产量逐年减少, 所以传统能源必将会枯竭, 而我国能源消费结构占主导的为火力发电,

其能源来自煤炭, 会排放出各种空气污染物, 诸如粉尘、SO_x 和废水等, 这些污染物将导致许多气候、环境问题。“十三五”规划中强调“推动低碳循环发展”的大背景下, 推动电力系统向绿色发展显得愈发重要。在发电中改善调度机制, 在输电中优化电网运行方式, 尽可能减少发电成本与线路网损, 对于自然环境的改善、经济性的提高、节能减排都有着非常重要的意义。

GAMS, 即通用数学建模系统, 是世界银行和 GAMS 公司在近年开发的一种旨在建立和求解大



收稿日期: 2017-01-06 修回日期: 2017-05-10;

基金项目: 国家自然科学基金(51407117);

作者简介: 孙伟卿(1985-), 男, 上海, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化运行; 叶磊(1993-), 男, 上海, 硕士生, 研究方向为电力系统优化运行。

<http://www.china-simulation.com>

• 3082 •

型复杂数学规划问题的高级计算机软件^[1]。GAMS 可以高效求解线性规划问题(LP)、非线性规划问题(NLP)、混合整数线性或非线形规划问题(MIP、MINLP)。GAMS 的求解速度取决于模型的规模和它的类型, 它的计算效率高, 结果好, 运用广泛。

无功优化, 即在满足等式和不等式约束下, 在某些节点注入尽可能少的无功功率^[2]来使得目标函数达到最优。文献[3]综述了当前较热的无功优化模型, 阐述并分析了各种算法的优缺点。文献[4]提出了一种多策略融合自适应粒子群优化算法求解电力系统无功优化问题。

当电力系统引入市场机制后, 快速商业化对电网的运行调度提出了更多要求。经济调度是指已经预先确定参加运行机组的前提下, 保证稳定可靠供电和满足系统负荷的需求, 将系统负荷优化地分配给各台发电机组, 使发电成本最小^[5]。文献[6]提出应用改进 PSO 算法求解短期经济调度问题。文献[7]提出一种快速群搜索优化算法, 该算法比其他算法收敛速度更快, 计算时间更短, 能得到更小的发电费用值。文献[8-9]分别基于最小发电成本和碳排放量或最小发电成本和污染气体排放量为目标进行多目标经济调度, 均通过改进多目标粒子群算法进行优化计算, 对含有风电场的 IEEE-13 节点系统或 6 台发电机系统进行仿真, 验证了模型与算法的有效性。

另外, 由于发电部分由多种形式的发电厂组成, 这些发电机组, 它们的特性各不相同, 尝试进行某种组合配置, 可使经济效益进一步提升, 使得经济性最大化。寻找最优机组搭配方式, 制定各时段最佳的机组启停计划问题就是机组组合问题。文献[10]提出了一种用于求解机组组合优化问题的蚁群粒子群混合优化算法。文献[11]提出了一种用于机组组合的混合粒子群算法, 在粒子群算法中引入启发变异, 提高全局收敛能力。文献[12]提出了一种改进粒子群算法, 基于发电成本最小对 10 机系统进行机组组合优化调度, 结果表明其收敛性好, 最优解质量高。

本文在电力系统无功优化、经济调度、机组组合研究的基础上, 根据它们的特点, 在 GAMS 上建模并编写程序进行优化计算, 目的是同时减小线路网损和发电成本。

1 多目标优化模型

本文考虑的目标函数含有发电成本与有功网损, 其中对于机组组合的情况对发电成本的目标函数进行相应修改, 使其能够考虑启停成本。同时本节还将介绍本文的约束条件, 为下节的算例分析建立完整的数学模型。

1.1 目标函数

1) 发电成本最小

发电系统总发电成本可以用系统中各机组有功输出的二次函数曲线之和表示, 即

$$\min F_T = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{G-i}^2 + b_i P_{G-i} + c_i) \quad (1)$$

其中, F_T 为系统燃料成本(\$/hr); N_G 是机组总数; a_i 、 b_i 和 c_i 是发电机发电成本参数, 其中 a_i 、 b_i 分别是机组 i 有功输出 P_{G-i} 的二次项和一次项系数, 代表燃料花费系数, c_i 是各机组空载成本, a_i 、 b_i 和 c_i 是发电厂对各发电机实际量测的历史数据利用二次曲线拟合得到。

在机组组合情况下, 考虑启停成本, 目标如式(2)所示。

$$\min F_{UC} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{G-i}^2 + b_i P_{G-i} + c_i + C_{ON-i} d_{ON-i}^t + C_{OFF-i} d_{OFF-i}^t) \quad (2)$$

式中: T 是调度周期, 本文 $T=24$ 小时; C_{ON-i} 是机组 i 的启动成本; C_{OFF-i} 是机组 i 的停机成本; d_{ON-i}^t 是 t 时段机组 i 的启动决策; d_{OFF-i}^t 是 t 时段机组 i 的停机决策, 为 {0,1} 变量, 见式(3)~(4)。

$$d_{ON-i} = \begin{cases} 0, & \text{机组 } i \text{ 不变} \\ 1, & \text{机组 } i \text{ 启动} \end{cases} \quad (3)$$

$$d_{OFF-i} = \begin{cases} 0, & \text{机组 } i \text{ 不变} \\ 1, & \text{机组 } i \text{ 停机} \end{cases} \quad (4)$$

《节能发电调度办法》^[13]指出：对于同类型火力发电机组按照能耗水平由低到高排序，节能优先；机组运行能耗水平近期暂依照设备制造厂商提供的机组能耗参数排序。

这说明，目前机组能耗参数并不能完全真实地反映机组能耗水平。此外，由于电网中高价低耗的新机组和低价高耗的老机组的存在，完全按照发电成本进行调度可能出现优先利用高耗能机组的情况^[14]，所以单纯依靠发电成本最小来进行节能发电调度是不合理的，有必要研究一种综合考虑发电成本和能耗的绿色调度方法。

2) 有功网损最小

电能经电网传输过程中通过热能等其他形式损失掉有功功率^[15]，即

$$\min F_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \right) R_{ij} \quad (5)$$

其中， V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 的电压值， R_{ij} 和 X_{ij} 是支路 ij 的电阻和电抗， n 为节点数， δ_{ij} 是节点 i 和节点 j 的相角差。

在实际节能发电调度中，考虑有功网损最小，可以让供电公司最大程度获利，同时由于将其考虑其中，也可以对总发电成本最小的目标进行修正，寻求经济效益和节能效益综合最优。因此本文以总发电成本和电网有功网损最小为目标，建立电力系统有功-无功综合优化模型。

1.2 约束条件

1) 功率平衡约束方程

电力系统必须保持发电和用电功率平衡，功率平衡是系统电压和频率保持稳定的基础。一旦功率失去平衡，系统的电压和频率就会出现偏差。为了满足系统安全稳定运行要求，必须设立功率平衡约束。

$$P_{G-i} - V_i \sum_{j \in i} Y_{ij} V_j \cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) = P_{LD-i} \quad (6)$$

$$Q_{G-i} - V_i \sum_{j \in i} Y_{ij} V_j \sin(\delta_{ij} - \theta_{ij}) + Q_{C-i} = Q_{LD-i} \quad (7)$$

式中： P_{G-i} 、 Q_{G-i} 是机组的有功、无功出力；

P_{LD-i} 、 Q_{LD-i} 是有功、无功负荷； V_i 节点 i 的电压； δ_{ij} 节点 i 和节点 j 之间的相角差； Y_{ij} 是线路 ij 导纳的模； θ_{ij} 是线路 ij 相角差。

2) 各机组出力的上下限约束

由于原动机最大、最小出力以及发电机允许机械强度、定子电流等的限制，必须对机组有功出力设定上下限约束。相应的，由于转子线圈与励磁装置的允许电流限制也需要对机组无功出力进行约束。

$$u_i^t \underline{P}_{G-i} \leq P_{G-i} \leq u_i^t \overline{P}_{G-i} \quad (8)$$

$$u_i^t \underline{Q}_{G-i} \leq Q_{G-i} \leq u_i^t \overline{Q}_{G-i} \quad (9)$$

式中： u_i^t 是机组 i 在 t 时段的运行状态，是 $\{0,1\}$ 变量，1代表机组运行中，0代表机组停机中； $\overline{P}_{G-i}$ 和 $\underline{P}_{G-i}$ 分别是发电机有功出力的上下限； $\overline{Q}_{G-i}$ 和 $\underline{Q}_{G-i}$ 分别是发电机无功出力的上下限，有功、无功上下限根据发电机允许电流和机械强度由厂家规定。

3) 节点电压、相角上下限约束

由于受到电气设备绝缘等因素的限制，电力系统的所有电气设备必须运行在额定电压附近，为了安全性，需要对节点电压幅值设定上下限约束。同时为了满足系统运行稳定性，还需要对节点相角设定上下限约束。

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \overline{V}_i \quad (10)$$

$$\underline{\delta}_{ij} \leq \delta_{ij} \leq \overline{\delta}_{ij} \quad (11)$$

式中： V_i 是节点 i 的电压； δ_{ij} 是节点 i,j 之间的相角差； $\overline{V}_i$ 和 $\underline{V}_i$ 分别是节点电压幅值上下限； $\overline{\delta}_{ij}$ 和 $\underline{\delta}_{ij}$ 分别是节点电压相角上下限。节点电压允许偏差范围在国标《GB/T12325-2008》中有相关规定。

4) 无功补偿上下限约束

为了达到无功优化的目的，需要设定各节点无功补偿容量的上下限。

$$\underline{Q}_{C-i} \leq Q_{C-i} \leq \overline{Q}_{C-i} \quad (12)$$

式中： Q_{C-i} 是节点 i 的无功补偿容量； $\overline{Q}_{C-i}$ 和 $\underline{Q}_{C-i}$ 分别是节点无功补偿容量的上下限。

5) 爬坡约束

由于火力机组爬坡无法瞬时完成, 故需要建立爬坡约束。

$$|P_{G,i}(t) - P_{G,i}(t-1)| \leq \Delta P_{G,i} \quad (13)$$

式中: $\Delta P_{G,i}$ 为爬坡限制。

6) 最小启停时间约束:

火电机组由于自身的特性使其不能反复启停, 必须要满足最小停机时间约束和最小启机时间约束。即, 当机组运行时间小于最小运行时间时, 不允许停机; 反之, 当机组停机实际小于最小停机时间时, 不允许启机。其表达式如下:

$$\begin{cases} (u_i^{t-1} - u_i^t)(T_i^{t-1} - T_{i,\min}^{ON}) \geq 0 \\ (u_i^t - u_i^{t-1})(-T_i^{t-1} - T_{i,\min}^{OFF}) \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $T_{i,\min}^{ON}$ 是机组 i 的最小启动时间; $T_{i,\min}^{OFF}$ 是机组 i 的最小停机时间; T_i^{t-1} 是机组 i 在上一个时段总的运行或者停机时间。

由于不等式约束如果是非线性的将很难在 GAMS 中进行处理, 所以需要将其线性化^[16], 它的形式如下:

$$\begin{cases} \sum_{\tau=t}^{a(T_{i,\min}^{ON})} u_i^\tau \geq (u_i^t - u_i^{t-1})b(T_{i,\min}^{ON}) \\ \sum_{\tau=t}^{a(T_{i,\min}^{OFF})} (1 - u_i^\tau) \geq (u_i^{t-1} - u_i^t)b(T_{i,\min}^{OFF}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $a(\cdot)$, $b(\cdot)$ 通式(16)确定:

$$\begin{cases} a(z) = \min(t + z - 1, T) \\ b(z) = \min(z, T - t + 1) \end{cases} \quad (16)$$

2 基于理想点法的单目标转化策略

多目标决策模型变量物理意义多、结构复杂, 用权重系数法无法客观的对各子目标进行评价。本文基于理想点法, 提出多目标-单目标转化策略。

对于多目标问题, 如果决策者能够对每个目标 $f_i(x)$ 一个最优值 f_i^* , 使其满足:

$$f_i^* \leq \min_{x \in R} f_i(x), i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

则称 $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)^T$ 为理想点。

当已知理想点 f_i^* 时, 在目标空间 R 中, 引入欧氏距离, 使目标函数 $f_i(x)$ 与 f_i^* 之间为最小距离, 即为考虑的单目标问题。

本论文提出了利用 GAMS 的最短欧氏距离理想点法^[17], 构造如下单目标问题:

$$\min_{x \in R} U(x) = \|f_i(x) - f_i^*\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i(x) - f_i^*)^2} \quad (18)$$

通过优化各子目标, 得到各子目标的最优值(最小值)和最劣值(最大值)。如, 在以网损最小为目标时, 可得网损最小值和发电成本最大值。为了消除量纲和数量级对决策结果的影响, 对各子目标进行规范化。本文采用离差归一化, 即 Min-Max 标准化, 它可以将原始数据线性变化, 并将结果映射到[0,1]区间内。离差归一化的转换函数如下:

$$f_i' = \frac{f_i - f_{i,\min}}{f_{i,\max} - f_i} \quad (19)$$

3 算例分析

算例分析中, 首先将对如图 1 所示规模较小的 IEEE-39 节点系统详细分析并列出优化结果数据。为使算例更具有实际意义, 在 GAMS 中搭建节点规模较大的华东某地区电网在 11 月典型日负荷下的模型, 对该模型进行有功-无功综合优化。

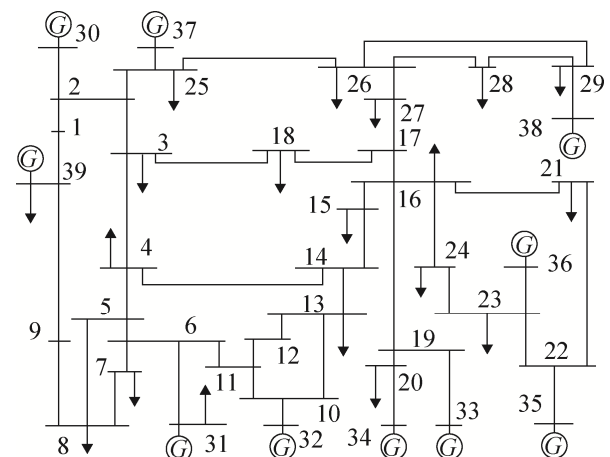


图 1 IEEE-39 拓扑图
Fig. 1 Topology of IEEE-39

3.1 IEEE-39 节点系统算例

图1中31号节点为平衡节点,30、32~39为PV节点,其余为PQ节点,IEEE-39节点的机组数据如表1所示。

表1中 T_i^{on} 为第 i 台发电机的最小连续运行时间(h), T_i^{off} 为第 i 台发电机的最小连续停运时间(h), T_i^0 为第 i 台发电机的初始运行状态(h), Sc_i 和 Sdc_i 分别为第 i 台发电机的开机成本和停机成本(\$)。

(1) 经济调度配合无功优化

在GAMS中建立以网损最小且发电成本最小的多目标模型,优化计算后得到下列数据。

经过理想点法建立评价函数后在GAMS中进行优化运算,通过改变各时段机组出力、各节点无功补偿以及各节点电压,得到评价函数的最小值为

0.3262。

表1 机组参数

Tab. 1 Unit Parameters

机组	a(\$)	b(\$/MW)	c(\$/MW ²)	T_i^{ON}	T_i^{OFF}	T_i^0	Sdc_i	Sc_i
1	1 000	16.19	0.000 48	8	8	8	75	150
2	970	17.26	0.000 31	8	8	8	75	150
3	700	16.6	0.002	5	5	-5	10	20
4	680	16.55	0.002 11	5	5	-5	10	20
5	450	19.7	0.003 98	6	6	-6	12.5	25
6	370	22.26	0.007 12	3	3	-3	10	20
7	480	27.74	0.000 79	3	3	-3	12.5	25
8	660	25.92	0.004 13	1	1	-1	5	10
9	665	27.27	0.002 22	1	1	-1	5	10
10	670	27.79	0.001 73	1	1	-1	5	10

评价函数最优时的最优出力如表2所示,表3为优化后各节点无功补偿的结果。

表2 机组有功出力(pu)

Tab. 2 Active power outputs (pu)

时段	机组									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2.167	1.593	0.969	1.300	0.250	0.200	0.250	0.100	0.100	0.100
2	2.372	1.810	1.051	1.300	0.250	0.200	0.250	0.100	0.100	0.100
3	2.705	2.187	1.174	1.300	0.421	0.200	0.250	0.100	0.100	0.100
4	2.994	2.539	1.279	1.300	0.604	0.200	0.250	0.100	0.176	0.100
5	3.121	2.722	1.300	1.300	0.683	0.222	0.250	0.100	0.245	0.100
6	3.386	3.104	1.300	1.300	0.816	0.347	0.250	0.100	0.344	0.100
7	3.529	3.298	1.300	1.300	0.880	0.389	0.269	0.100	0.383	0.100
8	3.668	3.489	1.300	1.300	0.942	0.416	0.313	0.100	0.422	0.100
9	3.913	3.854	1.300	1.300	1.061	0.476	0.411	0.138	0.502	0.100
10	4.116	4.202	1.300	1.300	1.179	0.552	0.531	0.227	0.550	0.100
11	4.221	4.379	1.300	1.300	1.241	0.593	0.594	0.282	0.550	0.100
12	4.330	4.550	1.300	1.300	1.302	0.634	0.659	0.338	0.550	0.100
13	4.116	4.202	1.300	1.300	1.179	0.552	0.531	0.227	0.550	0.100
14	3.913	3.854	1.300	1.300	1.061	0.476	0.411	0.138	0.502	0.100
15	3.668	3.489	1.300	1.300	0.942	0.416	0.313	0.100	0.422	0.100
16	3.242	2.908	1.300	1.300	0.749	0.293	0.250	0.100	0.304	0.100
17	3.121	2.722	1.300	1.300	0.683	0.222	0.250	0.100	0.245	0.100
18	3.386	3.104	1.300	1.300	0.816	0.347	0.250	0.100	0.344	0.100
19	3.668	3.489	1.300	1.300	0.942	0.416	0.313	0.100	0.422	0.100
20	4.116	4.202	1.300	1.300	1.179	0.552	0.531	0.227	0.550	0.100
21	3.913	3.854	1.300	1.300	1.061	0.476	0.411	0.138	0.502	0.100
22	3.386	3.104	1.300	1.300	0.816	0.347	0.250	0.100	0.344	0.100
23	2.863	2.371	1.232	1.300	0.520	0.200	0.250	0.100	0.104	0.100
24	2.545	2.003	1.116	1.300	0.321	0.200	0.250	0.100	0.100	0.100

表 3 无功补偿 (pu)
Tab.3 Reactive compensation of each node(pu)

时段	节点																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.04	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
2	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.03	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
3	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.02	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
4	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.01	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
5	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.02	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
6	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.01	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.03	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
7	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.07	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
8	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
9	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
10	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	-0.03	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
11	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
12	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
13	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.09	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
14	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1		0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
15	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
16	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.01	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
17	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.02	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
18	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.01	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.03	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
19	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
20	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.10	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
21	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
22	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.03	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
23	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1		0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1
24	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.07	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.03	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1

时段	节点																		
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
1	0.01	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.09	-0.1	0.1	-0.1	0.09	0.04	-0.1	0.1	0.1
2	0.02	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.00	-0.1	0.01	-0.1	0.1	0.04	-0.1	0.1	0.1
3	0.05	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.07	0.03	-0.1	0.1	0.1
4	0.06		0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.05	-0.1	0.1	0.1
5	0.06	0.04	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.04	-0.10	0.1	0.1
6		0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.01	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1
7	-0.05	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.03	-0.1	0.1	0.02
8	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.02	-0.1	0.1	0.1
9	-0.1	-0.02	0.09	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.06		-0.1	0.1	0.1
10	-0.1	0.05	0.10	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.03	-0.1	0.1	-0.1	0.05	0.01	-0.1	0.1	0.1
11	-0.1	-0.1	0.10	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.01	-0.1	0.1	
12	-0.1	0.00	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1		0.01	-0.1	0.1	-0.01
13	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.09	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.01	-0.1	0.1	0.09
14	-0.1	0.06	0.09	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1		-0.1	0.1	-0.1	0.06		-0.1	0.1	0.1
15	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.02
16	0.05	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.06	0.05	-0.1	0.1	0.1
17	0.06	0.04	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.10	0.1	0.1
18		0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.01	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1
19	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.02
20	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.09	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.01	-0.1	0.1	0.1
21	-0.1	0.1	0.09	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.03	-0.1	0.1		-0.1	0.08	0.1
22		0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.04	-0.1	0.1	0.1
23	0.05	-0.04	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1
24	0.03	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.04	-0.1	0.1	

在评价函数最小时优化前后各时段发电成本对比如图2所示, 线路网损对比如图3所示。

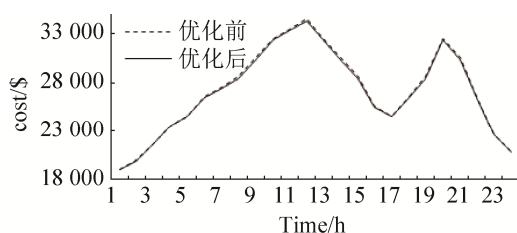


图2 各时段发电成本(多目标)

Fig. 2 Power generation cost in each period (multi-objective)

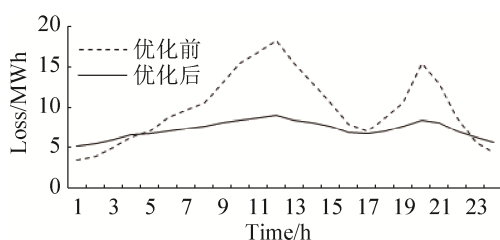


图3 各时段网损(多目标)

Fig. 3 Active power loss in each period (multi-objective)

在此评价函数下, 发电成本为 648 737.45 美元、线路网损为 174.5 MWh。而优化前, 发电成本为 650 186.96 美元、线路网损网损为 238.4 MWh。

发电成本比优化前减少了 1 449.51 美元, 同时线路网损比优化前减少 63.9 MWh。

相比单目标时,

1) 线路网损最小为目标

线损最小时优化前后各时段网损对比曲线如图4所示。

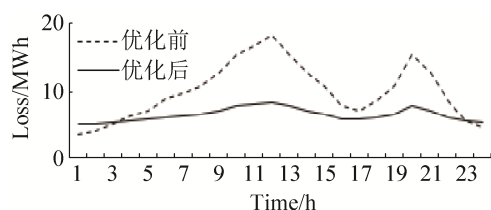


图4 各时段网损(单目标)

Fig. 4 Active power loss in each period (single-objective)

在用电低谷时, 由于系统不缺无功, 所以无功补偿一般只在电高峰时对减小线路网损效果明显。

未优化前, 系统网损为 238.4 MWh, GAMS 在优化计算过程中, 通过改变各时段各机组的出力

以及各节点电压并通过引入无功补偿来进一步优化网络的无功分布, 使网损降至 154.6 MWh, 比优化前减小约 35.15%。优化前、单目标和多目标优化下的线路网损横向对比如表4所示。

表4 单目标与多目标的对比

Tab. 4 Comparison of single and multiple objectives (loss)

优化目标	目标		
	优化前	单目标	多目标
线路网损(MWh)	238.4	154.6	174.5

2) 发电成本最小为目标

发电成本最小时优化前后各时段发电成本对比曲线如图5所示。

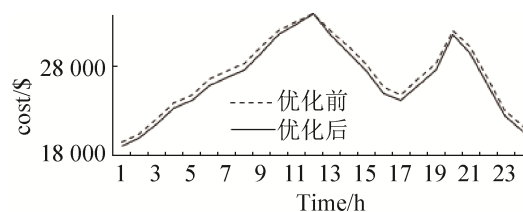


图5 各时段发电成本(单目标)

Fig. 5 Power generation cost in each period (single-objective)

IEEE-39 在未优化时发电成本为 650 186.958 美元, GAMS 在优化过程中通过调节各时段各发电机组的有功、无功出力得到最优发电成本 636 514.077 美元, 节约 13 672.881 美元, 减小成本约 2.1%。优化前、单目标和多目标优化下的发电成本横向对比如表5所示。

表5 单目标与多目标的对比

Tab. 5 Comparison of single and multiple objectives (cost)

优化目标	目标		
	优化前	单目标	多目标
发电成本(\$)	650 186.96	636 514.08	648 737.45

进行多目标优化时, 优化过程需要考虑到输电侧线路网损最小的目标, 而发电成本和线路网损是相互正交的, 所以多目标时的发电成本比单目标时的最优发电成本有所提高, 但仍优于优化前的 650 186.96 美元, 为了进一步减少发电成本, 尝试引入机组组合。

(2) 机组组合

在 GAMS 中进一步引入线性化后的最小启停时间约束, 建立基于机组组合下的 IEEE-39 节点数学模型, 通过仿真得到图 6 和表 6。

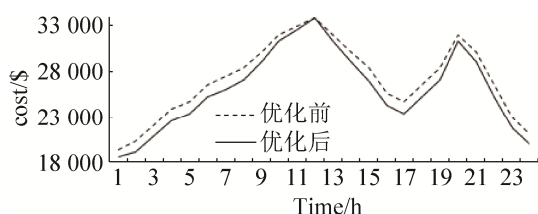


图 6 各时段发电成本

Fig. 6 Power generation cost in each period (UC)

表 6 机组有功出力(pu)

Tab. 6 Active power outputs (pu)

时段	机组								
	1	2	3	4	5	6	8	9	
1	4.550	2.450							
2	4.550	1.500	0.684	0.766					
3	4.550	1.500	1.197	1.253					
4	4.550	2.350	1.300	1.300					
5	4.550	2.850	1.300	1.300					
6	4.550	3.850	1.300	1.300					
7	4.550	4.350	1.300	1.300					
8	4.550	4.550	1.300	1.300	0.300				
9	4.550	4.550	1.300	1.300	1.300				
10	4.550	4.550	1.300	1.300	1.620	0.680			
11	4.550	4.550	1.300	1.300	1.620	0.800	0.380		
12	4.550	4.550	1.300	1.300	1.620	0.800	0.550	0.330	
13	4.550	4.550	1.300	1.300	1.620	0.680			
14	4.550	4.550	1.300	1.300	1.300				
15	4.550	4.550	1.300	1.300	0.300				
16	4.550	3.350	1.300	1.300					
17	4.550	2.850	1.300	1.300					
18	4.550	3.850	1.300	1.300					
19	4.550	4.550	1.300	1.300	0.300				
20	4.550	4.550	1.300	1.300	1.620	0.680			
21	4.550	4.550	1.300	1.300	1.300				
22	4.550	3.600	1.300	1.300	0.250				
23	4.550	1.600	1.300	1.300	0.250				
24	4.550	1.500	0.812	0.888	0.250				

为了看出各机组在不同时段的运行与启停情况, 表 6 中显示了机组在不同时刻的有功出力。

机组组合下由于允许各机组在某个时段停机,

结果显示即使考虑到启停成本也可进一步降低经济调度下的发电成本, 优化前发电成本为 650 186.96 美元, 经济调度下发电成本为 636 514.09 美元(降幅 2.10%), 机组组合下发电成本为 624 261.17 美元(降幅 3.98%)。

综上, 在进行单一目标优化, 以发电成本最小为目标时, 其降幅为 2.1%; 以线路网损最小为目标时, 配合无功优化后, 降幅为 35.15%, 在进行网损最优时发现, 在用电低谷, 由于系统不缺无功, 无功补偿效果不明显, 故对于网损而言无功补偿只在电高峰时效果显著。通过理想定法进行多目标优化时, 发电成本为 648 737.45 美元、线路网损为 174.5 MWh。而优化前, 发电成本为 650 186.96 美元、线路网损网损为 238.4 MWh。发电成本减少了 0.22%, 同时线路网损减少了 26%。对 IEEE-39 节点系统进行 24 个时段机组组合优化, 它能进一步降低经济调度下的发电成本, 相对于优化前降幅为 3.98%, 比经济调度时多减少发电成本 1.88%。

3.2 华东某地区电网算例

以华东某地区 220 kV 及 500 kV 电网在 2016 年 11 月典型日负荷运行状况进行优化计算。该地区电网系统有 220 kV 母线 166 条、500 kV 母线 21 条、500 kV 输电线路 41 条、220 kV 输电线路 339 条、500 kV 变压器 17 台、230 kV 变压器 42 台, 发电机 69 台、负荷节点 181 个、该地区 11 月典型日最大有功负荷为 18 561 MW、最大无功负荷为 13 921 MVar、24 小时总有功负荷为 394 816 MW、总无功负荷 296 112 MVar。

如表 7 所示为华东某地区电网线路网损和发电成本在优化前、单目标和多目标下的横向对比。

表 7 单目标与多目标的对比

Tab. 7 Comparison of single and multiple objectives

优化目标	目标		
	优化前	单目标	多目标
线路网损/ MWh	2 292.58	2 201.60	2 278.31
发电成本(\$)	95 543 467.89	15 903 745.93	18 153 464.70

利用本文所提的方法对该电网进行有功-无功综合优化, 优化前该系统网损较大, 达到 2 292.58 MWh, 为了提高电网效益, 将网损最小作为目标函数, 优化机组出力的同时配合对相应节点注入或吸收少量无功功率作为优化变量, 结果如表 7 线路网损单目标所示, 为 2 201.60 MWh, 有效减小了线路网损。

为了提高发电企业的效益, 将发电成本作为目标函数进行优化, 优化前发电成本为 95 543 467.89 美元, 优化机组出力后使发电成本降至 15 903 745.93 美元。

为了综合考虑电网以及发电企业的利益, 通过对两个单目标分别进行优化可以得到线路网损和发电成本的最优值, 由此即得到该系统的理想点。通过理想点法将多目标转化成单目标后, 利用 GAMS 优化计算后得到最优解为线路网损 2 278.31 MWh (比单目标增加 3.48%), 发电成本 18 153 464.7 美元 (比单目标增加 14.15%), 因为要兼顾两个目标, 所以比单目标时要稍许增大。

最后为了进一步减小发电成本, 引入机组组合, 由于增加了机组启停约束, 允许较贵机组停机让经济性较高的机组承担更多的负荷, 通过 GAMS 优化得到发电成本降至 7 586 621.91 美元, 使该地区电网的经济性得到进一步提升。

4 结论

在进行经济调度时, 由于时段多、系统规模大、节点数多等原因, 常使用直流潮流进行优化从而降低求解难度, 提高优化速度, 但直流潮流无法考虑网损的影响, 有一定缺陷。而本文利用 GAMS 对高维、非线性、多约束优化问题的高效求解性, 尝试通过 GAMS 建立 IEEE-39 节点系统和华东某地区电网基于交流潮流下多目标有功-无功综合优化模型。算例分析表明, 本文所用方法和模型有效可行, 且具有较强的适应性, 具有实际意义, 对电网优化调度具有参考价值。

参考文献:

- [1] 魏传江. GAMS 用户指南[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 3-5
Wei Chuanjiang. GAMS User Guide[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009: 3-5.
- [2] 宋明曙. 电力系统无功优化分析[D]. 山东: 山东大学电气工程学院, 2008.
Song Mingshu. Reactive Power Optimization of Power System Analysis [D]. Shandong: Shandong University School of electrical engineering, 2008.
- [3] 孙建鹏, 韩文花, 朱长东. 电力系统无功优化模型及算法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(6): 6-11.
Sun Jianpeng, Han Wenhua, Zhu Changdong. Reactive Power Optimization Model and Algorithm[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2011, 32(6): 6-11.
- [4] 陈前宇, 陈维荣, 戴朝华, 等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2):8-13.
Chen Qianyu, Chen Weirong, Dai Zhaohua, et al. Reactive Power Optimization Based on Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for Power System[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(2): 8-13.
- [5] 李彩华, 郭志忠, 樊爱军. 电力系统优化调度概述(I) 一经济调度与最优潮流[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(2):60-63.
Li Caihua, Guo Zhizhong, Fan Aijun. Summary of Power System Optimal Dispatch-Economic Dispatch and Optimal Power Flow [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2002, 14(2): 60-63.
- [6] 李娜, 王晓亮. 基于 PSO 算法改进的经济调度优化[J]. 山东电力技术, 2015, 42(3): 12-15.
Li Na, Wang Xiaoliang. Economic Dispatch Optimization Based on Improved PSO algorithm [J]. Shandong Electric Power Technology, 2015, 42(3): 12-15.
- [7] 詹俊鹏, 郭创新, 吴青华, 等. 快速群搜索优化算法及其在电力系统经济调度中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(增 1): 1-6.
Zhan Junpeng, Guo Chuangxin, Wu Qinghua, et al. Fast Group Search Optimizer and Its Application to the Economic Dispatch of Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(S1): 1-6.
- [8] 张晓辉, 董兴华. 含风电场多目标低碳电力系统动态经济调度研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 24-31.
Zhang Xiaohui, Dong Xinghua. Research on Multi-Objective Scheduling for Low-Carbon Power System

- with Wind Farms [J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 24-31.
- [9] 刘刚, 彭春华, 相龙阳. 采用改进型多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 139-144.
- Liu Gang, Peng Chunhua, Xiang Longyang. Economic-Environmental Dispatch using Improved Multi-Objective Particle Swarm Optimization[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 139-144.
- [10] 陈焯, 赵国波, 刘俊勇, 等. 用于机组组合优化的蚁群粒子群混合算法[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 52-56.
- Chen Ye, Zhao Guobo, Liu Junyong, et al. An Ant Colony Optimization and Particle Swarm Optimization Hybrid Algorithm for Unit Commitment Based on Operate Coding[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 52-56.
- [11] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24-28.
- Hu Jiasheng, Guo Chuangxin, Cao Yijia. Hybrid Particle swarm Optimization Method for Unit Commitment Problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 24-28.
- [12] 赵波, 曹一家. 电力系统机组组合问题的改进粒子群优化算法[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 6-10.
- Zhao Bo, Cao Yijia. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Power System Unit Commitment[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 6-10.
- [13] 中华人民共和国国务院办公厅. 节能发电调度办法(试行)[EB/OL]. [2008-03-17]. <http://www.serc.gov.cn>.
- General Office of the State Council of the People's Republic of China. Trial Measures of Energy-Saving Power Generation Dispatching [EB/OL]. [2008-03-17]. <http://www.serc.gov.cn>.
- [14] 孙伟卿, 王承民, 张焰, 等. 基于 Pareto 最优的电力系统有功-无功综合优化 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 38-42.
- Sun Weiqing, Wang Chengmin, Zhang Yan, et al. Optimization of Active Power and Reactive Power in Power System based on Pareto Optimality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 38-42.
- [15] 王江. 基于 GAMS 电力系统运用优化[D]. 广州: 华南理工大学电力学院, 2014.
- Wang Jiang. Optimization of Power System based on GAMS[D]. Guangzhou: School of electrical engineering, South China University of Technology, 2014.
- [16] 张强. 考虑机组组合和电网安全约束的电力系统水火协调[D]. 广西: 广西大学电气工程学院, 2012.
- Zhang Qiang. Hydrothermal Coordination Optimization with the Unit Commitment and Security Constrained[D]. Guangxi: Guangxi University School of electrical engineering, 2012.
- [17] 艾正海. 关于多目标决策问题的理想点法研究[D]. 西安: 西安交通大学数学与统计学院, 2007.
- Ai Zhenghai. Research on the Ideal Point Method of Multi Objective Decision[D]. Xi'an: College of mathematics and statistics, Xi'an Jiao Tong University, 2007.