

## 关于GSDF与GGDF的合理性与最优性

黄泽荣<sup>1</sup>, 彭建春<sup>2</sup>, 肖文娴<sup>3</sup>, 董凯<sup>2</sup>, 龚演平<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司惠州供电局, 广东 惠州 516001; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;  
3. 娄底电业局, 湖南 娄底 417000)

**摘要:** 发电转移分布因子(GSDF)和广义发电分布因子(GGDF)是两种最常用的灵敏度分析及安全评估工具。电力市场中系统运行状态的调整不仅要确保安全, 还要有良好的经济性。GSDF与GGDF两者经济性能孰优孰劣是一个一直被人们忽视却有着重要工程意义的问题。以理论分析和仿真计算为基础对GSDF、GGDF的合理性与经济性进行了深入的分析研究, 得出GSDF在合理性和经济性两方面都优于GGDF的结论。以电力系统安全经济校核为例, 通过IEEE-30节点系统仿真验证了结论的正确性。  
**关键词:** 发电转移分布因子; 广义发电分布因子; 安全; 经济; 电力系统; 运行

### On the rationality and optimality of GSDF and GGDF

HUANG Ze-rong<sup>1</sup>, PENG Jian-chun<sup>2</sup>, XIAO Wen-xian<sup>3</sup>, DONG Dai<sup>2</sup>, GONG Yan-ping<sup>2</sup>

(1. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corp, Huizhou 516001, China; 2. College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Loudi Electric Power Bureau, Loudi 417000, China)

**Abstract:** Generation Shift Distribution Factors (GSDF) and Generalized Generation Distribution Factors (GGDF) are two popular methods of contingency analysis and security assessment. In electricity market, the adjustment of system operating state must not only ensure system security, but also guarantee its economy. The difference of performance between GSDF and GGDF is a problem having been neglected all long, which has great engineering significance. Based on theoretical analysis and simulation, the rationality and economy between GGDF and GSDF are compared and a conclusion is drawn that the GSDF is better than GGDF in rationality as well as economic performance in this paper. Taking the power systems economic security correction as the example, the correctness of the conclusion is verified by the IEEE 30-bus system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50677015).

**Key words:** generation shift distribution factors; generalized generation distribution factors; security; economic; power system; operation

中图分类号: F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)21-0007-04

## 0 引言

当前, 世界电力工业正在发生前所未有的变革, 传统电力工业自上而下的生产和经营模式正在向发电公司、输电公司和配电公司的生产和经营模式转化。经济性伴随电力市场的发展得到进一步强化。而受电网物理条件的限制, 电力系统在市场化运营中必须经常调整系统的运行状态以达到安全经济运行的目的。

在电力市场安全和经济运营分析中, 发电转移分布因子(GSDF)和广义发电分布因子(GGDF)

因建立了发电机有功出力与支路有功潮流之间的近似线性关系, 且计算简单明了, 从而获得了广泛的应用<sup>[1~11]</sup>。文献[4,5]基于GSDF灵敏度因子, 分别应用反向等量配对调整法、启发式算法快速获取系统中各个机组或负荷的调整量, 给出了有效消除支路过载的途径; 另外在北美电力市场中, 用于计算节点电价及其分量的DC-OPF模型中所采用的支路热稳定极限约束方程式也是用GSDF来描述的<sup>[6~8]</sup>; 为了实现电力系统在线经济调度, 文献[9~11]通过利用GGDF灵敏度因子构造网损B系数, 从而快速确定发电机有功出力。以上应用中, 有的采用GSDF, 而有的则采用GGDF, 显得有些随机性。两者孰优孰劣的确是一个被人们忽视却又有着重要

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677015)

工程意义的问题。

为此, 本文以理论分析和仿真计算为基础对 GSDF 与 GGDF 的合理性与经济性展开了深入的研究, 以明确 GSDF 与 GGDF 在理论上的合理性及经济性能上的最优性, 为保障电力系统的安全经济运行提供可靠依据。

## 1 发电转移分布因子

在电力系统分析中, 发电转移分布因子(GSDF)定义为发电机增加单位有功出力所引起的支路有功潮流变化量, 并运用直流潮流计算。根据直流潮流模型, 发电机节点  $i$  对支路  $m$  的 GSDF 为<sup>[12]</sup>:

$$G_{m-i} = \frac{\Delta P_m}{\Delta P_{Gi}} = \frac{X_{li} - X_{ki}}{x_m} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P_m$ 、 $\Delta P_{Gi}$  分别为支路  $m$  有功潮流变化量和节点  $i$  发电机有功出力变化量。  $l$  和  $k$  分别是支路  $m$  的首末节点;  $X_{li}$  和  $X_{ki}$  分别是电抗矩阵中第  $l$  行  $i$  列和第  $k$  行  $i$  列元素;  $x_m$  是支路  $m$  的电抗。

由式(1), 支路  $m$  的有功潮流可描述为:

$$P_m = P_m^0 + \sum_{i=1}^{n-1} G_{m-i} \Delta P_{Gi} \quad (2)$$

式中:  $n-1$  为除平衡节点外的发电机节点数(设平衡节点编号为  $n$ );  $P_m$  为支路  $m$  的有功潮流;  $P_m^0$  是支路  $m$  的初始有功潮流。

可见, GSDF 是以增量形式定义发电机有功出力变化对支路有功潮流的影响, 但由于它是基于直流潮流模型推导而来的, 因此它不仅适用于增量形式, 而且如果把负荷节点看作负的发电机节点, 它也可以以全变量形式反映节点发电量对支路有功潮流的影响。特别是当系统负荷发生变化时, 通过 GSDF 全变量形式就能够快速地确定支路有功潮流。

## 2 广义发电分布因子

为了保证精度, 电力系统实际应用中都是采用 GSDF 的增量形式确定发电机有功出力变化时的支路有功潮流。这样, 一旦系统负荷水平发生变化, 就必须通过潮流计算重新确定支路初始有功潮流。为了弥补这一缺点, 文献[13]提出了广义发电分布因子(GGDF), 以反映发电水平变化时发电机有功出力对支路有功潮流的影响。其主要思想是假设支路有功潮流是各发电机有功出力的线性函数, 即:

$$P_m = \sum_{i=1}^n D_{m-i} P_{Gi} \quad (3)$$

式中:  $n$  为系统发电机节点数;  $P_{Gi}$  为发电机  $i$  有功出力;  $D_{m-i}$  为发电机节点  $i$  对支路  $m$  的 GGDF。

根据式(2)和式(3), 可以推导出 GGDF 与 GSDF 之间的关系<sup>[13]</sup>。

$$D_{m-i} - D_{m-r} = G_{m-i} \quad (4)$$

式中:  $D_{m-r}$  表示平衡节点  $r$  对支路  $m$  的 GGDF。

其中  $D_{m-r}$  是在假设系统所有负荷都由平衡机平衡的条件下获得的。具体可描述为:

$$D_{m-r} = \frac{P_m^0 - \sum_{i=1}^{n-1} G_{m-i} P_{Gi}}{\sum_{i=1}^n P_{Gi}} \quad (5)$$

可见, 通过式(4)和式(5)就可以求得各发电机对系统中所有支路的 GGDF。

## 3 GSDF 与 GGDF 的合理性

GSDF 所建立起来的发电机有功出力与支路有功潮流的关系是基于直流潮流模型直接推导而来的, 因此它所反映的线性关系建立在以下三个假设条件的基础上。

① 忽略支路电阻, 只计及支路电抗;

② 假设线路  $l-k$  两端电压的相角差  $\theta_{lk} = \theta_l - \theta_k$  很小, 使得  $\sin \theta_{lk} \approx \theta_{lk}$ ,  $\cos \theta_{lk} \approx 1$ ;

③ 假设系统中所有节点电压幅值都为  $1 \text{ pu}$ 。

由于在实际电力系统中, 线路电抗大多远远大于线路电阻, 且运行时, 系统中所有节点电压都在额定电压附近, 同时线路两端的电压相角差通常都在  $30^\circ$  以内。故上述假设条件与实际电力系统运行状况基本吻合。因此, GSDF 从理论和工程实际上讲都是比较合理的。

GGDF 是以全变量形式建立发电机有功出力与支路有功潮流之间的线性关系。该线性关系是通过 GSDF 灵敏度因子进行修正获得的, 即在 GSDF 的基础上, 对每个发电机节点增加一个平衡机修正因子  $D_{m-r}$ 。由于该修正因子是线路实际有功潮流与按 GSDF 算得的有功潮流之差, 再除以所有发电机的有功出力之和得到的, 它体现的是一种正比例关系。因此该修正因子从电路理论的角度看是缺乏依据的。

可见, GSDF 是只基于直流潮流模型直接推导而来的线性关系。而 GGDF 则是在 GSDF 的基础上, 通过一个从电路理论角度上看是缺乏依据的平衡机修正因子进行修正得到的; 同时系统潮流分布是由发电机出力与负荷共同决定, 而不应如 GGDF 所定义的仅仅是发电机有功出力的线性函数。因此, GSDF 无论在理论推导上还是在定义上比 GGDF 更合理。

## 4 GSDF 与 GGDF 的经济最优性

GSDF 与 GGDF 的经济最优性是指这两种灵敏度因子在电力系统经济运营中所表现出来的经济优劣性。由于 GSDF 是基于直流潮流模型直接推导而来的灵敏度因子, 故它只由电力网络的拓扑结构与参数唯一确定; 此外, 由它所建立起来的节点发电功率与支路有功潮流之间的线性关系, 不仅可以用于增量形式, 也可以用于全变量形式。只要系统拥有足够的无功源, 使系统中所有节点都运行在额定电压附近, 通过 GSDF 就能够很好地反映支路有功潮流。大量的仿真结果表明在最恶劣的运行状况下, 用 GSDF 计算线路潮流时引起的误差也在 10% 以内。

而 GGDF 是在 GSDF 的基础上, 通过平衡机修正因子进行修正得来的, 具体见式(4)和式(5)。这就使得 GGDF 不仅受网络拓扑结构及参数的影响, 还与式(5)的平衡机修正因子有关。由于该平衡机修正因子是按正比例求取的, 一旦负荷水平发生变化, 且负荷变化不与原先负荷同型时, 通过 GGDF 反映出来的支路有功潮流将会出现较大的偏差。

综上所述, GSDF 在电力系统经济性分析中产生的效果应比 GGDF 更佳。下面结合具体的电力系统安全经济校核问题仿真验证上述分析的正确性。

## 5 GSDF 与 GGDF 经济最优性仿真设计

针对上述关于 GSDF 与 GGDF 合理性与经济性的理论分析, 下面以电力系统安全经济校核为例对相应结论进行仿真验证。

### 5.1 经典安全经济校核模型

以系统发电费用最小为目标, 电力系统有功安全经济校核的经典模型可描述为:

$$\min F = \sum_{i=1}^n f_{pi}(P_{Gi}) \quad (6)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^n P_{Gi} - L = \sum_{i=1}^N P_{Di} \quad (7)$$

$$-P_m^{\max} \leq P_m \leq P_m^{\max} \quad m=1, \dots, b \quad (8)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad i=1, \dots, n \quad (9)$$

式(6)中:  $f_{pi}(P_{Gi})$  为节点  $i$  的发电机费用函数;  $b$  为系统支路数;  $n$  为系统节点总数; 式(7)为系统功率平衡方程; 式(8)为支路热稳定极限约束方程; 式(9)为发电机有功出力约束方程。  $P_{Gi}^{\max}$ 、 $P_{Gi}^{\min}$  分别为节点  $i$  发电机的有功出力上下限值,  $P_m^{\max}$  为支路  $m$  的

功率传输极限;  $L$  为系统有功网损。

该模型计及了系统网损, 使得安全校核调整方案更优。

### 5.2 网损的近似算法

要求解模型(6)~(9), 还得给出系统有功网损的发电机出力表达式, 在直流潮流近似条件下, 系统中所有节点电压幅值都可视为 1 pu。因此支路  $m$  的有功损耗可近似描述为<sup>[11]</sup>:

$$L_m = \left(\frac{P_m}{V_i}\right)^2 \times R_m = (P_m)^2 \times R_m \quad (10)$$

式中:  $R_m$  为支路  $m$  的电阻;  $P_m$  为支路  $m$  的有功潮流;  $V_i$  为支路  $m$  首端节点电压幅值。

为了满足实时性要求, 本文对式(10)泰勒展开, 且忽略二次及以上高次项, 得线性近似:

$$L_m = (P_m^0)^2 R_m + 2(P_m^0) \times \Delta P_m \times R_m \quad (11)$$

针对式(11), 并结合式(2)和式(3), 可推导出基于 GSDF、GGDF 灵敏度的网损表达式:

$$L_{\text{GSDF}} = \sum_{m=1}^b \left[ (P_m^0)^2 R_m + 2P_m^0 R_m \left( \sum_{i=1}^{n-1} G_{m-i} \Delta P_{Gi} \right) \right] \quad (12)$$

$$L_{\text{GGDF}} = \sum_{m=1}^b \left[ (P_m^0)^2 R_m + 2P_m^0 R_m \left( \sum_{i=1}^n D_{m-i} \Delta P_{Gi} \right) \right] \quad (13)$$

在上述电力系统安全经济校核模型中, 式(7)中  $L$  可按式(12)或式(13)计算; 本文仿真计算都是采用式(13)进行计算。

### 5.3 仿真设计

为验证以上关于 GSDF 与 GGDF 经济最优性的理论分析结果, 基于经典安全经济校核模型, 分别应用 GSDF 与 GGDF 描述支路有功潮流, 获取安全经济校核方案, 根据所得方案的安全校核费用, 即校核方案的总发电费用与当前运行点的发电总费用之差来比较 GSDF 与 GGDF 在安全经济校核中的经济优越性。由于电力系统安全经济校核是基于当前运行点考虑下一运行时段安全经济运营问题, 针对下一运行时段系统总负荷增量可大于零或小于零, 有如下两种情况:

Case1: 系统总负荷增量大于零, 按安全经济校核原理, 安全校核成本将大于零, 若 GSDF 比 GGDF 的经济性优越, 则前者的安全校核成本应小于后者。

Case2: 系统总负荷增量小于零, 所得安全校核成本将小于零, 若 GSDF 比 GGDF 的经济性优越, 则前者的安全校核成本绝对值应大于后者。

为此, 按以上两种情况进行仿真计算, 比较 GSDF 与 GGDF 的经济优劣性。具体情况见下节。

### 6 仿真实例

本文通过修改的 IEEE-30 节点系统对 GSDF 与 GGDF 经济最优性进行验证<sup>[14]</sup>。下面是系统中六台发电机的发电费用函数。

$$C_{gp1} = 0.0060P_{G1}^2 + 1.00P_{G1} \quad (14)$$

$$C_{gp2} = 0.0175P_{G2}^2 + 1.75P_{G2} \quad (15)$$

$$C_{gp3} = 0.0625P_{G3}^2 + 1.00P_{G3} \quad (16)$$

$$C_{gp4} = 0.0050P_{G4}^2 + 3.25P_{G4} \quad (17)$$

$$C_{gp5} = 0.1250P_{G5}^2 + 3.00P_{G5} \quad (18)$$

$$C_{gp6} = 0.0180P_{G6}^2 + 3.00P_{G6} \quad (19)$$

假设系统当前运行点(基态负荷水平)是最优的,通过最优潮流计算确定该状态下系统发电机的有功出力,确保系统总发电费用最优,所得费用为 668.45 \$。为了有效地比较 GSDF 与 GGDF 经济优劣性,应用上述经典模型对不同负荷增量情况进行安全经济校核仿真计算。分别构造系统负荷按 0.9 倍、1.2 倍基态负荷变化的两种情况,并将支路 1-2、2-6 的热稳定极限分别取为 100 MW, 38 MW。所得安全经济校核方案中发电机有功出力及安全校核费用如表 1 所示。

表 1 满足安全约束的发电机出力及安全校核费用

Tab.1 Security correction cost and generation output meeting security constraint

发电机出力 /MW	0.9 倍基态负荷		1.2 倍基态负荷	
	GSDF	GGDF	GSDF	GGDF
$G_1$	150.361 7	148.545 9	149.832 1	147.999 1
$G_2$	40.433 5	40.888 9	49.251 4	49.296 9
$G_3$	18.680 7	18.791 9	43.478 2	44.366 0
$G_4$	25.438 8	26.624 8	35.000 0	35.000 0
$G_5$	10.000 0	10.000 0	24.372 8	25.209 6
$G_6$	12.000 0	12.000 0	40.000 0	40.000 0
校核费用/\$	-75.573 0	-74.664 9	322.392 9	330.900 6

由表 1 可见,当系统负荷按 0.9 倍基态负荷变化时,即负荷增量变化小于零,由 GSDF 和 GGDF 得到的安全经济校核费用分别为 -75.573 0 \$、-74.664 9 \$。前者的绝对值大于后者,说明应用 GSDF 得到的安全校核方案,其发电总费用小于 GGDF 所得解决方案的发电总费用;因此 GSDF 的经济性比 GGDF 优越。而当系统负荷按 1.2 倍基态负荷变化时,应用 GSDF 得到的校核费用为 322.392 \$,较基于 GGDF 获得方案的校核费用 330.900 6 \$ 小 8.507 7 \$,这也说明了 GSDF 的经济性能要比 GGDF

好。

由于在电力系统安全经济校核中,以上两种情况能够充分说明下一时段系统运行情况,因此通过上述仿真计算就能够很好地验证 GSDF 与 GGDF 的经济优劣性。GSDF 和 GGDF 在上述模型中所体现出来的经济优劣性是由它们本身的合理性决定的,因为 GSDF 能很好地拟合支路有功潮流,而 GGDF 受负荷同型变化的限制,所反映出来的支路有功潮流会出现较大的偏差。

### 7 结论

发电转移分布因子和广义发电分布因子是两种最常用的灵敏度分析与安全评估工具,在电力安全、经济运营中得到广泛的应用。本文通过理论分析对 GSDF、GGDF 的合理性与经济性进行了深入的分析比较,得出了 GSDF 在理论上比 GGDF 合理以及在经济性能上比 GGDF 更优的结论。并以电力系统安全经济校核模型为例,通过 IEEE-30 节点系统进行仿真计算,结果表明应用 GSDF 获得的安全经济校核方案比应用 GGDF 得到的安全经济校核方案更优,验证了上述结论的正确性。该结论能为电力系统的安全经济运营提供可靠依据,具有很好的工程意义。

### 参考文献

[1] Chang Yung-chung, Yang Wei-tzen, Liu Chun-Chang. A New Method for Calculating Loss Coefficients[J].IEEE Trans on Power Systems, 1994, (9): 1665-1611.

[2] 顾乃炎, 侯志俭.几种快速确定发电机分配系数的方法[J].电网技术, 1999, (23): 40-43.

GU Nai-yan, HOU Zhi-jian. Fast Determination Methods of Generator Distribution Factors[J]. Power System Technology, 1999, (23): 40-43.

[3] 沈瑜, 夏清, 康重庆.发电联合转移分布因子及快速静态安全校核算法[J].电力系统自动化, 2003, 27(18):13-17.

SHEN Yu, XIA Qing, KANG Chong-qing. Generation Jointly Shift Distribution Factor (gjsdf) and Fast Security Analysis Algorithm in Economic Dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (18): 13-17.

[4] 邓佑满, 黎辉, 张伯明, 等.电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J].电力系统自动化, 1999, 23(18): 5-8.

(下转第 40 页 continued on page 40)

- Ji Guang, ZHU Tao-xi. Introduction of Wave Front Protection in Tian-Guang HVDC Transmission System[J]. Relay, 2008, 36(21): 86-89.
- [6] 朱韬析, 张海凤. 天广直流输电系统非特征谐波保护简介[J]. 高电压技术, 2007, 32 (增刊): 69-71.  
ZHU Tao-xi, ZHANG Hai-feng. Introduction of the Protections Based on Magnitude of Non-Characteristic Harmonics in Tian-Guang HVDC Transmission Project [J]. High Voltage Engineering, 2007, 32 (S): 69-71.
- [7] 张海凤, 朱韬析. 整流侧交流系统故障对高压直流输电系统的影响[J]. 继电器, 2007, 35 (15): 24-27.  
ZHANG Hai-feng, ZHU Tao-xi. Influence of Rectifier AC Fault on HVDC Transmission System[J]. Relay, 2007, 35 (15): 24-27.
- [8] 余江, 周红阳, 黄佳胤, 等. 影响直流 100 Hz 保护的交流系统故障范围分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3): 47-51.  
YU Jiang, ZHOU Hong-yang, HUANG Jia-yin, et al. Impact of Fault Location in AC System to 100 Hz Protection of HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3): 47-51.
- [9] 黄佳胤, 周红阳, 余江. “3.21”天广直流线路高阻抗接地故障的分析与仿真[J]. 广东电力, 2005, 18 (11): 15-17.  
HUANG Jia-yin, ZHOU Hong-yang, YU Jiang. Analysis and Simulation on “3.21” High Impedance Earth Fault of Tian-Guang HVDC Project[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18 (11): 15-17.
- [10] 刘东, 吴泽辉. 天广直流线路高阻抗接地故障保护分析[J]. 南方电网技术研究, 2005, 1 (5): 57-60.  
LIU Dong, WU Ze-hui. Analysis on the Tian-Guang DC line Protection against High-impedance Ground Faults[J]. Southern Power System Technology Research, 2005, 1 (5): 57-60.

---

收稿日期: 2008-11-09

作者简介:

朱韬析 (1980-), 男, 工程师, 目前从事直流输电维护工作; E-mail: taoxi\_zhu@hotmail.com

汲广 (1976-), 男, 工程师, 目前从事直流输电管理工作;

毛海鹏 (1978-), 男, 工程师, 目前从事直流输电技术管理工作。

---

(上接第 10 页 continued from page 10)

- DENG You-man, LI Hui, ZHANG Bo-ming, et al. Adjustment of Equal and Opposite Quantities in Pairs for Strategy of Active Power Security Correction of Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 5-8.
- [5] 王秀丽, 甘志, 雷兵, 等. 输电阻塞管理的灵敏度分析模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (4): 10-13.  
WANG Xiu-li, GAN Zhi, LEI Bing, et al. Sensitivity Analysis Approach to Transmission Congestion Management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (4): 10-13.
- [6] PJM Training Materials (LMP 101)[Z]. PJM.
- [7] LI Fang-xing, BO Rui. DCOF-Based LMP Simulation: Algorithm, Comparison with ACOPF, and Sensitivity [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, (22): 1475-1485.
- [8] LI Fang-xing. Continuous Locational Marginal Pricing (CLMP)[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, (22): 1638-1646.
- [9] Jan R M, Chen N. Applications of the Fast Newton-Raphson Economic Dispatch and Reactive Power/Voltage Dispatch by Sensitivity Factors to Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1995, 10(2): 293-301.
- [10] Chen Shin-der, Chen Jiann-fuh. A New Algorithm Based on the Newton-Raphson Approach for Real-time Emission Dispatch[J]. Electric Power Systems Research, 1997, (40): 137-141.
- [11] Chen Shin-der, Chen Jiann-fuh. A Direct Newton-Raphson Economic Emission Dispatch[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2003, (25): 411-417.
- [12] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学, 1993.
- [13] Wai Y N. Generation Distribution Factors for Power System Security Evaluations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1981, 100(3).
- [14] Lsac O, Stott B. Optimal Load Flow with Steady-state[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1974, 93(3): 745-751.

---

收稿日期: 2008-11-15; 修回日期: 2009-02-25

作者简介:

黄泽荣 (1983-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: zhruang@126.com

彭建春 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力市场、电力系统优化运行、控制的研究;

肖文娟 (1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场及电力系统经济运行。