

# 考虑电压和热稳定约束的可利用传输能力的快速算法

曾勇波, 李华强, 范勇, 王秀婕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 在现代电力市场环境, 可利用传输能力(ATC)需要尽快提供给使用方。而在计算中要考虑的所有N-1故障因素导致了ATC计算任务非常繁重。基于此, 提出了一种应用故障过滤与排序技术的ATC快速计算方法。首先, 采用迭代线性潮流法(ILPF)对电网的N-1故障进行排序以筛选出热稳定极限和电压幅值约束条件下最严重的故障情况; 然后, 应用原始-对偶内点法对最严重故障情况进行ATC的计算, 解决了ATC计算的耗时问题。算法的有效性通过IEEE30母线系统的仿真得到了验证。

**关键词:** 可利用传输能力; N-1故障; 故障过滤; 迭代线性潮流法; 内点法

## A fast computation method for available transfer capability based on voltage and thermal constraints

ZENG Yong-bo, LI Hua-qiang, FAN Yong, WANG Xiu-jie

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In the circumstances of modern deregulation, Available Transfer Capability (ATC) must be provided to the consumers as quickly as possible, while it is a big burden to compute ATC because of taking account of all N-1 outage contingencies. Therefore, this paper proposes a fast computation method to obtain the exact solutions of ATC by means of contingency screening technique. First, the Iterative Linear AC Power Flow (ILPF) method is used for screening the N-1 contingency throughout the network to identify the severest contingency cases with respect to the thermal and voltage magnitude limits, and the Primal-Dual Interior Point Method (PDIPM) is used to obtain the exact solutions of ATC according to the results of contingency screening. The proposed computation method reduces the execution time of computing ATC. The effectiveness of the proposed method is demonstrated through IEEE 30 bus systems.

**Key words:** available transfer capability; N-1 outage contingency; contingency screening; iterative linear AC power flow method; interior point method

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)07-0032-05

## 0 引言

从上世纪90年代起, 在电力市场的竞争环境下, 电力系统越来越趋于系统化, 系统中往往存在着大量而又频繁变化的电力交易, 这样使得输电系统的负荷增加、环流增大、容量裕度减小、稳定裕度降低, 从而增加了系统的安全与稳定问题。为了保证电力系统的安全运行, 需要对电力系统的安全运行水平和输电能力进行实时评估。因此对电力系统的可利用传输能力ATC (Available Transfer Capability) 的计算就显得特别重要。

根据北美电力系统可靠性委员会NERC (North American Electric Reliability Council) 1995年文献<sup>[1]</sup>, ATC可定义为, 在现有的输电合同基础上,

实际输电网络中剩余的、可用于使用的传输容量。并且, 在北美OASIS (Open Access Same-Time Information System) 系统中规定, 必须尽可能快速地向用户提供诸如ATC等信息。而ATC受系统一系列物理和电气特性的约束条件的限制, 包括热稳定约束、电压幅值约束、电压稳定及其他一些安全约束条件。而这些约束条件在故障前后都是不能违背的, 因此ATC的计算通常要包括N-1故障条件下的计算, 可表示为:  $ATC = \min\{\text{热稳定, 电压幅值约束, 电压稳定约束, 等等}\}$ 。这样, ATC的计算时间成本变得非常高。

迄今为止, 已经有了很多计算ATC的方法。如, 连续潮流法<sup>[2~4]</sup>, 重复潮流法<sup>[5]</sup>, 神经网络法<sup>[6]</sup>, 最优潮流法<sup>[7,8]</sup>。然而, 这些方法的缺点是计算时间长, 因为需要考虑大量的故障情况, 不适合快速有效地获得ATC值。文献[9]提出了一种快速计算ATC近

似值的线性计算方法, 但是只考虑了线路热极限约束。

本文提出了一种快速、精确的计算 ATC 的快速计算方法。首先, 采用迭代线性潮流法<sup>[10]</sup> ILPF (Iterative Linear AC Power Flow) 对电网的 N-1 线路故障进行排序以筛选出热稳定和电压幅值约束条件下最严重的故障情况; 然后, 应用原始-对偶内点法对最严重故障情况进行 ATC 的计算。解决了 ATC 计算的耗时间问题。

## 1 ATC 计算的数学模型

### 1.1 数学模型

从数学意义上, ATC 等于总的传输能力 TTC (Total Transfer Capability) 减去输电可靠性裕度 TRM (Transmission Reliability Margin), 减去容量效益裕度 CBM (Capacity Benefit Margin), 再减去现有输电协议 ETC (Existing Transmission Commitments) 即:  $ATC = TTC - TRM - CBM - ETC$ 。其中 TRM 是为了确保当系统运行参数在合理范围内发生变化时, 整个系统能安全稳定的运行, 所预留的必要的输电能力; CBM 是指为了能够从其他互联系统中获取电力来满足发电可靠性需求而预留的输电容量裕度。为分析简明起见, 本文忽略了 CBM 和 TRM。这样, ATC 可表示为:  $ATC = TTC - ETC$ 。即指 ATC 可认为是从基态到最大传输处之间的距离, 这可归结为一个非线性规划问题<sup>[11, 12]</sup>。

因此, ATC 可归结为下面的优化问题:

$$\begin{aligned} & \text{Min}(-\lambda) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} f(x, \lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ G_{\min} \leq G(x) \leq G_{\max} \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

式中:  $\lambda \in R^1$  是反映 ATC 的参数;  $f(x, \lambda) = [f_1(x), \dots, f_m(x)]^T$  是扩展潮流方程;  $x \in R^n$  是状态控制变量;  $h(x) = [h_1(x), \dots, h_m(x)]^T$  是常规潮流方程;  $G(x) = [G_1(x), \dots, G_r(x)]^T$  为安全约束条件;  $y_d \in R^m$  为负荷变化方向, 分别设电源区域的发电机的出力总计及负荷区域的负荷总计分别为 1 个单位, 则可由下式决定:

$$\sum_{i \in \text{source}} y_{dPi} = \sum_{j \in \text{sink}} y_{dPj} = 1 \quad (2)$$

其中: *source* 为电源区域, *sink* 为负荷区域;  $y_{dPi}$  表示发电机集合的有功变化方向,  $y_{dPj}$  表示负荷集合的有功负荷变化方向。为了使负荷母线上的功率因数保持一致, 设各负荷的无功变化方向为:

$$y_{dQi} = Q_{0i}/P_{0i} \quad (i \in \text{sink}) \quad (3)$$

经过这样的处理,  $\lambda$  的值, 即问题 (1) 的解, 就直接代表 ATC。

本文由于只考虑电压和热稳定极限约束下的 ATC 的快速算法, 因此, ATC 的数学模型可表示为:

$$\begin{aligned} & \text{Min}(-\lambda) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} f(x, \lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri} \\ \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

式中:  $P_{Gi}, Q_{Ri}$  为母线  $i$  的有功和无功;  $V_i$  为母线电压幅值;  $P_{ij}$  为传输线路  $ij$  的有功功率。

### 1.2 原始-对偶内点法求解

内点法<sup>[13]</sup>是 Karmarkar (卡马卡) 于 1984 年提出的一种具有多项式时间的非线性规划算法。文献 [13, 14] 详细介绍了内点法的基本原理, 文献 [15, 16] 把内点法用于求解电力系统优化问题。近来对于求解非线性优化问题, 广泛采用了原始-对偶内点法 PDIPM (Primal-Dual Interior Point Method)。本文作者在文献 [17] 中应用原始-对偶内点法来求解上述非线性优化问题。本文将使用该方法来求解式 (3) 以求得  $\lambda$ 。由于篇幅所限, 本文不再赘述。

原始-对偶内点法的主要步骤为:

- 1) 引入松弛变量将不等式约束转化为等式约束;
- 2) 用拉格朗日方法将带约束的优化问题转化为无约束的优化问题;
- 3) 利用 KKT 条件得到一系列的非线性方程;
- 4) 利用牛顿法来求解上述的非线性方程。

但是, 如上所述, 在计算 ATC 时需要考虑网络的 N-1 故障, 因此, ATC 的计算变得很费时。基于此, 本文提出了一种基于故障过滤与排序基础上的 ATC 的快速算法。

## 2 基于 ILPF 算法的快速故障过滤与排序

本方法的关键就是运用故障过滤与排序技术对 N-1 故障进行排序, 确定出最严重的故障情况; 然后, 针对最严重的故障情况用 PDIPM 计算以得出 ATC 的值以节省时间成本。

ILPF 算法目的就是対线路故障的潮流问题提供一个快速和准确的近似, 以得到故障后系统的电

压和线路潮流,从而进行故障排序得到最严重的故障情况。

其方法如下:

节点  $i$  的注入有功无功表示为:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{j \in \alpha_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i \sum_{j \in \alpha_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (6)$$

式中:  $V_i$  为节点  $i$  的电压,  $V_j$  为节点  $j$  的电压;  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  为支路  $ij$  的电压相角差;  $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$  为节点导纳矩阵;  $\alpha_i$  指连接于节点  $i$  的支路。

$\sin \theta_{ij}, \cos \theta_{ij}$  的一阶 Taylor 级数展开式为:

$$\sin \theta_{ij} = \theta_{ij} - \theta_{ij}^3 / 6 \quad (7)$$

$$\cos \theta_{ij} = 1 - \theta_{ij}^2 / 2 \quad (8)$$

将式 (7), (8) 分别带入式 (5), (6), 并考虑到  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  可得:

$$V_i \sum_{j \in \alpha_i} V_j B_{ij} \theta_{ij} = P_i' + P_i'' \quad (9)$$

$$V_i B_{ii} + \sum_{j \in \eta_k} V_j B_{ij} = Q_i' + Q_i'' \quad (10)$$

式中:

$$P_i' = P_i - V_i^2 G_{ii} - V_i \sum_{j \in \alpha_i} V_j G_{ij} \quad (11)$$

$$P_i'' = V_i \sum_{j \in \alpha_i} V_j (G_{ij} \frac{\theta_{ij}^2}{2} - B_{ij} \frac{\theta_{ij}^3}{6}) \quad (12)$$

$$Q_i' = -Q_i / V_i - \sum_{j \in \mu_k} V_j B_{ij} \quad (13)$$

$$Q_i'' = \sum_{j \in \alpha_i} V_j (G_{ij} (\theta_{ij} - \theta_{ij}^3 / 6) + B_{ij} \theta_{ij}^2 / 2) \quad (14)$$

上式中:  $\eta_k$  指连接节点  $i$  的 PQ 节点;  $\mu_k$  指连接节点  $i$  的 PV 节点。

用矩阵表示为:

$$A \theta = P' + P'' \quad (15)$$

$$C V = Q' + Q'' \quad (16)$$

线路故障时:

线路  $ij$  的每一故障对矩阵  $A$  将产生如下四个变化:

$$\Delta a_{ii} = \Delta a_{jj} = -\Delta a_{ij} = -\Delta a_{ji} \quad (17)$$

用矩阵表示为:

$$A' = A + \Delta a_{ij} M_A M_A^T \quad (18)$$

式中:  $M_A$  为  $N \times 1$  矩阵, 且第  $i$  元素为 +1, 第  $j$  元素为 -1, 其余元素都为零。

因此对每一线路故障, 式 (15) 可变为:

$$(A + \Delta a_{ij} M_A M_A^T) (\theta + \Delta \theta) = P' + P'' \quad (19)$$

同理, 式 (16) 可表示为:

$$(C + \Delta c_{ij} M_C M_C^T) (V + \Delta V) = Q' + Q'' \quad (20)$$

结合式 (15), (16) 的结果, 并引入新的向量  $Z_A$  和  $Z_C$ , 式 (19), (20) 可简化为:

$$\Delta \theta = -(1 / \Delta a_{ij} + z_{Ai} - z_{Aj})^{-1} (\theta_i - \theta_j) Z_A \quad (21)$$

$$\Delta V = -(1 / \Delta c_{ij} + z_{Ci} - z_{Cj})^{-1} (V_i - V_j) Z_C \quad (22)$$

式中:  $Z_A = A^{-1} M_A$ ,  $Z_C = C^{-1} M_C$ ;  $z_{Ai}$  和  $z_{Aj}$  是  $Z_A$  的元素,  $z_{Ci}$  和  $z_{Cj}$  是  $Z_C$  的元素;  $\theta_i$  和  $\theta_j$  是  $\theta$  的元素, 式 (15) 的解;  $V_i$  和  $V_j$  是  $V$  的元素, 式 (16) 的解。

由上, 容易看出式 (15) 是关于  $\theta$  的线性问题, 容易得到其解, 而对每一线路故障的校正向量  $\Delta \theta$  可通过式 (21) 求得。对  $V$  和  $\Delta V$  同理可由式 (16) 和式 (21) 求得。

其迭代计算的主要步骤:

- 1) 初始化;
- 2) 计算  $\Delta \theta$ , 更新  $\theta$ ;
- 3) 用更新的  $\theta$  由式 (12) 计算  $P''$ , 由式 (15) 计算新的  $\theta$ ;
- 4) 重复 2), 3) 直到收敛;
- 5) 对  $\Delta V$  和  $V$  同理, 计算  $\Delta V$ , 更新  $V$ ;
- 6) 用更新的  $V$  和  $\theta$  由式 (13), (14) 计算  $Q'$ ,  $Q''$ , 由式 (16) 计算新的  $V$ ;
- 7) 对每一线路故障重复 2) ~ 6);

通过以上迭代计算, 可得到故障后的  $\theta$  和  $V$ ; 而由电压幅值  $V$  和相角  $\theta$  容易得到  $P_{ij}$ 。

为了针对热稳定和电压幅值约束的最严重故障进行排序, 本文构造了以下指标:

$$\text{热稳定的指标: } \sum_{(i,j) \in S_{line}} \frac{|P_{ij}^{(k)} - P_{ij}^{(0)}|}{(|P_{ij}^{(k)} - P_{ij}^{(0)}|)^m} \quad (23)$$

$$\text{电压幅值指标: } \sum_{i=1}^N \frac{|V_i^0 - V_i^{(k)}|}{(|V_i^0 - V_{i \min}^{(k)}|)^m} \quad (24)$$

式中:  $k$  为故障号;  $m$  是一个参数, 可通过对系统的一系列数值仿真测试得到, 本文其值取 4。对于以上两个指标而言, 数值越大则意味着故障越严重。

### 3 计算步骤

本方法的计算步骤为:

- 1) 用 PDIPM 计算式(4)得出故障前的 ATC  $\lambda_{pre}$ ;
- 2) 用 ILPF 算法对故障进行排序, 筛选出电压和热稳定约束条件下最严重的故障情况;
- 3) 用 PDIPM 针对最严重的故障情况计算式(4), 得出故障后的 ATC  $\lambda_{post}$ ;
- 4)  $ATC = \min(\lambda_{pre}, \lambda_{post})$ .

#### 4 数值仿真

本节通过对 IEEE 30 母线系统的仿真来验证本方法的性能。该系统中存在 37 个可能的支路故障。表 1 给出了在某些给定功率传输方向上的故障过滤结果, 表中列出了关于热稳定和电压幅值约束的最严重故障支路。

表 1 对一定传输方向上的最严重故障支路  
Tab.1 The severest contingency bus for different transfer directions

传输方向	热稳定	电压幅值
区域 1 (source: 节点 1, 2) 到区域 2 (sink: 节点 24, 26, 29)	支路 2	支路 30
区域 1 (source: 节点 1, 2) 到区域 3 (sink: 节点 19, 20, 21, 23, 24, 26)	支路 2	支路 30

表 2 给出了本方法在其传输方向上的 ATC 计算结果, 结果表明其值和不采用故障过滤的传统计算方法所计算的结果一样。同时分别给出了本方法和传统计算方法的执行时间(表中所示的区域 1 到区域 2), 表明本方法的执行时间相比传统计算方法要短得多。

表 2 对不同传输方向的 ATC  
Tab.2 ATC for different transfer directions (p.u.)

传输方向	$\lambda_{pre}$	$\lambda_{post}$	ATC 本方法	ATC 传统方法
区域 1 (source: 节点 1, 2) 到区域 2 (sink: 节点 24, 26, 29)	0.1146	0.0886	0.0886	0.0886
区域 1 (source: 节点 1, 2) 到区域 3 (sink: 节点 19, 20, 21, 23, 24, 26)	0.1330	0.0838	0.0838	0.0838

考虑热稳定和电压幅值约束的故障过滤执行时间:

$$T_{SCR} = 37 T_{SINGLE-SCR} = 37 \times 0.0324 = 1.199 \text{ s}$$

式中:  $T_{SINGLE-SCR}$  指 Matlab 程序执行一次故障过滤的时间 (Pentium 4, CPU: 1.72 GHz)。

本方法总的执行时间:

$$T_{pro} = 2T_{SINGLE} + T_{SCR} = 4.051$$

传统计算方法的执行时间:

$$T_{Conv} = 38T_{SINGLE} = 13.859$$

式中:  $T_{SINGLE}$  指 PDIPM 计算一次 ATC 的执行时间。

#### 5 结论

本文提出了一种基于线路故障的 ATC 快速计算方法, 该方法同时考虑了热稳定, 电压幅值约束条件下的 ATC 计算。运用了迭代线性交流潮流法来对线路故障进行过滤, 得到最严重的故障情况; 并用 PDIPM 来计算最严重故障情况下的 ATC 的值。相比传统计算方法, 本方法大大节约了计算时间, 其有效性通过了 IEEE 30 母线系统的验证。

#### 参考文献

- [1] Notice of Proposed Rulemaking(NOPR) (Docket RM95-8-000, Section III-E4f). Federal Energy Regulatory Commission[Z].1995.
- [2] Flueck A J, Chiang H D, Shah K S. Investigation the Installed Real Power Transfer Capability of a Large Scale Power System Under a Proposed Multi-area Interchange Schedule Using CPFLOW[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 883-888.
- [3] Ejebe G C, Tong J, Waight J G, et al. Available Transfer Capability Calculation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1521-1527.
- [4] 刘焕志. 基于连续潮流的输电网可用输电能力计算[J]. 电力自动化设备 2003, 23 (12): 5-9.  
LIU Huan-zhi. Available Transfer Capability Calculation Based on Continual Power Flow for Transmission Network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (12): 5-9.
- [5] Gravener M H, Nwankpa C. Available Transfer Capability and First Order sensitivity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 512-518.
- [6] Luo X, patton A D, Singh C. Real Power Transfer Capability Calculation Using Multi-layer Feed-Forward Neural Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 903-908.
- [7] Ou Y, Singh C. Assessment of Available Transfer Capability and Margins[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 463-468.
- [8] 丁晓莺, 王锡凡. 最优潮流在电力市场环境下的最新发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 1-7.  
DING Xiao-ying, WANG Xi-fan. The New Development of OPF in Power Market Environment[J]. Automation

- of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 1-7.
- [9] Ejebe G C, Waight J G, S-N M, et al. Fast Calculation of Linear Available Transfer Capability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 1112-1116.
- [10] Peterson N M, Tinney W M, Bree D W. Iterative Linear Power Flow Solution for Fast Approximate Outage Studies[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1972: 2048-2056.
- [11] 王良缘, 等. 电力市场中基于内点法的含暂态稳定约束的最大可用输电能力计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 28-33.  
WANG Liang-yuan, et al. Calculation of Available Transfer Capability(ATC) Taking into Account Transient Stability Constraints Based on Interior-Point Solution in Electricity Market[J]. Proceedings of the CUS-EPSSA, 2004, 16(1): 28-33.
- [12] 陈妍, 黄民翔. 基于信赖域内点法的静态 ATC 计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 71-74.  
CHEN Yan, HUANG Min-xiang. Static ATC Calculation Based on a Trust Region Interior-Point Method[J]. Proceedings of the CUS-EPSSA, 2005, 17(5): 71-74.
- [13] Karmarkar N K. A New Polynomial Time Algorithm for Linear Programming[J]. Combinatorica, 1984, (4): 373-395.
- [14] 赖炎连. 线性规划的 Karmarkar 方法[J]. 咸宁学院学报, 2004, 24(6): 1-3.  
LAI Yan-lian. Karmarkar Algorithm for Linear Programming[J]. Journal of Xianning College, 2004, 24(6): 1-3.
- [15] 赖炎连. 线性规划的 Karmarkar 方法(续)[J]. 咸宁学院学报, 2005, 25(3): 1-4.  
LAI Yan-lian. Karmarkar Algorithm for Linear Programming[J]. Journal of Xianning College, 2005, 25(3): 1-4.
- [16] 王良缘, 吴政球, 傅海燕, 等. 电力市场中基于内点法的含暂态稳定约束的最大可用输电能力计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 28-33.  
WANG Liang-yuan, WU Zheng-qiu, FU Hai-yan, et al. Calculation of Available Transfer Capability(ATC) Taking Into Account Transient Stability Constraints Based on Interior-Point Solution in Electricity Market[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2004, 16(1): 28-33.
- [17] 袁越, 久保川淳司, 佐佐木博司. 考虑暂态稳定约束的可用传输能力计算[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 34-39.  
YUAN Yue, Junji K, Hiroshi S. Available Transfer Capability Determination Considering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 34-39.
- [18] 李华强, 刘亚梅. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56-60.  
LI Hua-qiang, LIU Ya-mei. Voltage Stability Assessment for Saddle Node Bifurcation and Limit Induced Bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 56-60.

收稿日期: 2006-09-18; 修回日期: 2006-11-07

作者简介:

曾勇波(1978-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: bullfinch\_zeng@126.com

李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及优化问题研究;

范勇(1973-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题。

(上接第 31 页 continued from page 31)

- [6] 张尧, 宋文南, 贺家李. 临近电压稳定极限的潮流和静稳极限算法[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(5): 17-23.  
ZHANG Yao, SONG Wen-nan, HE Jia-li. An Algorithm for The Load Flow Solution Close to the Voltage Stability Limit and the Determination of Static Voltage Stability Limit[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(5): 17-23.
- [7] 张伯明, 陈寿孙, 等. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.  
ZHANG Bo-ming, SUN Shou-sou, et al. Advanced

Power Network Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.

收稿日期: 2006-11-03; 修回日期: 2006-12-06

作者简介:

付浩(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为调度自动化和计算机信息处理; E-mail: hefoly2000@163.com

周步祥(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向为调度自动化和配电网自动化;

陈实(1978-), 男, 硕士, 研究方向为调度自动化和继电保护。