

# 潮流预报在电网安全预警系统中的应用

郭 焯<sup>1</sup>, 吴文传<sup>1</sup>, 张伯明<sup>1</sup>, 孙素琴<sup>2</sup>

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084; 2. 河南电力调度通信中心, 河南省郑州市 450052)

**摘要:**潮流预报技术是实现电网预警预控的基础,结合某省级电网安全预警系统的实际研发经验,介绍了超短期和短期潮流预报在电网安全预警系统中的实现算法、技术特点和应用场合。结合实际应用情况,分析了超短期潮流预报和短期潮流预报算法的可靠性和精度,以及影响它们性能的关键因素。

**关键词:**潮流预报; 电网; 安全预警; 负荷预测

## 0 引言

现代电网规模庞大,运行机理复杂。为了及时发现电网安全隐患,提高电网运行水平,研究和开发电网安全预警系统<sup>[1-5]</sup>已成为主流趋势,安全预警系统可以将调度从传统的事故发生时报警向事故前预警的新模式转变。按时间尺度划分,大电网运行由检修计划、调度计划和实时调度与控制等环节组成,这些环节都需要进行安全校核和调控辅助决策,需要智能预警和预控<sup>[1]</sup>。潮流预报是电网安全预警系统中的重要基础功能。针对实际的应用场景,潮流预报可分为在线应用的超短期潮流预报和离线应用的短期潮流预报。超短期潮流预报基于实时态潮流模型和超短期负荷预测结果,预报出 15 min 后的潮流分布;而短期潮流预报则主要根据次日 96 个数据点的短期负荷预测结果、发电计划和前日相应数据点的潮流断面,并考虑检修计划的影响,对次日 96 个数据点的潮流分布进行预报。在电网安全预警系统中,潮流预报是实现事故前预警和超前进行安全分析的基础,具有十分重要的意义。

目前针对实时潮流预报模型的研究主要集中在动态状态估计领域<sup>[6-7]</sup>。动态状态估计通常用于处理系统负荷连续缓慢变化的情况,因其计算量过大,因此难以在线应用<sup>[8]</sup>。尽管后续的研究者提出了一系列改进措施<sup>[8-10]</sup>,但到目前为止,还没有动态状态估计实用化的相关报道。而对于离线潮流预报模型的研究,报道预报次日潮流分布的文献也不多。实际上,此前在调度中心投运的安全预警系统中,并没

有实用化的潮流预报模块,也没有真正意义上实现预报态的安全分析与校核。因此,研究潮流预报在电网安全预警系统中的应用方案是十分必要的。

## 1 潮流预报及其在安全预警中的地位

潮流预报的目的是根据当前潮流断面或某个特定的历史潮流断面,以及负荷预测结果和发电计划,预测未来时刻潮流断面。本文主要研究了预报 15 min 后潮流分布的超短期潮流预报和预报下一日 96 个数据点潮流分布的短期潮流预报。

一个全过程的电网安全预警系统的总体流程如图 1 所示。电网安全预警系统包括实时态和预报态的安全预警。其中,预报态包括 15 min 后的预测潮流、日前检修计划和周检修计划的典型断面,进行超短期和短期的潮流预报,并对潮流预报断面进行安全分析和计算。

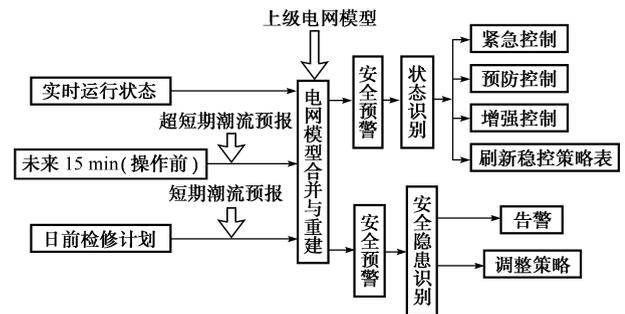


图 1 电网安全预警系统的总体流程  
Fig. 1 Overall flow chart for early warning system

超短期预报态的安全预警可以增强系统的预防控制能力,实现事故前预警,使调度员对未来可能出现的危险进行提前的准备和控制。短期潮流预报计算则主要应用于电网安全预警中的检修计划和日前发电计划安全校核模块,预报加载了日检修计划和发电计划的下一日 96 点的潮流分布,并进行安全分

收稿日期: 2009-11-11; 修回日期: 2009-12-16。  
国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217904);电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室自主研究课题资助项目(SKLD09M06)。

析与校核,以校核检修计划和发电计划的安全性和合理性。因此,潮流预报在整个安全预警系统中起到了连接实时态安全预警和预报态安全预警的桥梁作用,是预报态安全分析和预防控制决策的基础,也是实现真正意义上的事故前预警和超前控制的关键技术。

## 2 潮流预报的实现算法

### 2.1 超短期潮流预报

超短期潮流预报是对 15 min 后系统的潮流分布进行预报。电力系统的潮流分布由其节点导纳矩阵以及给定的注入功率和机端电压数值决定。超短期潮流预报中的系统节点导纳矩阵由在当前系统导纳矩阵的基础上加载 15 min 内的检修计划对导纳矩阵的影响确定。而对于注入功率和机端电压,为简化计算,15 min 后有如下假定:①同一区域内的所有负荷其功率的变化率相同;②所有负荷的功率因数不变;③作为 PV 节点的发电机,其机端电压不变。因此,节点的注入功率可由下式确定:

$$P_i' = P_i \frac{P_{\Sigma,j}'}{P_{\Sigma,j}} \quad (1)$$

$$Q_i' = Q_i \frac{P_{\Sigma,j}'}{P_{\Sigma,j}} \quad (2)$$

式中: $P_i'$ 和 $Q_i'$ 为发电机*i*或负荷*i*在 15 min 后预报态的注入功率; $P_i$ 和 $Q_i$ 为发电机*i*或负荷*i*当前的注入功率; $P_{\Sigma,j}$ 和 $P_{\Sigma,j}'$ 分别为区域*j*当前的和超短期负荷预测程序得到的总有功负荷,其中,负荷*i*或发电机*i*属于区域*j*。

可用当前潮流结果作为潮流预报计算的初值,在线超短期潮流预报的流程如图 2 所示。

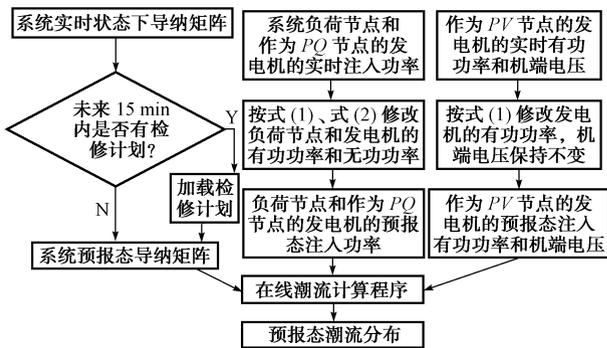


图 2 超短期潮流预报流程

Fig. 2 Flow chart of ultra-short term power flow forecasting algorithm

另外,由于实际运行中联络线功率与计划值比较接近,15 min 内潮流模型的变化又不大,因此在超短期潮流预报中不必对联络线功率进行调整。

### 2.2 短期潮流预报

对于短期潮流预报,利用相似日原理,本文采用预报时刻向前推 96 点的潮流断面作为预测基础。短期潮流预报计算中的节点导纳矩阵根据当前的节点导纳矩阵加载检修计划得到,发电机的有功出力根据发电日前计划确定,而发电机的机端电压和负荷功率则与超短期潮流预报相似。对同一区域作如下假定:①预测时刻的各负荷功率与前一个周期中对应时刻的负荷功率具有相同变化率;②预测时刻的负荷功率因数与前一个周期内对应时刻的功率因数相同;③作为 PV 节点的发电机预测时刻的机端电压与前一个周期对应时刻的机端电压相同。因此,负荷功率与机端电压可根据下式确定:

$$P_{i,k}' = P_{i,k} \frac{P_{j,k}'}{P_{j,k}} \quad (3)$$

$$Q_{i,k}' = Q_{i,k} \frac{P_{j,k}'}{P_{j,k}} \quad (4)$$

$$V_{i,k}' = V_{i,k} \quad (5)$$

式中:各变量的含义与式(1)、式(2)相似,下标*k*表示第*k*个数据点。

可将前一个周期相同数据点时潮流结果作为该数据点短期潮流预报计算的初值,有利于提高潮流收敛性。

此外,为了更加接近次日实际潮流分布,在短期潮流预报的计算结果中,得到预报态的潮流分布后,还需要对负荷节点功率进行调整,使最终得到的潮流分布中联络线功率等于计划值。对负荷节点功率的调整可通过灵敏度系数实现<sup>[11]</sup>,即

$$\Delta P_M = -D_{SM}^T (D_{SM} D_{SM}^T)^{-1} \Delta P_S \quad (6)$$

式中: $\Delta P_M$ 为所需要调节的负荷节点的功率调整向量; $\Delta P_S$ 为联络线有功功率与计划值的偏差向量; $D_{SM}$ 为所需调节的负荷节点的有功功率对联络线有功功率的灵敏度矩阵。

## 3 潮流预报的工程应用

### 3.1 含潮流预报的电网安全预警系统数据支持模块

本文提出的潮流预报算法是电网安全预警系统数据支持模块的重要部分。电网安全预警系统的数据支持模块可分为在线和离线 2 部分。其中预警系统的在线数据支持模块的数据流程如图 3 所示。在预警预控系统的在线功能中,调度中心通过状态估计可得到内网的实时态潮流模型;此外,为了更好地考虑外网对内网的影响,电网调度中心将定时地下发描述全网潮流模型的 E 文件,通过 E 文件接口程

序并剔除 E 文件中的内网部分即可得到在线的外网潮流模型。通过实时网络模型重建,即可得到边界上无差的实时态全网潮流模型<sup>[9]</sup>,并可通过安全分析程序对当前系统的安全性进行分析。而超短期潮流预报计算以内网实时态潮流模型为基础,预报 15 min 后的内网预报态潮流模型,并以同上的方法与外网在线潮流模型进行合并,得到预报态的全网潮流模型。对该潮流模型进行安全分析,即可对系统 15 min 后的安全性、可能出现的危险和应当采取的措施进行超前分析,从而大大增强了系统的安全性。

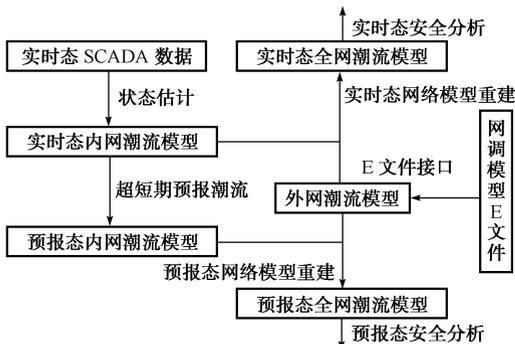


图 3 电网在线安全预警系统的实际数据流程  
Fig. 3 Data flow of online early warning system

短期潮流预报应用于安全预警系统的离线部分,并主要为日检修计划和调度计划校核服务。调度员根据加载了检修计划的 96 点短期潮流预报计算结果进行安全分析,保证下一日运行方式的合理性。目前,该日检修计划校核程序已成为该电网调度中心工作人员每日都会运行的重要辅助工具。由于次日的外网潮流数据较难获得,在得到短期潮流预报结果之后,安全分析仅考虑了内网模型,外网部分采用传统的挂接等值机的方式处理,等值机的出力 and 机端电压根据式(3)~式(5)给定。

### 3.2 潮流预报中不收敛问题的处理

潮流预报实际上是根据分区负荷预测结果、发电计划等有限的给定量,构造出的一个虚拟的潮流分布。与常规潮流计算相比,潮流预报的给定量远小于变量和方程数目,理论上存在无穷多组可行解。为了找到合理的可行解,笔者制定了式(1)~式(5)的一系列规则来确定与待求变量数目相等的已知量,将这一问题转化为常规潮流计算问题,并使用一般的潮流计算程序进行求解。然而实际情况千变万化,式(1)~式(5)的假设并不是在所有情况下都能与实际情况很好地吻合。因此在潮流预报的实际运行中,可能出现潮流不收敛的情形。

当潮流预报出现不收敛的情况时,可采用最优

乘子法来求解,即求解出电压的幅值和相角的修正量后,根据下式对节点电压的幅值和相角进行修正:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \mu \Delta \mathbf{x}^{(k)} \quad (7)$$

式中: $\mu$  为以下无约束优化问题的最优解,

$$\min_{\mu} \|\mathbf{f}(\mathbf{x}^{(k)} + \mu \Delta \mathbf{x}^{(k)})\|_2 \quad (8)$$

$\mathbf{f}$  为潮流方程; $\mathbf{x}$  为状态变量; $\mu$  为引入的乘子变量。

目前最优乘子法解病态潮流的技术已经较成熟,当潮流预报的给定量不合理导致潮流预报不收敛时,最优乘子法给出了与给定量相差较小的一个潮流分布。由于潮流预报计算中给定的负荷功率、发电机有功功率和机端电压本来就是基于一系列不可能严格满足的假设给出的,因此,通过最优乘子法得到的预报态潮流分布并不影响潮流预报结果的实用性。

### 3.3 影响潮流预报精度的重要因素

本文所介绍的潮流预报算法已于实际系统投入运行近 1 年。根据实际运行经验,潮流预报的精度主要受 3 个方面的影响:

1) 状态估计模型的准确性。无论是在线的超短期潮流预报,还是离线的短期潮流预报,其潮流模型都是以当前或历史的状态估计结果作为基础的。如果状态估计因维护不足等原因导致估计精度较低、估计结果不稳定时,将导致潮流预报结果不可信。在现场的潮流预报程序调试过程中,所出现潮流预报结果不可信的情况,大部分都是状态估计结果不准确导致的。

2) 负荷预测的精度。由上述潮流预报算法可以看出,超短期和短期潮流预报的预报算法都高度依赖于负荷预测结果,如果负荷预测结果不准确,必然将直接导致潮流预报结果的不准确。

3) 系统的运行状态,即式(1)~式(5)的一系列规则是否能够得到很好的满足。根据现场的实际运行经验,绝大部分时间内,能够较好地满足式(1)~式(5)的规则。

## 4 算例

本文所提出的潮流预报算法和实施方案已在某省级电网得到实际应用,自 2008 年 12 月起已投入运行约 11 个月。为说明本文算法的有效性,对现场的部分计算结果的收敛性和准确性进行了统计。

### 4.1 超短期潮流预报

为研究超短期潮流预报是否可靠收敛,统计了实际运行的系统从 2009 年 8 月 1 日至 8 月 4 日每分钟进行的超短期潮流预报计算的收敛情况如下:计算次数为 6 016 次;未加入病态潮流环节的收敛

次数为 6 007 次;未加入病态潮流环节的收敛率为 99.85%;加入病态潮流环节后的收敛次数为 6 016 次;加入病态潮流环节后的收敛率为 100%。

由此可知,超短期潮流预报能够可靠收敛,尤其是加入了潮流不收敛时用最优乘子法病态潮流程序求解的环节以后,尚未出现不收敛的情况。

为验证超短期潮流预报是否准确,以 15 min 为周期统计了实际运行的系统 2009 年 8 月 1 日全天的潮流预报结果和实际潮流分布。将潮流预报的计算结果与 15 min 后的实际潮流分布相比较,即可得到潮流预报的误差。另外,将 15 min 前后的实际潮流分布进行比较,即可得到 15 min 系统潮流分布的变化,即用当前潮流断面代替 15 min 后的潮流断面的误差。其中第  $k$  数据点潮流预报和实时潮流与 15 min 后的潮流相比,其潮流状态量的平均偏差  $\Delta x_k'$  和  $\Delta x_k$  定义如下:

$$\Delta x_k' = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{i,k}' - x_{i,k+1}|}{n} \quad (9)$$

$$\Delta x_k = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{i,k} - x_{i,k+1}|}{n} \quad (10)$$

式中: $x_{i,k}'$  和  $x_{i,k}$  分别为潮流预报结果和实际潮流中第  $k$  数据点节点  $i$  的电压幅值或相角,电压幅值取标幺值,相角单位为 rad; $n$  为节点数。

图 4 和图 5 显示了节点电压的幅值和相角的误差均值随数据点的变化曲线。由图可知,潮流预报与 15 min 后真实潮流分布的偏差保持较低水平,且远小于当前潮流分布与 15 min 后潮流分布的偏差,因此用潮流预报得到的潮流分布进行安全分析具有参考价值。

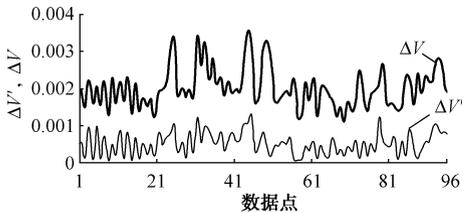


图 4 超短期潮流预报及实时潮流和 15 min 后实际潮流的节点电压幅值偏差均值

Fig. 4 Mean voltage error of ultra-short term power flow forecasting results and real power flow

潮流预报与 15 min 后实际潮流分布存在较大偏差的情况,其主要原因是潮流预报所基于的一系列假设并不总能得到很好的满足,例如:在系统进入早晨高峰时段,工业用电的负荷比例明显增加,会导致负荷的功率因数出现较大变化;另外,发电机的机

端电压在 15 min 内可能会根据系统运行状态有所调整,这些都是进行潮流预报计算时无法预估的,因此潮流预报的准确性会有所降低。在负荷变化较为平稳的时段,潮流预报的准确性就可以得到保证。

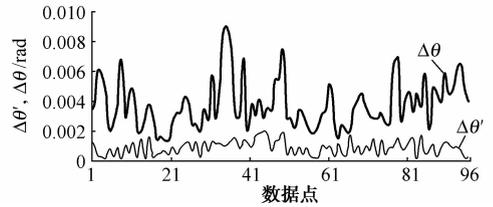


图 5 超短期潮流预报及实时潮流和 15 min 后实际潮流的节点电压相角偏差均值

Fig. 5 Mean angle error of ultra-short term power flow forecasting results and real power flow

## 4.2 短期潮流预报

为验证短期潮流预报的收敛性,对连续运行的短期潮流预报程序在 2009 年 7 月 27 日至 8 月 2 日之间共 7 天 672 个数据点的短期潮流预报计算结果进行了统计,未出现短期潮流预报不收敛的情形,说明短期潮流预报能够可靠收敛。

为验证短期潮流预报的准确性,记录了实际运行的系统 2009 年 8 月 1 日进行的 96 点短期潮流预报计算结果及实时潮流分布,并在 2009 年 8 月 2 日记录了 96 个数据点的实际潮流分布。将 2009 年 8 月 2 日的实际潮流分布分别与 2009 年 8 月 1 日的短期潮流预报结果及前一周期的实时潮流分布相比较,得到潮流预报以及前一周期潮流与下一日潮流的状态量偏差  $\Delta x_k'$  和  $\Delta x_k$ ,如图 6 和图 7 所示。

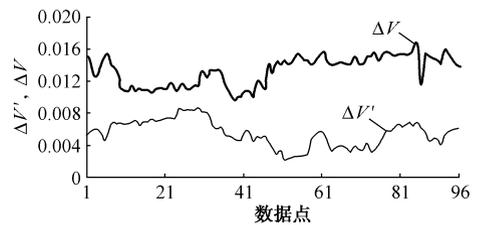


图 6 短期潮流预报及前一周期实时潮流与第 2 日实际潮流的节点电压幅值偏差均值

Fig. 6 Mean voltage error of daily power flow forecasting results and real power flow

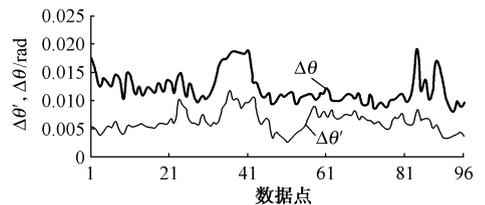


图 7 短期潮流预报及前一周期实时潮流与第 2 日实际潮流的节点电压相角偏差均值

Fig. 7 Mean angle error of daily power flow forecasting results and real power flow

由图 6、图 7 可知,两日之间相同数据点的潮流偏差要远大于短期潮流预报结果与次日实际潮流分布的偏差。因此,进行短期潮流预报并以其预报出的 96 点潮流分布为基础,进行检修计划的校核,比用前一周期的潮流分布进行校核更加可信,短期潮流预报是具有实用价值的。

### 参 考 文 献

[1] 张伯明,吴素农,蔡斌,等. 电网控制中心安全预警和决策支持系统设计. 电力系统自动化,2006,30(6):1-5.  
ZHANG Boming, WU Sunong, CAI Bin, et al. Design of an early warning and security countermeasure system for electric power control centers. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 1-5.

[2] 张伯明. 智能安全预警——美加停电事故对调度自动化的启示//电力系统安全及其战略防御高级学术研讨会,2004 年 4 月 12-14 日,北京.

[3] 李树广. 电网监控与预警系统的研制. 电网技术,2006,30(9): 77-82.  
LI Shuguang. Development of supervisory control and forewarning system for power grid. Power System Technology, 2006, 30(9): 77-82.

[4] 薛禹胜,费圣英,卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思: (一)新的挑战与反思. 电力系统自动化,2008,32(9):1-6.  
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part I new challenges and reflection. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 1-6.

[5] 薛禹胜,费圣英,卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思: (二)任务与展望. 电力系统自动化,2008,32(10):1-5.  
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part II tasks and prospects. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 1-5.

[6] DEBS A, LARSON R. A dynamic estimator for tracking the state of a power system. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(7): 1670-1678.

[7] MASIELLO R D, SCHWEPPE F C. A tracking static state estimator. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(8): 1025-1033.

[8] 张伯明,王世纓,相年德. 电力系统实时运行状态的估计和预报. 中国电机工程学报,1991,11(Suppl 1):68-74.  
ZHANG Boming, WANG Shiyong, XIANG Niande. Estimation and forecasting of real-time power system operation states. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(Suppl 1): 68-74.

[9] DA SILVA L A M, DO COUTTO F M B, CANTERA J M C. An efficient dynamic state estimation algorithm including bad data processing. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(4): 1050-1058.

[10] NISHIYA K, TAKAGI H, HASEGAWA J. Dynamic state estimation for electric power systems introduction of a trend factor and detection of innovation processes. Electrical Engineering in Japan, 1976, 96(5): 497-504.

[11] 蒋维勇,吴文传,张伯明,等. 在线安全预警系统中的网络模型重建. 电力系统自动化,2007,31(21):5-9.  
JIANG Weiyong, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Network model reconstruction in online security early warning system. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 5-9.

郭 焯(1988—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统状态估计. E-mail: y-guo04@ mails. tsinghua. edu. cn

吴文传(1973—),男,副教授,主要研究方向:调度自动化。

张伯明(1948—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统分析、电力系统稳定与控制。

## Power Flow Forecasting Method and Its Application in Early Warning and Security Countermeasure System

GUO Ye<sup>1</sup>, WU Wenchuan<sup>1</sup>, ZHANG Boming<sup>1</sup>, SUN Suqin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Henan Electric Power Dispatching Center, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Power flow forecasting is a fundamental function in early warning and security countermeasure system (EWSC) for power grid. The ultra-short term and daily power flow forecasting methods are both presented. The factors affecting robustness and accuracy of the results of these two methods are analyzed. Power flow forecasting software is introduced which has been imbedded in a EWSC system. The recorded results from a provincial power grid are given and the practicality of the proposed method is validated.

This work is jointly supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217094) and State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (No. SKLD09M06).

**Key words:** power flow forecasting; power grid; security early warning; load forecasting