

# 发电机励磁系统数学模型及参数对电网动态稳定性 分析结果影响的研究

石雪梅<sup>1</sup>, 汪志宏<sup>2</sup>, 桂国亮<sup>1</sup>, 戴中华<sup>1</sup>

(1. 安徽省电力科学研究院, 安徽 合肥 230022; 2. 中国人民解放军炮兵学院, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 针对发电机及其励磁系统的数学模型及参数对电网动态稳定分析结果的影响, 选取2007年安徽电网夏季高峰方式数据文件, 采用中国电科院版动态稳定仿真程序, 对影响电网动态稳定较大的几个因素分四种方案作了详细计算分析, 指出采用不同的发电机励磁系统模型及参数, 动态稳定分析结论差别较大, 其中实测模型参数最多的方案计算结果与实际运行工况基本接近, 且随着电网规模的扩大, 电网内发电机使用经典模型及经典参数会使动态稳定分析结果失真。

**关键词:** 发电机; 励磁模型; 动态稳定性

## Research on the influence of generators based on detailed excitation system models and parameters to power grid dynamic stability

SHI Xue-mei<sup>1</sup>, WANG Zhi-hong<sup>2</sup>, GUI Guo-liang<sup>1</sup>, DAI Shen-hua<sup>1</sup>

(1. Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China;

2. Artillery Academy of People's Liberation Army, Hefei 230022, China)

**Abstract:** The paper studies the influence of generators based on detailed excitation system models and parameters to power grid dynamic stability by the PSD-SSAP software published by CEPRI. This paper analyzes some main factors by four schemes, which engenders big error to system dynamic stability selecting 2007 Anhui power grid. The results show that the most one of the detail models and parameters leading to the conclusion is close to fact run condition. With the Grid scale spreads quickly, the classical models and parameters seem to bring result distortion.

**Key words:** generators; excitation system models; dynamic stability

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)21-0022-06

## 0 引言

随着电网建设的飞速发展, 稳定问题日益成为影响电网安全运行的主要问题, 如何加强电网稳定管理, 保障电网的安全运行是摆在电力工作者面前的一项紧迫的课题, 如何满足电网快速发展对电网稳定分析工作带来的更高要求, 是今后一段时期值得探讨的问题。发电机、励磁系统、调速系统、负荷等主要元件的数学模型及其参数是影响电网仿真计算结果的直接因素。采用经典的发电机模型、理想详细模型而套用经典参数或者采用同类调节器模型及参数等处理方法开展电力系统稳定计算已经很难适应现代发展中的大电网的要求。此外, 根据许多研究文献以及本文作者通过对具体电网的计算分析时发现, 采用简单模型分析得出的结论并非比运

行中的电网实际情况来得恶劣, 而近几年的国外电网发生的大面积停电事故给我们的启示也表明, 电压崩溃问题实际就是电网动态稳定问题, 而发电机的动态特性对系统电压稳定影响尤为突出。因此, 本文对发电机模型及参数对电网动态稳定性分析的影响作专门分析。

## 1 研究的边界条件

### 1.1 研究所用数据文件及仿真工具

计算数据以2007年安徽电网的网络结构为基础, 包含了华东四省一市电网数据。选取上半年年高峰方式为计算方式, 此方式下全省各主要断面潮流情况分别为(表1):

(1) 皖北断面: 由颍州至洛河 500 kV 洛颖 5306 线、邢集至张集变 220 kV 张邢 2746 线路、淮北二

厂至高湖 220 kV 国高 2723 (24) 双回线、蒙城至芦集 220 kV 芦蒙 2743 (48) 双回线组成, 稳定极限约 170 万 kW。

表 1 各断面功率交换一览表

Tab.1 The tab of each interface active power transfer

断面名称	交换功率/万 kW
淮南	450
皖北	170
过江	460
省际	240

(2) 过江断面: 由清流变至当涂开关站双回 500 kV 线路、肥西变至繁昌双回 500 kV 线路组成, 稳定极限约为 460 万 kW。

(3) 省际断面: 繁昌变至敬亭变 500 kV 线路稳定极限约为 240 万 kW (由华东电网网调确定)。

(4) 淮南大断面: 由洛河至肥西 500 kV 洛肥

5301 线、平圩至肥西 500 kV 平肥 5302、5312 线和洛河至滁州 500 kV 洛清 5309 线组成, 稳定极限约为 450 万 kW。

本文采用的计算仿真程序为中国电力科学研究院系统所版 PSD-BPA 程序, 其中潮流计算采用牛顿-拉普逊法, 暂态稳定计算采用隐式梯形积分法, 动态稳定计算采用隐式重启动 Arnold 算法。

1.2 动态稳定判据

- 强阻尼 阻尼比 > 0.04
- 中阻尼  $0.02 \leq \text{阻尼比} \leq 0.04$
- 弱阻尼  $0.0 \leq \text{阻尼比} \leq 0.02$
- 负阻尼 阻尼比  $\leq 0.0$

1.3 稳定计算研究用励磁系统数学模型和参数情况

为分析问题, 下面分三种方案对安徽电网展开动态稳定计算, 不同方案所采用的发电机模型及参数具体情况如表 2 所示。

表 2 不同方案稳定计算用励磁系统数学模型和参数情况

Tab.2 Excitation system models and parameters of dynamic stability analysis on different schemes

电厂名	机组号	容量/MW	励磁方式	方案 1	方案 2	方案 3
平圩	#1	600	三机常规励磁	实测	实测	实测
	#2	630	三机常规励磁	参考#1机	参考#1机	参考#1机
	#3	600		经典调节器经典参数	经典调节器经典参数	$E'_q$ 恒定
	#4	600		经典调节器经典参数	经典调节器经典参数	$E'_q$ 恒定
洛河	#1	320	三机常规励磁	参考#3机	参考#3机	与方案1同
	#2	320	三机常规励磁	参考#3机	参考#3机	参考#3机
	#3	300	三机常规励磁	实测	实测	实测
	#4	300	三机常规励磁	参考#3机	参考#3机	参考#3机
淮北厂	#1	50		EA 模型与参数	EA 模型与参数	EA 模型与参数
	#2	50		EA 模型与参数	EA 模型与参数	EA 模型与参数
	#3	137.5	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E'_q$ 恒定
	#4	137.5	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E'_q$ 恒定
	#5	200	三机常规励磁	参考#6机	参考#6机	参考#6机
	#6	200	三机常规励磁	实测	实测	实测
	#7	200	三机常规励磁	实测	实测	实测
	#8	210	机端励磁	实测	实测	实测
淮北二厂	#1	300	三机无刷励磁	参考#2机	参考#2机	参考#2机
	#2	300	三机无刷励磁	实测	实测	实测
田家庵	#1	120	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E'_q$ 恒定
	#2	120	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E'_q$ 恒定
	#3	137.5	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E'_q$ 恒定
	#4	137.5	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E'_q$ 恒定
	#5	300	三机无刷励磁	实测	实测	实测
	#6	300	三机无刷励磁	实测	实测	实测
铜陵	#1	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E'_q$ 恒定
	#2	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E'_q$ 恒定
	#3	300	三机常规励磁	实测	实测	实测
	#4	300	机端励磁	实测	实测	实测

续表 1

电厂名	机组号	容量/MW	励磁方式	方案 1	方案 2	方案 3
马二厂	#1	300	三机无刷励磁	实测	实测	实测
	#2	300	三机无刷励磁	实测	实测	实测
马二期	#3	300	三机无刷励磁	实测	实测	实测
	#4	300	三机无刷励磁	参考#3机	参考#3机	参考#3机
宿东	#1	15		EA模型与参数	EA模型与参数	EA模型与参数
	#2	25		EA模型与参数	EA模型与参数	EA模型与参数
	#3	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
	#4	135	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
琅琊山	#1	150		经典调节器经典参数	经典调节器经典参数	$E_q'$ 恒定
	#2	150		经典调节器经典参数	经典调节器经典参数	$E_q'$ 恒定
	#3	150		经典调节器经典参数	经典调节器经典参数	$E_q'$ 恒定
华六厂	#1	135	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
	#2	135	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
淮南煤矸石	#1	135		经典调节器经典参数	经典调节器经典参数	$E_q'$ 恒定
阜阳厂	#1	600	机端励磁	实测	实测	实测
	#2	600	机端励磁	实测	实测	实测
田集	#1	600		经典调节器经典参数	经典调节器经典参数	$E_q'$ 恒定
宿州	#1	600		经典调节器经典参数	经典调节器经典参数	$E_q'$ 恒定
合肥厂	#1	50		EA模型与参数	EA模型与参数	EA模型与参数
	#2	50		EA模型与参数	EA模型与参数	EA模型与参数
	#3	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
	#4	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
合二厂	#1	350	机端励磁	参考#2机	参考#2机	参考#2机
	#2	350	机端励磁	实测	实测	实测
安庆厂	#1	300	三机无刷励磁	实测	实测	实测
	#2	300	三机无刷励磁	实测	实测	实测
马鞍山	#11	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
	#12	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
芜湖	#11	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
	#12	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
	#13	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
	#14	125	三机常规励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
九华厂	#1	300	机端励磁	实测	实测	实测
	#2	300	机端励磁	实测	实测	实测
陈村	#1	50	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
	#2	50	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
	#3	50	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
	#4	50	机端励磁	同类调节器经典参数	理论模型及参数	$E_q'$ 恒定
响洪甸	#5	50		EA模型与参数	EA模型与参数	EA模型与参数
	#6	50		EA模型与参数	EA模型与参数	EA模型与参数

## 2 计算结果及其分析

### 2.1 就以上三种方案分别展开计算, 得出具体结果

如表 3 所示。

表 3 三种方案下小干扰分析计算结果

Tab.3 The result of small signal stability analysis in three ways

方案 I		方案 II		方案 III	
频率	阻尼比	频率	阻尼比	频率	阻尼比
0.728 6	-0.001 8	0.716 2	-0.011 9	0.726 9	-0.011 2
1.839 5	0.013 7	1.211 3	0.018	1.067	0.002 5
1.680 1	0.017 9	1.257 5	0.020 1	1.836 5	0.002 5
1.217 6	0.020 4	1.228 8	0.035 8	1.539 3	0.002 7
1.260 1	0.023 7	1.116 7	0.036 4	1.737 8	0.002 8
1.471 7	0.034 1	1.474 1	0.037 7	1.557 4	0.003 2
1.109 1	0.034 4	0.810 1	0.039 8	1.673 3	0.003 2
1.480 4	0.039 7	1.458 8	0.044	1.774 8	0.004
1.336 9	0.048 4	0.859 5	0.045 6	1.699 7	0.004 6
1.424 4	0.052 6	0.845 3	0.046 1	1.436 3	0.004 8
1.159 9	0.061 5	1.577 6	0.046 6	1.458 7	0.005 9
		1.338 3	0.049 7	1.640 3	0.005 9
		1.159 4	0.061 6	1.402 4	0.008 1
		0.983 9	0.061 7	1.214	0.010 4
				1.589 5	0.011 6
				1.278	0.014 4
				1.345 5	0.015 1
				1.361 3	0.022 4
				1.223	0.029 8
				1.470 9	0.030 3
				1.109 8	0.032 2
				1.160 8	0.059 9

不同方案下的频率变化图如图 1 所示。

从图 1 可以看出:

(1) 网内发电机大部分采用二阶恒定模型时, 计算分析得出的阻尼特性在弱阻尼区, 比较偏于恶劣, 但在强阻尼区, 其阻尼特性与采用详细模型计算的结果差别不大。

(2) 当网内除 20 台实测机组以外的其他机组采用 EA 经典模型以及同类调节器套用模型与参数时, 计算分析整体阻尼特性比方案 III 相比有明显改善。

(3) 当网内除 20 台实测机组以外的其他机组采用理想详细模型与参数以及 EA 经典模型时, 计算分析阻尼特性比方案 II 的结果更要乐观一些。

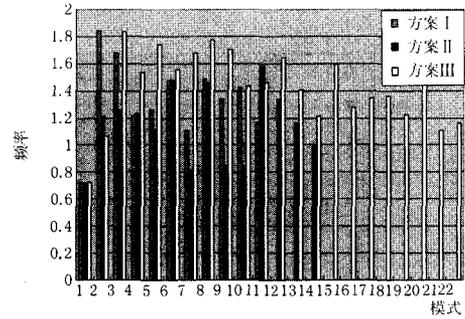


图 1 三种方案下的频率变化图对比

Fig.1 Frequency change comparison in three schemes

不同方案下的阻尼比对比如图 2 所示。

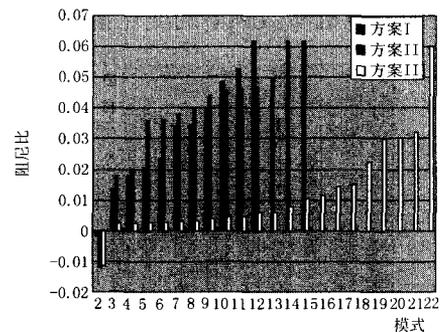


图 2 三种方案下的阻尼变化对比

Fig.2 Damp ratio change comparison in three schemes

分析主要原因如下:

(1) 如果网内大部分机组采用理论模型, 由于理论模型所设定的具体参数值未严格统一按照国家标准和行业标准取值, 而是根据运行经验估计模型参数, 实际生产中使用的发电机及励磁系统模型参数会因生产厂家的不同而取值有差别, 甚至有的参数指标不符合国家标准或者行业标准规定, 这可能导致动态分析结果中方案 I 比方案 II 乐观。

(2) 方案 II 中, 部分未实测发电机, 其励磁系统模型参数采用选取与其容量、型号、性能相近的实测的机组参数代替的方法, 与方案 I 相比在一定程度上减小了误差。从实际运行的经验表明, 方案 II 计算结果与其他方案计算结果相比更接近生产实际。

### 2.2 发电机参数的改变对计算结果的影响分析

本节采用方案 IV 与方案 I 进行对比计算, 方案 IV 设定如下:

方案 IV: 将网内发电机非实测模型的直轴暂态电抗、直轴开路时间常数、以及定子漏抗值修改至电力标准 SD264-88 约定参数范围之内, 其他条件与方案 I 同。

采用不同的发电机参数阻尼比变化情况如图 3

所示。

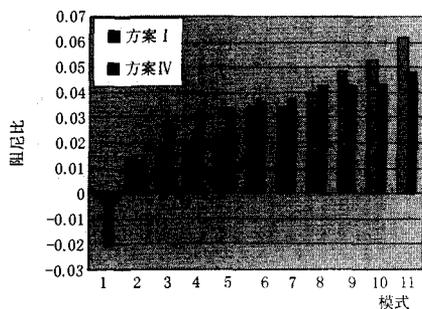


图3 采用不同的发电机参数阻尼比比较

Fig.3 Adopting difference genertors parameters damp ratio

采用不同的发电机参数频率的变化情况如图4。

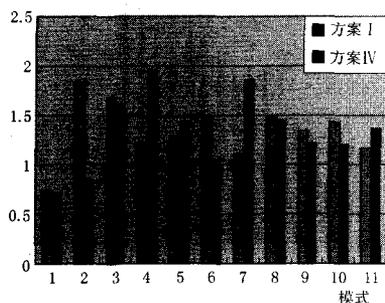


图4 采用不同的发电机参数频率变化比较

Fig.4 Adopting difference genertors parameters frequency change comparison

从图3、4可以看出：

采用不同的发电机参数对电网动态特性指标的影响也比较大，采用电力标准约定的发电机参数范围值时，整个电网的弱、中、强阻尼特性略有改善，区域间的负阻尼振荡特性更加明显。此类改变主要依赖于发电机原始参数的管理，原始出厂参数保存真实与否对计算结果影响非常可观。

### 3 结束语

本文以安徽实时网架为基础，分别就不同的计算条件，研究了发电机励磁系统模型差别以及发电机关键参数的差别对电网小扰动稳定分析结果的影响，得出结论如下：

(1) 当相同发电机采用不同的模型时，计算得出的动态稳定结果差别较大。

发电机及其励磁系统模型与参数是进行系统动态稳定分析的基础，故在数据文件中采用不同的模型与参数，则计算结果差别较大，且计算用模型及参数的准确性直接影响分析结论的准确性。

(2) 为了适应电网发展，解决电网安全、稳定

运行所面临的问题，需要进一步完善发电机励磁系统实测及建模工作。

我省容量在100 MW 及以上的发电机约68台，目前只完成了部分机组的实测及建模工作，故用于计算的模型及参数部分存在误差，因而电网动态稳定分析结论必定存在一定的偏差，从而降低了电网安全稳定运行决策依据的准确度。

(3) 加强电厂原始资料的管理非常重要。

从本文计算结果图3、图4来看，不同的发电机参数对电网动稳分析结果有一定的影响。而发电机参数完全依赖于出厂时由生产厂家向电厂提供，如电机参数，励磁调节器传递函数等相关资料保管不全，则会给建模工作带来一定困难，可能导致计算基础数据文件失真，从而直接影响分析结果的准确性。

(4) 随着电网规模的扩大，经典调节器经典参数模型已经不能适应动态稳定分析计算准确性的要求。

由图1、图2明显看出，对于一个有68台发电机的网络，方案III的计算结果与传统的研究成果结论并非相同，传统的研究结论认为发电机励磁系统采用经典调节器模型经典参数计算分析的结果会比采用详细模型来得保守，但从本文计算结果来看，在负阻尼振荡模式中，方案III计算阻尼比为-0.0112，而方案II计算阻尼比为-0.0119，方案III比方案II要略显乐观。

### 参考文献

- [1] DL/T 650—1998,大型汽轮发电机自并励静止励磁系统技术条件.电力行业标准[S].
- [2] 朱方,赵红光,刘增煌,等.大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J].中国电机工程学报,2007,17(1): 1-7. ZHU Fang, ZHAO Hong-guang, LIU Zeng-huang, et al.The Influence of Large Power Grid Interconnected on Power System Dynamic Stability[J] Proceedings of the CSEE, 2007,17(1): 1-7.
- [3] ZHU Fang, LIU Zeng-huang, ZHAO Hong-guang, et al. Design and Assessment of PSS with Sound Adaptability As System Expanded from Local to Nation-Wide Interconnection[J]. Proceedings of the World Engineers Convention,2004:257-262.
- [4] IEEE Std 421.4-2004,IEEE Guide for the Preparation of Excitation System Specifications[S].
- [5] DL/T 643—2003,大型汽轮发电机交流励磁机励磁系统技术条件.电力行业标准[S].
- [6] DL/T 583—1995,大型水轮发电机静止励磁系统及装

- 置技术条件. 电力行业标准[S].
- [7] 周双喜, 苏小林. 电力系统小干扰稳定性研究的新进展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (2): 1-8.  
ZHOU Shuang-xi, SU Xiao-lin Advance of Study on Small Disturbance Stability of Power System[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2007, 19 (2): 1-8.
- [8] 雷鸣, 张波, 马志波, 等. 山东电网小干扰稳定性研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2003, (1).  
LEI Ming, ZHANG Bo, MA Zhi-bo, et al. Study on Small-disturbance Stability of Shandong Electric Power System[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2003, (1).
- [9] 刘增煌, 朱方. 电力系统小干扰稳定性计算培训讲义[Z]. 中国电力科学研究院.
- [10] 汤涌, 张东霞, 朱方, 等. 东北电网大扰动试验仿真分析[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.
- [11] 赵红光, 刘增煌, 朱方, 等. 华中—川渝联网稳定计算用发电机励磁和调速系统的数学模型及参数[J]. 电网技术, 2007, 31 (5): 50-63.  
ZHAO Hong-guang, LIU Zeng-huang. Research on Mathematical Models and Parameters of Generator Excitation System and Governor System for Stability Analysis of Interconnection of Central China Power Grid with Sichuan-Chongqing Power Grid[J]. Power System Technology, 2007, 31 (5): 50-63.
- [12] 孙华东, 汤涌, 马世英. 电力系统稳定的定义与分类述评[J]. 电网技术, 2006, 30 (17): 35-39.  
SUN Hua-dong, TANG Yong, MA Shi-ying. A Commentary on Definition and Classification of Power System Stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 35-39.
- [13] GB/T 749.2-1997, 同步电机励磁系统电力系统研究用模型(中华人民共和国国家标准)[S].
- [14] 安徽电网二零零七-二零零八年度运行方式[Z].
- [15] 发电机励磁系统实测建模与应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 73-75.
- [16] PSD-SSAP 小干扰稳定程序用户手册 3.0 版[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.

收稿日期: 2007-06-03; 修回日期: 2007-08-07

作者简介:

石雪梅(1974-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电网稳定运行分析与电网规划工作; E-mail: xmepri@126.com

汪志宏(1974-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事数学理论教学与军事科研工作;

桂国亮(1978-), 男, 硕士, 工程师, 长期从事发电机励磁试验与建模工作。

(上接第 21 页 continued from page 21)

- [9] 娄素华, 吴耀武, 彭磊, 等. 量子进化算法在无功优化中的应用[J]. 继电器, 2005, 33 (18): 30-35.  
LOU Su-hua, WU Yao-wu, PENG Lei, et al. Application of Quantum Inspired Evolutionary Algorithm in Reactive Power Optimization[J]. Relay, 2005, 33 (18): 30-35.
- [10] Berg H C, Brown D A. Chemotaxis in Escherichia Coli Analyzed by Three-dimensional Tracking[J]. 1972, 239: 500-504.
- [11] Bremermann H J. Chemotaxis and Optimization [J]. J Franklin Inst, 1974, 297: 397-404.
- [12] Muller S D, Airaghi Marchetto S, Koumoutsakos P. Optimization Based on Bacterial Chemotaxis[J]. IEEE Transaction of Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 16-29.
- [13] 李威武, 王慧, 邹志君, 等. 基于细菌群体趋药性的函数优化方法[J]. 电路与系统学报, 2005, (2): 58-63.  
LI Wei-wu, WANG Hui, WU Zhi-jun, et al. Function Optimization Method Based on Colony Chemotaxis[J]. Circuits and Systems, 2005, (2): 58-63.

收稿日期: 2007-02-12; 修回日期: 2007-08-21

作者简介:

魏志连(1979-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化; E-mail: weizhilian@163.com

熊春友(1976-), 男, 硕士研究生, 从事无功优化、电力市场方面的研究;

黄伟(1962-), 男, 博士生, 副教授, 研究方向为电力系统规划和可靠性。