

# 电力系统功率频率动态特性研究

周海锋<sup>1</sup>, 倪腊琴<sup>2</sup>, 徐泰山<sup>1</sup>

(1. 国网电力科学研究院, 江苏省南京市 210003; 2. 华东电力调度中心, 上海市黄浦区 200002)

## Study on Power-Frequency Dynamic Characteristic of Power Grid

ZHOU Hai-feng<sup>1</sup>, NI La-qin<sup>2</sup>, XU Tai-shan<sup>1</sup>

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu Province, China;

2. East China Grid Dispatching Center, Huangpu District, Shanghai 200002, China)

**ABSTRACT:** Power-frequency characteristics of power grid are the base of the research on system operation modes, design of under-frequency load shedding and evaluation on various frequency and voltage regulation measures. Along with the enlargement of power grid scale, the power-frequency characteristics become complicated increasingly. Based on actual data of practical power grids and by use of numerical simulation, the dynamic power-frequency characteristics of power grid are researched, the space-time distribution features of power grid frequency and the factors impacting power-frequency characteristics are analyzed and the main factors that impact initial stage of frequency, dynamic process of frequency and steady-state value of frequency are given respectively.

**KEY WORDS:** power-frequency characteristic; power shortage; spinning reserve; load frequency coefficient; load model

**摘要:** 电力系统功率频率特性是研究系统运行方式、设计低频减载方案以及评价各种调频调压措施等工作的基础。随着电网规模的扩大, 电力系统功率频率特性日趋复杂。文中以实际电网数据为基础, 采用数值仿真法研究电网的功率频率动态特性, 分析了电网的频率时空分布特性以及功率频率特性的影响因素, 并分别给出了影响频率初始阶段、频率动态过程以及频率稳态值的主要因素。

**关键词:** 功率频率特性; 功率缺额; 旋转备用; 频率调节效应系数; 负荷模型

## 0 引言

频率是电力系统的重要参数, 也是衡量电能质量的主要指标之一<sup>[1]</sup>。当电力系统受到大机组跳闸、联络线跳线或者大容量负荷投切等扰动时, 由于系统有功功率平衡遭到破坏, 引起系统频率发生变化继而发生频率动态过程。当系统频率变化较大时,

将会给电力系统带来明显的不利影响, 甚至导致频率稳定破坏事故的发生。

低频减载<sup>[2-5]</sup>(under-frequency load shedding, UFLS)作为保障电网安全稳定运行3道防线<sup>[6]</sup>中的最后一道防线, 是防止电力系统发生频率崩溃的紧急控制措施。正确认识电力系统功率频率特性是研究系统运行方式、整定低频减载方案和评价各种调频调压措施等工作的基础。尽管互联系统的容量越来越大, 发生全局性频率崩溃的概率越来越小, 但一旦发生产果将更加严重。因此深入研究电力系统功率频率特性、分析影响系统功率频率特性的因素, 对电力系统的规划、运行及控制具有重要的理论和现实意义。

电力系统功率频率特性研究主要采用解析分析<sup>[7]</sup>和数值仿真<sup>[8-9]</sup>2种方法。解析分析法主要采用非均匀线性动态等值, 侧重对扰动后系统各区频率动态过程的空间分布现象及特点的分析。数值仿真法可以得到系统精确的受扰轨迹, 不仅有助于解释多机系统中功率频率特性的一般规律, 还能评价系统中负荷电压特性及各种控制措施对频率动态过程的影响, 但是数值仿真法对系统模型及参数选择的依赖性较大。

本文将在研究电力系统功率频率特性机理的基础上, 采用数值仿真法揭示电网的频率时空分布特性以及影响互联大电网功率频率特性的主要因素。

## 1 电力系统功率频率特性

### 1.1 基本概念

电力系统功率频率特性是指系统有功功率不平衡时频率的变化特性, 它是负荷频率特性、发电机频率特性以及电压影响的综合结果<sup>[10]</sup>。通常将其分为功率频率静态特性和功率频率动态特性, 分别描述有功功率变化之后频率的状态和变化过程。其

中功率频率静态特性是指稳态下系统的有功功率和频率的关系,主要取决于负荷和机组的功率频率静态特性;功率频率动态特性是指电力系统受扰动之后,系统由于有功功率平衡遭到破坏引起系统频率发生变化,频率从正常状态过渡到另一个稳定值所经历的时间过程。

## 1.2 频率时空分布特性

通常互联大电网发生有功缺额扰动之后,不仅不同地点频率变化的幅值不同,而且各地频率变化量达到最大值的时间也不同,使系统频率呈现出明显的时空分布特性。文献[11]对美国西部电网 WSCC 系统和东部电网 EUS 系统的研究表明,扰动后互联大电网不同频率观测点可以观测到不同的频率响应过程。频率的时空分布特性是互联大电网区别于简单网络分析结果的重要特性之一。

## 2 功率频率过程及影响因素分析

### 2.1 功率频率动态过程分析

电力系统发生有功缺额时,系统频率的变化涉及输电网络结构、发电机运动方程及其参数、调速器模型及旋转备用<sup>[12-14]</sup>、励磁调节模型和负荷模型<sup>[15-16]</sup>。发生有功缺额故障后,系统原有的有功平衡状态被打破,各发电机组将按其同步功率分担发电缺额,并释放转子储存的部分惯性动能。转子动能的消耗将使机组转速下降,系统频率降低。系统频率偏离额定值时,负荷吸收的有功功率随之变化。机组自动调节装置检测到转速改变而动作,各机组将按调速系统的调差系数重新分配负荷,最后由系统的调频机组增加出力使频率恢复到额定值。在整个过程中,各机组的转速因各自初始承担的负荷不同、惯性不同、调速器的调节特性不同,各机组承担着不同的负荷功率分配比例。

影响系统功率频率过程的因素主要集中在故障扰动地点、发电机组模型及其参数、调速器调节特性、旋转备用容量及其分布和负荷特性等几个因素上。

### 2.2 功率频率特性影响因素分析

有功缺额扰动发生在不同地点时,将会改变电网的运行方式。运行方式的改变影响系统潮流分布,尤其是无功的变化会导致负荷点电压的改变,而电压的变化又会通过负荷的电压特性影响负荷吸收的有功功率,从而影响系统的功率频率特性。

机组模型中对功率频率特性影响较大的参数是机组的惯性时间常数,其物理意义是发电机空载

时,在转子上加额定转矩,转子从静止状态到达其额定转速的所需时间。因此增大机组惯性时间常数,将降低频率变化的速率,延迟频率达到极值的时间,使振荡周期变长。减少惯性时间常数将对功率频率动态过程起相反作用。

旋转备用对于即时抵偿由于随机事件,如短时间的负荷波动、日负荷曲线的预测误差和发电机组因偶然事件退出运行等引起的功率缺额有很大帮助,其容量和分布对功率频率特性的影响非常大。

各机组旋转备用需要机组的调速系统参与发挥作用,调速系统的调差系数对于系统的功率频率过程有重要影响,它直接影响机组在转速发生变化时有功功率调节能力。调差系数大,一次调频能力差,频率变化时对应有功功率变化小。

反映负荷频率调节能力的主要参数是负荷频率调节效应系数,其数值与系统中各类负荷所占的比例有关,不同电力系统或同一电力系统在不同时刻该系数可能不同。当系统发生功率缺额时,负荷的调节效应可减少有功功率的不平衡程度。

## 3 仿真分析

### 3.1 系统及参数

以某互联电网为研究对象,该系统内共有 1000 多条母线、140 多台发电机组,总有功出力为 19201.5 MW,无功出力为 7215.5 Mvar,有功负荷为 18653.4 MW,无功负荷为 7863.3 Mvar。系统负荷模型采用一定比例感应电动机负荷和多项式静态负荷组成综合负荷模型。

### 3.2 频率时空分布特性仿真

以该电网某电厂有功脱落 100 MW 为扰动故障(占全网发电量的 0.52%),故障后各观测点频率动态过程如图 1 所示。

由图 1 可见,大电网发生有功功率缺额时,系统不同频率观测点的频率动态过程存在明显差异。其中距故障扰动点越近频率变化越剧烈,初始频率跌落越快;距故障点越远频率波动越平稳,初始频

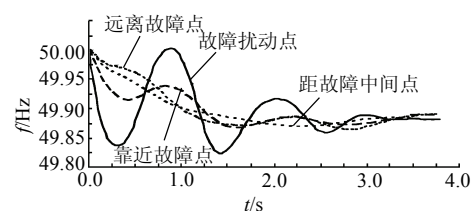


图 1 有功脱落 100 MW 后各观测母线的频率响应曲线  
Fig. 1 Bus frequencies response curve when 100 MW active power tripped from generator

率跌落相对缓慢。

一般来说,大电网系统功率频率动态过程中前几秒各观测点频率变化相差较大,从而使电网的频率动态过程呈现出明显的时空分布特性。对实际电网而言,可能会造成其各地低频减载装置之间动作不一致,降低其减载效果甚至产生不利影响。

### 3.3 影响功率频率特性因素仿真

#### 1) 扰动地点对功率频率特性的影响。

以该电网不同区域 A、B、C 3 台火电机组有功各脱落 300MW 为扰动故障,分别在送端和受端各取一频率观测点,故障后系统的频率动态过程见图 2。

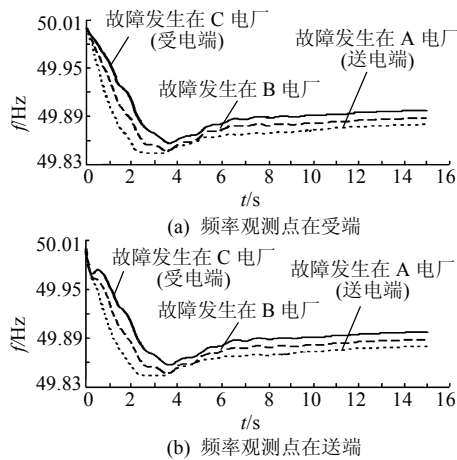


图 2 不同地点相同容量有功缺额下的频率响应曲线  
Fig. 2 Frequency response curves with same capacity active power from different factories

由图 2 可知,不同地点发生相同容量有功脱落,系统频率动态过程差别较大。当有功缺额故障发生在受电端时,频率响应曲线整体上移,动态过程中频率跌落较少,稳态时频率恢复值较高;有功缺额故障发生在送电端时则相反。

原因在于:受端发电有功减少会引起受端母线电压下降,考虑负荷电压特性,则负荷减少,因此与送端发电有功减少相比,频率下降较小。

#### 2) 惯性时间常数对功率频率特性的影响。

改变发电机组惯性时间常数得到系统频率动态过程如图 3 所示(以某电厂有功脱落 800 MW 为扰动故障,下同)。

由图 3 可知,增大惯性时间常数,动态过程中频率跌落减少、频率最低值增大,频率跌落到最低值所需时间增加,振荡周期减小,但惯性时间常数对频率最终稳态值没有影响。

#### 3) 调速系统对功率频率特性的影响。

改变调速系统调差系数可得系统频率动态过程如图 4 所示。

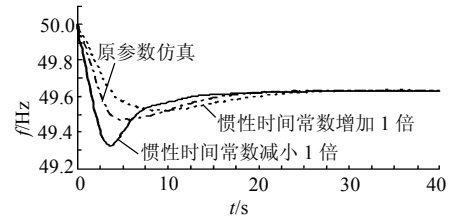


图 3 不同惯性时间常数下系统的频率响应曲线  
Fig. 3 Frequency response curves with different inertia time coefficient

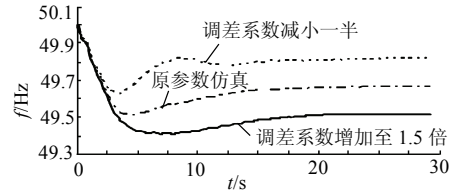


图 4 不同调差系数下系统的频率响应曲线  
Fig. 4 Frequency response curves with different speed drop coefficient change

由图 4 可知,增大调差系数,频率动态轨迹整体下移,动态过程中,频率跌落增大,频率跌落到最小值所需时间增加,频率回升幅度减小;稳态时频率恢复值减小。

4) 原动机高中低压缸比例对功率频率特性的影响。

改变原动机的高、中、低压缸比例得到系统频率动态过程如图 5 所示。

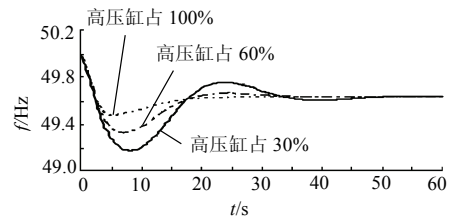


图 5 不同高中低压缸比例下系统的频率响应曲线  
Fig. 5 Frequency response curves with percentage of FH/FM/FL change

由图 5 可知,原动机高中低压缸比例对大电网的功率频率动态特性影响较大。增加高压缸比例时,动态过程中频率跌落减少、频率跌落到最低值所需时间减少,频率回升幅度减小;稳态时频率恢复值没有变化。

#### 5) 旋转备用对功率频率特性的影响。

调整系统旋转备用容量及其分布可得系统频率动态过程如图 6 所示。

由图 6 可知,旋转备用分布相对均衡时,动态过程中,频率回升上冲、回升幅度增大;稳态时频率恢复值较高。增加旋转备用容量时,动态过程中,频率跌落减少、最低值增加,频率恢复时间明显减少;稳态时频率恢复值增大。

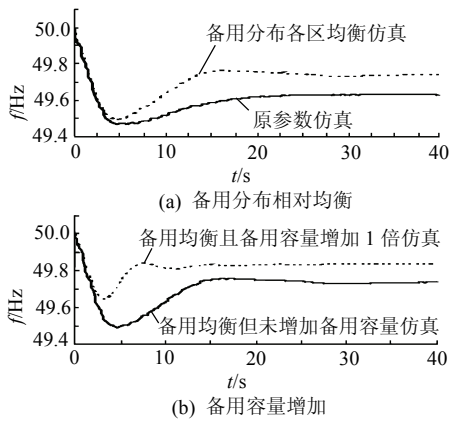


图6 不同旋转备用容量及分布下的频率响应曲线  
Fig. 6 Frequency response curves with various spinning reserve capacity and distribution change

6) 负荷模型对功率频率特性的影响。

调整综合负荷模型中静态负荷电压特性系数ZIP、动态负荷比例、负荷有功频率因子和无功频率因子，仿真可得系统频率动态过程如图7所示。

由图7可知，增大有功频率因子，动态过程中

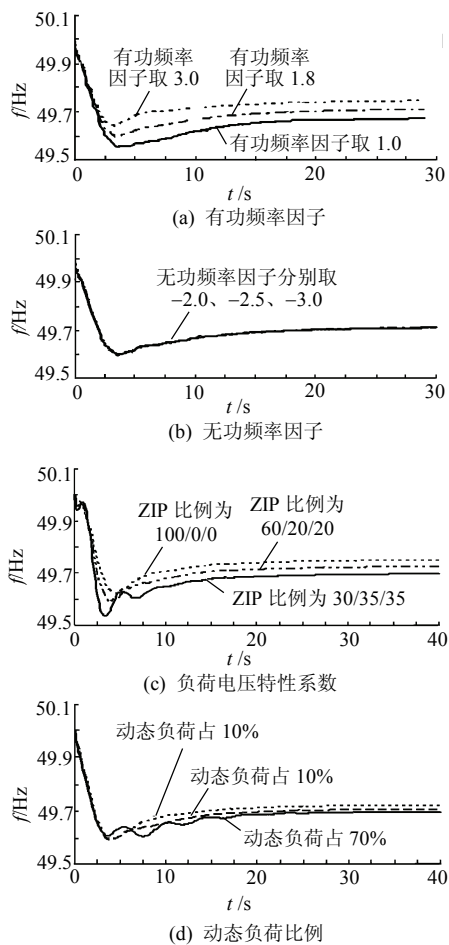


图7 不同负荷模型下系统的频率响应曲线  
Fig. 7 Frequency response curves with various loads model

频率跌落减少，频率跌落到最低值所需时间缩短，频率回升幅值增加，但频率初始下降率不变；稳态时频率恢复值增大。改变无功频率因子时，系统频率动态过程和最终稳态值基本没有差别，可见其对功率频率特性影响很小。增加恒阻抗负荷比例时，动态过程中，频率下降率减少，频率最低值增大，频率回升加快、回升幅度增加，稳态时频率恢复值增大。增加动态负荷比例时，动态过程中，频率跌落增加，频率最低值减小；稳态时频率恢复值减小。

4 结论

1) 采用数值仿真手段模拟了电网受有功缺额扰动后的功率频率动态过程，揭示了互联大电网的频率时空分布特性。

2) 故障扰动点及扰动量和负荷电压特性系数影响频率初始阶段、频率动态过程以及频率稳态值。机组调差系数、旋转备用容量及其分布、负荷有功频率因子和动态负荷比例主要影响频率回升幅度及频率稳态值。原动机高、中、低压缸比例系数影响频率初始阶段和频率动态过程，负荷无功频率因子对功率频率特性的影响相对较小。

参考文献

- [1] 蔡邠. 电力系统频率[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 1999: 21-49.
- [2] 杨博, 解大, 陈陈, 等. 电力系统低频减载的现状和应用[J]. 华东电力, 2002(9): 14-18.  
Yang Bo, Xie Da, Chen Chen, et al. Current status of under-frequency load shedding in power system and its application[J]. East China Electric Power, 2002(9): 14-18(in Chinese).
- [3] 王葵, 潘贞存. 一种新型低频减载方案的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 31-33.  
Wang Kui, Pan Zhencun. A new load shedding scheme for limiting under frequency[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 31-33(in Chinese).
- [4] Xiong X, Li W. A new under-frequency load shedding scheme considering load frequency characteristic[C]. International Conference on Power System Technology, 2006.
- [5] Terzija V V. Adaptive under frequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1260-1266.
- [6] 袁季修. 试论防止电力系统大面积停电的紧急控制—电力系统安全稳定运行的第三道防线[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 1-2.  
Yuan Jixiu. Emergency control for preventing widespread blackout of power system the third line of defense[J]. Power System Technology, 1999, 23(4): 1-2(in Chinese).
- [7] 韩英铎. 电力系统的中期稳定性及其非均匀线动态等值研究(I)(II)[J]. 清华大学学报, 1989, 29(4): 1-10.  
Han Yingduo. Mid-term stability of electrical power systems and the investigation with the aid of equivalent non-uniform line

- (I)(II)[J]. Journal of Tsinghua University, 1989, 29(4): 1-10(in Chinese).
- [8] 韩英铎, 闵勇, 洪绍斌, 等. 复杂扩展式电力系统功率频率动态过程分析[J]. 电力系统自动化, 1992, 16(1): 28-33.  
Han Yingduo, Min Yong, Hong Shaobin, et al. Analysis of power-frequency dynamics in large scale multi-machine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1992, 16(1): 28-33(in Chinese).
- [9] 刘洪波, 穆钢, 徐兴伟, 等. 使功频过程仿真轨迹逼近实测轨迹的模型参数调整[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 20-24.  
Liu Hongbo, Mu gang, Xu Xingwei, et al. Model parameter regulation to make simulated trajectory of power-frequency process draw near measured trajectory based on trajectory sensitivity[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 20-24(in Chinese).
- [10] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995: 223-229.
- [11] Tsai S J S, Zhang L, Phadke A G, et al. Study of global frequency dynamic behavior of large power systems[C]. IEEE Power Systems Conference and Exposition, 2004.
- [12] 朱方, 汤涌, 张东霞, 等. 发电机励磁和调速器模型参数对东北电网大扰动试验仿真计算的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 69-74.  
Zhu Fang, Tang Yong, Zhang Dongxia, et al. Influence of excitation and governor model parameters on simulation of large-disturbance test in Northeast China power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 69-74(in Chinese).
- [13] 于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计[J]. 中国电机工

程学报, 2004, 24(3): 72-76.

- Yu Daren, Guo Yufeng. The online estimate of prime frequency control ability in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 72-76(in Chinese).
- [14] Wu C C, Chen N. Online methodology to determine reasonable spinning reserve requirement for isolated power systems[J]. IEE Proc Gener Transm Distrib, 2003, 150(4): 455-461.
- [15] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水力电力出版社, 1995: 2-13.
- [16] 张红斌, 汤涌, 张东霞, 等. 负荷建模技术的研究现状与未来发展方向[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 6-10.  
Zhang Hongbin, Tang Yong, Zhang Dongxia, et al. Present situation and prospect of load modeling technique[J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 6-10(in Chinese).



周海锋

收稿日期: 2008-12-10.

作者简介:

周海锋(1983—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制, E-mail: zhouhaifeng@nari-china.com;

倪腊琴(1973—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

徐泰山(1968—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(责任编辑 王晔)

(上接第 57 页 continued from page 57)

- [8] 窦春霞. 基于观测器的仿射型多机耦合电力系统  $H_\infty$  模糊跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2004, 19(3): 31-35,45.  
Dou Chunxia.  $H_\infty$  fuzzy tracking control for the affine multi-machine interconnected power system based on observers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(3): 31-35,45(in Chinese).
- [9] 吴复立, 蔡犹崑, 余贻鑫. 电力系统概率的静态和动态安全性估计[J]. 中国电机工程学报, 1988, 8(3): 1-11.  
Wu Fuli, Cai Youkun, Yu Yixin. Probabilistic steady-state and dynamic security assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 1988, 8(3): 1-11(in Chinese).
- [10] 陈晓刚, 孙可, 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138-144.  
Chen Xiaogang, Sun Ke, Cao Yijia. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 138-144(in Chinese).
- [11] 桂小阳, 梅生伟, 卢强. 多机系统水轮机调速器鲁棒非线性协调控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 29-33.  
Gui Xiaoyang, Mei Shengwei, Lu Qiang. Nonlinear coordinated robust governor control of hydro-turbine generator sets in multi-machine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 29-33(in Chinese).
- [12] Xi Z R, Cheng D Z, Lu Q, et al. Nonlinear decentralized controller design for multimachine power systems using Hamiltonian function method[J]. Automatica, 2002, (38): 527-534.
- [13] Jiang L, Wu Q H, Wang J, et al. Robust observer-based nonlinear control for multimachine power systems[J]. IEE Proc Generation, Transmission & Distribution, 2001, 148(6): 623-631.

- [14] 王银河, 戴冠中. 一类不确定线性系统的鲁棒线性控制器设计[J]. 控制与决策, 2001, 16(5): 605-608.  
Wang Yinghe, Dai Guanzhong. Design of robust linear controllers for linear systems with uncertainties[J]. Control and Decision, 2001, 16(5): 605-608(in Chinese).
- [15] Xie S, Xie L, Wang Y, et al. Decentralised control of multimachine power systems with guaranteed performance[J]. IEE Proc Control Theory Appl, 2000, 147(3): 355-365.
- [16] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 129-143.
- [17] Marcus M, Minc H. A survey of matrix theorem and matrix inequalities[M]. Boston: Allyn and Bacon, 1964: 121-133.
- [18] Chapman J W, Ilic M D, King C A, et al. Stabilizing a power system via decentralized feedback linearizing excitation control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8: 830-838.



郑方圆

收稿日期: 2008-12-22.

作者简介:

郑方圆(1983—), 女, 硕士研究生, 主要从事复杂电力系统稳定控制方面的研究, E-mail: ra\_je@126.com;

王杰(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自适应控制、复杂多机电力系统的控制和稳定性分析;

袁林玉(1978—), 女, 硕士研究生, 主要从事电网稳定控制、HVDC 系统控制方面的研究。

(责任编辑 王晔)