

# 用特征值灵敏度法分析系统参数对小干扰稳定性的影响

林昭华<sup>1</sup>, 胡金磊<sup>2</sup>, 王克文<sup>3</sup>

(1. 广东电网公司潮州供电局, 广东 潮州 521000; 2 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;  
3 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 电力系统小干扰分析中, 特征值对参数的灵敏度定量地提供了参数影响的程度和趋势。该文以某电网的典型运行方式为基础, 根据特征值对任意运行参数 (如 PQ 节点功率、PV 节点电压) 和网络参数 (如线路阻抗、变压器分接头) 的灵敏度, 分析了各个系统参数对电网小干扰稳定性的影响。依据分析结果, 可以通过调整系统参数来改善系统的小干扰稳定性。

关键词: 特征值; 灵敏度; 系统参数; 小干扰稳定性

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)09-0016-05

## 0 引言

特征值分析已经广泛应用于电力系统小干扰稳定性研究。特征值灵敏度定量地提供了参数影响的程度和趋势, 并为改善系统稳定性提供指导。特征值对控制器参数 (如增益, 时间常数等) 的灵敏度已大量应用于控制器设置<sup>[1,2]</sup>。文献 [3]、[4] 给出了特征值对系统参数灵敏度的解析表达。以插入式建模技术 (PMT)<sup>[5]</sup> 为基础, 文献 [6] 系统地描述了特征值对任意电力系统参数的一、二阶灵敏度表达。

当考虑更多的运行参数 (包括 PQ 节点功率, PV 节点电压等) 和网络参数 (例如线路阻抗、变压器分接头等) 时, 利用特征值灵敏度可以进行更广泛的参数影响分析。文献 [6] 以此对一 8 机 24 节点算例进行了较为细致的分析。

本文以某实际电网的典型运行方式为基础, 根据特征值表达, 分析运行参数和网络参数的变化对电力系统机电振荡模式的影响, 为改善措施的确定提供依据。

## 1 特征值灵敏度

由于在形成系统状态空间方程时具体表达上的差异, 灵敏度的表达形式也不尽一致。本文采用文献 [5] 中的插入式建模技术 (PMT) 来形成系统状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BR + ER \\ Y = CX + DR \end{cases} \quad (1)$$

系统的特征值从系数矩阵计算确定。各系数矩阵的详细表达及形成过程见文献 [5]。

第  $k$  个特征值  $\lambda_k = \alpha_k \pm j\beta_k$ , 对第  $i$  个参数  $K_i$  的一阶灵敏度可表达为<sup>[3]</sup>

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial K_i} = W_k^T \frac{\partial A}{\partial K_i} U_k \quad (2)$$

式中:  $W_k$  和  $U_k$  分别为第  $k$  个特征值的左、右特征向量, 且已标准化, 即  $W_k^T U_k = 1$ 。由此可以系统化地计算所有特征值对任意参数的灵敏度。

电力系统的稳态运行方式可以完整地用节点电压列向量  $V$  和节点导纳矩阵  $Y$  描述, 而系统的状态矩阵  $A$  可以表达为  $V$  和  $Y$  的函数

$$A = f(V, Y) \quad (3)$$

以  $V$  和  $Y$  为中间变量, 第  $k$  个特征值对任意的第  $i$  个参数  $K_i$  的灵敏度可表示为<sup>[6]</sup>

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial K_i} = \sum_{m=1}^{2N} \frac{\partial \lambda_k}{\partial V_m} \frac{\partial V_m}{\partial K_i} + \sum_{m=1}^{2N^2} \frac{\partial \lambda_k}{\partial Y_m} \frac{\partial Y_m}{\partial K_i} \quad (4)$$

式中:  $N$  为网络节点数。  $V_m$  为节点电压列向量  $V = [V_1, V_2, \dots, V_{2N}]^T$  中的第  $m$  个元素;  $Y_m$  为节点导纳矩阵  $Y$  中的元素。

为方便起见, 节点功率平衡表达式可表示为

$$S_{LV} = S_{YV} \quad (5)$$

式中: 左边为节点功率注入列向量, 可计及负荷特性; 右边即常规的由  $V$  和  $Y$  描述的节点功率表达,

$$\text{即 } S_{YV} = V_i \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j^*$$

用 (5) 式对参数  $K_i$  求导、整理, 可得节点电压对运行参数  $K_i$  的灵敏度表达式为<sup>[6]</sup>

$$\frac{\partial V}{\partial K_i} = - (J_L - J_0)^{-1} \frac{\partial S_{LV}}{\partial K_i} \quad (6)$$

式中:  $J_0$ 、 $J_L$  分别为  $S_{YV}$  和  $S_{LV}$  的雅可比矩阵。而节点电压对网络参数  $K_i$  的灵敏度计算公式为<sup>[6]</sup>

$$\frac{\partial V}{\partial K_i} = J_0^{-1} \frac{\partial S_{IV}}{\partial K_i} \quad (7)$$

## 2 小干扰稳定性分析

### 2.1 电网概述

整个电网在典型运行方式下共有 458 个节点,

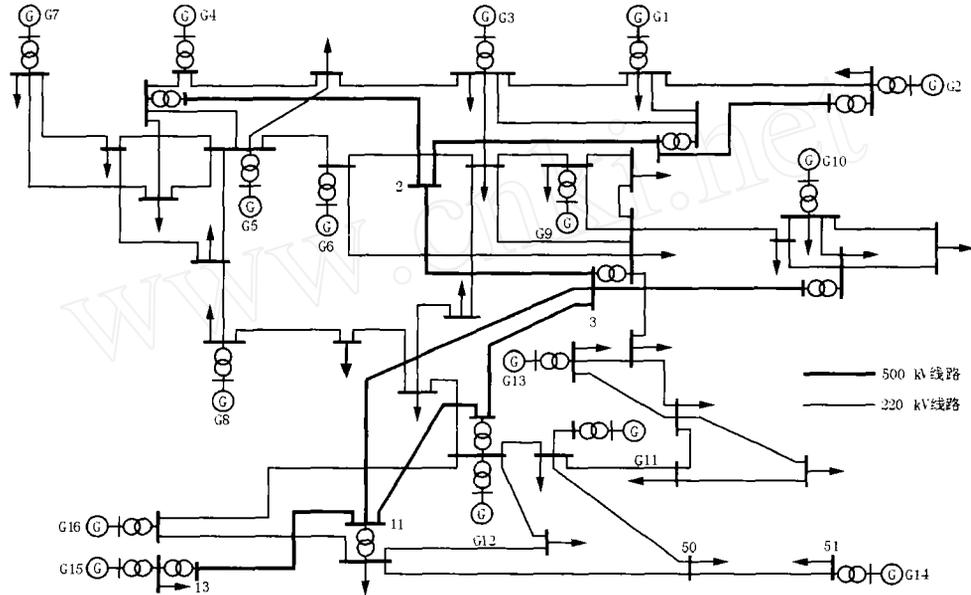


图 1 电网简图

Fig 1 Sketch of a power system

### 2.2 机电振荡模式及阻尼比

发电机采用五阶模型。由此形成的系统状态矩阵为 178 阶,求解得到 41 对复根和 96 个实根,且所有特征值的实部均小于零。其中对应于机电振荡模式的特征值为 16 - 1 = 15 对,结果如表 1 所示。

表 1 机电模式

Tab 1 Electromechanical modes

模式	特征值	阻尼比	主要参与机组
1	- 1.315 ±j0.726	0.1340	G11 → G12
2	- 1.291 ±j10.14	0.1262	G2, G1 → G3
3	- 1.213 ±j10.91	0.1105	G6, G9 → G4
4	- 1.207 ±j0.808	0.1221	G5, G8 → G4
5	- 1.164 ±j10.62	0.1089	G12 → G15
6	- 1.158 ±j10.36	0.1111	G9, G3 → G4
7	- 1.092 ±j10.05	0.1081	G3, G1 → G5, G2
8	- 0.871 ±j0.353	0.0927	G4 → G8, G10
9	- 0.835 ±j0.325	0.0892	G10, G1, G4 → G8, G5
10	- 0.677 ±j0.331	0.0810	G4 → G7, G1, G3
11	- 0.499 ±j0.082	0.0616	G4, G16, G14 → G13, G7
12	- 0.494 ±j0.683	0.0568	G16, G14 → G15, G13
13	- 0.431 ±j0.054	0.0534	G16, G1, G3, G14 → G13, G7
14	- 0.388 ±j7.205	0.0537	G4, G15 → G16, G13, G14
15	- 0.065 ±j0.203	0.0125	G15, G4 → G1, G3, G7

637 条支路, 23 个电厂的 68 台发电机投入运行。由此形成的系统状态矩阵的维数相当高 (750 阶), 为便于进行详细的分析, 对系统进行了等值处理。等值后, 有 83 个节点, 210 条支路, 16 台机组, 39 个负荷节点, 如图 1 所示。

表 1 中, 阻尼比为

$$k = -a_k / \sqrt{\frac{2}{k} + \frac{2}{k}} \quad (8)$$

为了保证系统的动态特性, 阻尼比  $k$  应不小于某一给定值  $c$ , 根据具体的网络特性确定, 本文取  $c = 0.03^{[7]}$ 。由表 1 可以看出, 最后一个振荡模式的阻尼比最小。

由于实际数据误差和其它因素的影响, 计算出的特征值不可避免地存在误差。相对而言, 特征值灵敏度的参考价值会更大一些。

表 1 中最后一列为对某一特定模式的主要参与机组。由表 1 可见, 对于阻尼比较弱的若干模式, 发电机 G4、G13、G15、G16 及 G10 中的一台或若干台都为特定模式中的较强的参与机组。与这些机组相关的参数, 如 PQ 节点功率, PV 节点电压, 线路阻抗等, 其灵敏度值也应该比较大。

由于振荡模式较多, 本文仅以阻尼比较小的后七个机电振荡模式为例进行相关的分析。并取发电机 G15 的出口母线作为整个网络的平衡节点。

### 2.3 特征值对系统参数的灵敏度

#### 2.3.1 注入功率及 PV 电压的影响

表 2 特征值对节点功率和 PV 电压的灵敏度

Tab 2 Eigenvalue sensitivities to nodal injections and PV voltage

节点	9	10	11	12	13	14	15
$P_{43}$	0.062 - j0.036	-0.002 - j0.006	-0.004 - j0.020	0.002 + j0.146	0.048 + j0.010	0.011 + j0.030	0.002 - j0.007
$Q_{43}$	0.126 - j0.105	-0.003 - j0.012	-0.001 - j0.022	-0.000 - j0.013	0.007 - j0.018	0.005 - j0.008	0.002 - j0.010
$P_{G10}$	-0.332 + j0.599	0.002 - j0.000	-0.002 + j0.012	-0.002 - j0.154	-0.043 - j0.014	-0.006 - j0.030	-0.001 + j0.003
$Q_{G10}$	-0.048 - j0.041	0.002 + j0.011	0.002 + j0.020	0.000 + j0.014	-0.006 + j0.016	-0.005 + j0.007	-0.002 + j0.009
$P_{G13}$	-0.004 - j0.004	0.001 - j0.004	0.165 + j0.132	-0.004 - j0.154	-0.161 + j0.045	0.001 + j0.003	-0.001 + j0.003
$V_{G13}$	-0.707 + j0.837	0.063 + j0.219	-0.160 + j1.923	0.045 + j0.552	-0.869 + j0.053	-0.261 + j0.294	-0.038 + j0.209
$V_{G4}$	-0.212 + j1.764	-1.235 + j1.947	-1.537 + j2.551	-0.209 + j1.058	1.093 + j2.074	0.220 + j4.491	0.033 + j1.042
$V_{G15}$	-0.477 + j0.618	0.032 + j0.165	0.030 + j0.266	-0.034 + j0.769	0.020 + j0.589	-0.118 + j0.645	-0.932 + j5.593

对 PQ 节点,计算特征值对有功、无功功率的灵敏度;对 PV 节点,则是对有功、电压幅值的灵敏度。为说明起见,仅将对振荡模式影响较大的部分 PQ 节点功率(或 PV 节点电压)的灵敏度数值。

列于表 2(基准值为 100 MVA)。其中,下标 43 为负荷节点,后三行为对应于 PV 节点电压的灵敏度。

结合未在表 2 中列出的其余数据,可以观察到,特征值对参与振荡程度较大的发电机的功率及 PV 节点电压的灵敏度较大。

PQ 节点功率(PV 节点电压)的变化对各个特征值的影响趋势和程度存在较大差异。以发电机 G13 有功  $P_{G13}$  为例,  $\partial_{11}/\partial P_{G13} = 0.165 + j0.132$ ,即当减少出力时,第 11 个振荡模式的实部将会减小,虚部也减小,有利于稳定性改善;但是对第 13 个振荡模式( $\partial_{13}/\partial P_{G13} = -0.161 + j0.045$ ),实部会相应增加,其虚部变化不会很明显,阻尼比降低,产生不利的影响。

单个特征值对不同参数的灵敏度符号也并非完全相同。例如,模式 13 对 PV 节点电压  $V_{G13}$ 、 $V_{G4}$  的灵敏度实部的符号相反( $\partial_{13}/\partial V_{G13} = -0.0809$ ,  $\partial_{13}/\partial V_{G4} = 1.093$ ),说明不能依赖于同时增加或者降低所有的 PV 节点电压来改善某一模式的阻尼。通过调整 PQ 节点的功率、PV 节点电压可以改善系统的小干扰稳定性。由表 2 可见,适当地减少 43 节点负荷的无功功率(例如加装无功补偿装置)及增加发电机 G10 出力,能够提高第 9 个模式的阻尼;提高发电机 G13 及 G15 的 PV 节点电压能够使阻尼比较低的若干模式得到不同程度的改善。

G13 和 G15 的 PV 节点电压分别为 1.016 及 1.01,今将其 PV 节点电压均提高为 1.05,表 3 列出了 PV 节点电压提高后的部分机电振荡模式。

与表 1 比较可见,除第 10 和第 12 个模式外,其余五个模式的阻尼比都有一定程度的提高,其中第

15 个模式的阻尼比改善效果最为明显。系统的小干扰稳定性得到了增强。

表 3 PV 节点电压提高后的机电模式

Tab 3 Electromechanical modes with increased PV voltage

模式	特征值	阻尼比
9	-0.877 ±j0.345	0.093 5
10	-0.673 ±j0.345	0.080 4
11	-0.518 ±j0.161	0.063 4
12	-0.496 ±j0.735	0.056 7
13	-0.442 ±j0.077	0.054 7
14	-0.401 ±j1.247	0.055 2
15	-0.100 ±j5.424	0.018 4

### 2.3.2 线路阻抗的影响

表 4 列出了部分数值较大的特征值对线路阻抗的灵敏度。阻抗下标为线路两端的节点号。前两条为 500 kV 线路,后一条为 220 kV 线路。

结合线路输送功率(未列出),输送的功率越多,特征值对线路阻抗的灵敏度值也就越大。输送功率较大的线路也正是各个发电机之间的主要联络线。例如,两端节点号为 2、3 的 500 kV 线路即为发电机 G4 与南部电网的联络线,而两端节点号为 50、51 的 220 kV 线路则承担了 G14 与外部电厂之间的联络。

根据表 4,降低线路 50、51 的阻抗可以提高阻尼比较弱的第 13 和第 14 个模式的阻尼,但降低线路 11、13 的阻抗对提高系统的小干扰稳定性更为显著。假设将第二条线路的电抗降低一半,例如使用串联电容或 TCSC,则第 15 个模式的特征值  $\lambda_{15}$  将变为  $-0.225 \pm j6.028$ ,阻尼比  $\zeta_{15}$  为 0.037 4,改善效果非常明显。

### 2.3.3 变压器变比的影响

表 5 为特征值对部分变压器变比  $T_{i,j}$ (非标准变比均在 1 测)的灵敏度,其中后三台为连接发电至母线的变压器。

对比表 2 和表 5 中的最后三行可以看出,特征值对连接发电机至母线的变压器变比的灵敏度和对

相应的发电机 PV 节点电压的灵敏度存在一致的关系(极少数情况例外)。

表 4 特征值对线路阻抗的灵敏度

Tab 4 Eigenvalue sensitivities to line impedances

节点	9	10	11	12	13	14	15
$R_{2,3}$	0.985 - j0.030	0.175 + j0.230	-1.127 + j0.517	-0.120 - j0.064	1.315 - j0.100	-0.268 + j0.779	-0.117 + j0.967
$X_{2,3}$	4.425 - j3.651	-0.055 + j0.081	1.102 - j1.892	0.366 - j0.730	-1.544 - j1.140	1.295 - j3.358	0.299 - j3.284
$R_{11,13}$	2.267 - j2.365	-0.134 - j0.674	-0.163 - j1.374	0.030 + j0.674	1.176 - j1.808	0.879 + j0.801	-6.524 + j22.86
$X_{11,13}$	0.272 - j0.382	-0.014 - j0.098	-0.052 - j0.063	0.360 - j0.416	-0.203 - j0.935	0.479 - j3.680	8.830 - j46.884
$R_{50,51}$	0.083 - j0.112	0.001 - j0.045	-0.106 - j0.328	1.125 + j0.806	0.227 + j1.029	-0.043 + j0.303	0.011 - j0.065
$X_{50,51}$	-0.050 - j0.047	-0.027 + j0.015	-0.308 + j0.570	-0.607 - j5.644	1.826 - j3.175	0.683 - j0.681	0.005 - j0.012

表 5 特征值对变压器变比的灵敏度

Tab 5 Eigenvalue sensitivities to transformer taps

节点	9	10	11	12	13	14	15
$T_{5,62}$	3.699 - j2.723	-0.013 - j0.066	-0.068 - j0.212	-0.002 - j0.013	0.111 - j0.083	0.022 - j0.052	0.002 - j0.018
$T_{11,65}$	-0.557 + j0.380	0.038 + j0.125	-0.026 + j0.303	0.047 - j1.550	-0.322 - j0.48	-0.016 - j0.288	-0.084 + j0.425
$T_{54,G13}$	-0.296 + j0.312	0.013 + j0.108	-0.583 - j0.376	0.029 + j0.249	0.383 + j0.033	-0.083 - j0.049	-0.016 + j0.087
$T_{33,G4}$	-0.063 + j0.254	-0.052 + j0.247	-0.052 + j0.228	-0.025 + j0.150	0.049 + j0.190	0.016 + j0.309	-0.003 + j0.102
$T_{13,G15}$	-0.179 + j0.231	0.012 + j0.062	0.010 + j0.101	-0.006 + j0.288	0.003 + j0.210	-0.040 + j0.163	-0.148 + j0.901

## 2.4 改善小干扰稳定性的措施

综上所述,依据特征值灵敏度分析,可以考虑如下措施提高电网的小干扰稳定性:

- (1)在 43 节点加装无功补偿装置;
- (2)增加发电机 G10 出力;
- (3)提高发电机 G13 及 G15 的 PV 节点电压;
- (4)对两端节点号为 11、13 的 500 kV 线路加装 TCSC 或者进行线路改造等。

## 2.5 相关方面的讨论

1) 运行方式和接线方式变化时,特征值对系统参数的灵敏度也会发生一定程度的变化,与模式相关的主要参与机组仍旧不会发生很大的改变。限于篇幅不做更多的说明。

2) 针对大规模电力系统,在本文基础上应用各种降阶技术,例如 AESOPS 算法、SMA 方法,即可得到特征值对系统参数的灵敏度,由灵敏度的大小和正负可得出各个系统参数对某一关键特征值的影响程度。

## 3 结论

本文依据某实际系统的典型运行方式,计算了特征值对系统运行参数及网络参数的灵敏度,分析了它们对系统小干扰稳定性的影响。线路输送功率越多时特征值对其阻抗的灵敏度越大;特征值对变压器变比和 PV 节点电压的灵敏度之间具有明显的一致性。合理调整系统参数,例如调整发电机出力、调节变压器分接头、线路改造等,可以改善系统的小

干扰稳定性。

## 参考文献:

- [1] Chung C Y, Wang K W, Tse C T, et al Probabilistic Eigenvalue Sensitivity Analysis and PSS Design in Multimachine Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1439-1445.
- [2] Voumas C D, Papadias B C. Power System Stabilization via Parameters Optimization Application to the Hellenic Interconnected System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(3): 615-622.
- [3] Nolan P J, Sinha N K, Alden R T H. Eigenvalue Sensitivities of Power Systems Including Network and Shaft Dynamics [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(6): 1318-1324.
- [4] Zein El-Din H M, Alden R T H. Second Order Eigenvalue Sensitivities Applied to Power System Dynamics [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(6): 1928-1936.
- [5] 钟志勇, 谢志堂, 王克文. 适用于电力系统动态稳定分析的元件建模新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 30-33.  
ZHONG Zhi-yong, XIE Zhi-tang, WANG Ke-wen. A Novel Modeling Technique for Modern Power System Dynamic Studies [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 30-33.
- [6] Wang K W, Chung C Y, Tse C T, et al Multimachine Eigenvalue Sensitivities of Power System Parameters [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 741-747.

[7] Wong D Y, Rogers G J, Kunder P. Eigenvalue Analysis of Very Large System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(2): 829-835.

收稿日期: 2005-10-07; 修回日期: 2005-12-18  
作者简介:

林昭华(1971-),男,电气工程师,主要从事供电企业的生产技术管理工作;

胡金磊(1981-),男,博士研究生,主要从事电力系统运行与控制方面的研究; E-mail: hujinlei@163.com

王克文(1964-),男,博士,教授,主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作。

### Effect of system parameter on small signal stability by eigenvalue sensitivity

L N Shao-hua<sup>1</sup>, HU Jin-lei<sup>2</sup>, WANG Ke-wen<sup>3</sup>

(1. Chaozhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Chaozhou 521000, China;

2. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In small signal stability study of power systems, eigenvalue sensitivities with respect to parameters quantitatively provide the influencing magnitude and trend. Based on the typical operating mode of a power system, the effects of various parameters on the system small signal stability are analyzed in this paper by using the eigenvalue sensitivities with respect to arbitrary system operating parameters (modal injections and PV voltage) and power network parameters (line impedances and transformer taps). From the analysis result, the small signal stability of the system can be improved by adjusting the parameters.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50177028).

**Key words:** eigenvalue; sensitivity; system parameter; small signal stability

## 关于征集“中国电力系统保护和控制学术研讨会”会议论文的通知

中国电器工业协会继电保护及自动化设备分会、清华大学电机工程与应用电子技术系、华中科技大学电气与电子工程学院和《继电器》杂志社定于2006年下半年召开“中国电力系统保护和控制学术研讨会”,特向全国征集学术论文,现将征文有关事项通知如下。

### 1、征文内容:

- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| (1) 超(特)高压交直流输电技术研究与应用; | (2) 电力系统继电保护和控制的新技术、新技术; |
| (3) 电力系统安全稳定分析与控制;      | (4) 电力系统规划与可靠性技术;        |
| (5) 能量管理系统;             | (6) 配电网自动化系统;            |
| (7) 厂、站自动化系统;           | (8) 调度自动化系统;             |
| (9) 电力系统通信技术;           | (10) 电气化铁道保护与控制技术;       |
| (11) 电网广域保护与自愈控制;       | (12) 数字化变电站技术研究;         |
| (13) 电力设备检测与故障诊断技术;     | (14) 电力电子技术在电力系统的应用;     |
| (15) 保护与控制设备运行经验与事故分析;  | (16) 保护与控制设备制造技术及电磁兼容;   |
| (17) 电力系统标准制定与应用;       | (18) 其他。                 |

### 2、征文办法:

论文必须未在全国性学术会议或公开发行的刊物上发表过;论文格式参照《继电器》论文格式,图表清晰、规范;论文篇幅在6000字以内(含空格,图表);来稿请务必写明:作者简介、地址、单位、邮编、联系电话、电子邮件;请用电子邮件投稿并使用回执确认收到投稿;征文截止日期为2006年6月30日,经专家评审后,由《继电器》杂志社及会议组委会发论文录用通知,并出版论文集,优秀论文将在《继电器》发表;开会具体时间及地点另行通知。

### 3、会议组委会联系方法:

投稿邮箱: relay2006@powerkingdom.com

relay2006@dlwg.net

地址: 河南省许昌市许继大道32号,邮编: 461000;

联系人: 张志强 电话: 0374-3212234 手机: 13733671540

张爱琴 电话: 0374-3212254 手机: 13839036701