

输电线路雷电干扰暂态识别的仿真研究

张丽娜, 陈 皓

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:随着超高压架空线路电压等级的提高,雷电现象下输电线路未造成短路故障的情况越来越多,这将使保护装置发生误动作。对于这种雷电干扰现象,文中利用 MATLAB 软件构建超高压输电线路仿真模型,对雷电故障及普通短路故障进行不同条件下的仿真并对数据及波形进行分析。发现他们近似分量能量的百分数值存在着很大的差别,由此构成识别雷电干扰的判据,大量的仿真数据表明所提方法是正确、有效的。

关键词:输电线路;识别;雷电干扰;暂态仿真模型;故障

Abstract: With the elevation of voltage class of EHV overhead line the short-circuit fault increasingly does not occurs in transmission lines under the thunder thus it would result in error action of protector. Aiming at the lightning interference the EHV transmission line model using MATLAB is established. The simulation is performed in different conditions for lightning fault and short-circuit fault and the data and waveform are analyzed. It is found that the percent value of approximation energy have a great difference. And then it becomes the criterion to identify the lightning interference. A large number of simulation data indicates that the method is correct and effective.

Key words: transmission line; identification; lightning interference; transient simulation model; fault

中图分类号: TM835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0031-05

输电线路分布很广,纵横交错,绵延数百公里,易受雷击,其线路的雷害事故在电力系统总的雷害事故中占很大的比例。加强输电线路防雷不仅可以减少雷击输电线路引起欧德雷击跳闸次数,还有利于变电站内电气设备的安全运行,是保证电力系统供电可靠性的重要环节。输电线路遭受的雷击有两种形式:感应雷和直击雷。感应雷是雷击线路附近地面或线路杆塔使导线上产生电磁感应;直击雷是雷直接击于输电线路,若产生的雷电流不够大时,将不会导致任何线发生绝缘闪络。因此,感应雷和直击雷都有可能使保护装置误动作。

MATLAB 是当今最优秀的科技应用软件之一,其中电力系统仿真工具箱功能更是强大,工具箱内部的元件库提供了经常使用的各种电力元件数学模型,并且提供了自己可以编程的方式创建合适的元件模型。这里采用 MATLAB 软件建立输电线路仿真模型,完成了四种不同短路情况及两种形式雷击情况的仿真,并采用小波变换对数据及波形进行处理^[1]。

1 雷电流波形及仿真模型

雷电放电所形成的电流具有单次脉冲性质,各个

雷电流的幅值和波形都不相同,大部分雷云对地放电时,其电流从几千安变化到数十千安,雷电流超过 100 kA 的很少。为了便于实验室试验和计算,将返回闪击的电流波形标准化。国际电工委员会(IEC)和中国国家标准规定了称之为 $1.2/50 \mu\text{s}$ 的标准雷电流波形,波前时间 $t_f = 1.2 \mu\text{s}$ 波尾时间 $t_r = 50 \mu\text{s}$ 它是一随着时间上升很快、慢慢下降的单极性电流波^[2]。

雷电流的波形可表示为:

$$i = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式(1)为一个双指数函数,其中 I_0 为某一大于雷电流幅值 I 的电流值, $e^{-\beta t}$ 决定了函数图形衰减部分,决定其上沿。双指数波是与实际雷电流波形最为接近的等值计算波形,在数学分析中容易处理的,其结果精确度也是可以接受的。

这里利用 MATLAB 软件中 simulink 模块库建立仿真雷电流的模型,Fcn 是一个自定义功能可实现 MATLAB 函数的模块,对输入进行一个指定表达式的运算,文中即式(1),此模块容易使用且速度快。图 1 为雷电流的仿真模型;图 2 为应用模型仿真出的雷电流波形。

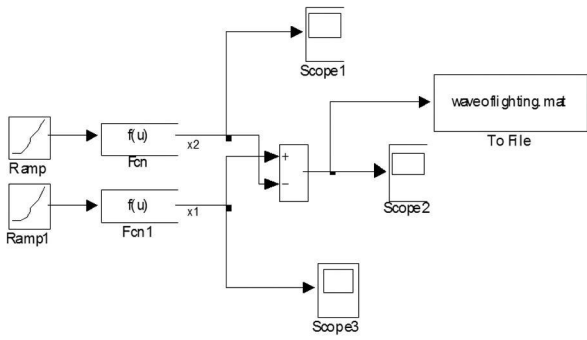


图 1 标准雷电流的仿真模型

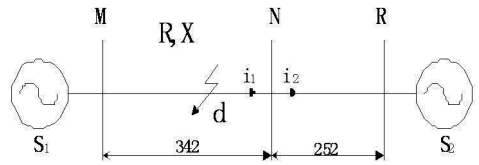


图 3 500 kV 超高压输电线路简化接线模型

利用 MATLAB 建立输电线路系统仿真模型如图 4 所示。其中三相电源 (3-phase source) 元件参数为: 电源电压 $S_1 = S_2 = 252 \text{ kV}$, 电源内阻 $Z_{S1} = 0.89 + j25.9364$, $Z_{S2} = 0.66 + j16.5164$; 分布参数线路 (Distributed Parameters Line) 元件参数为: 正序阻抗 $Z_1 = 0.0259 + j0.2895 \text{ } \Omega/\text{km}$, 零序阻抗 $Z_0 = 0.1731 + j1.03952 \text{ } \Omega/\text{km}$, 线路对地正序电容 $\alpha = 0.0131 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$, 线路对地零序电容 $\omega_0 = 0.071 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$, $LMN = 342 \text{ km}$, $LNR = 252 \text{ km}$; 三相故障器 (3-phase fault) 元件参数为: 故障点电阻 $R_{on} = 0.001 \text{ ohm s}$ 接地电阻 $R_g = 0.001 \text{ ohm s}$

3 暂态仿真研究

采用小波电流能量比值算法, 此方法主要是故障启动后, 将采集到的电流暂态信号相模变换, 然后应用小波多分辨率分析提取小波变换系数, 并计算能量比值。表 1 与表 2 中 E_a 表示暂态模电流小波尺度 5 的近似分量能量与暂态模电流总能量的百分比值; $E_{d1} \sim E_{d5}$ 表示暂态模电流尺度 1~5 的小波细节分量能量与暂态模电流能量的百分比值。图 5 至图 11 为输电线路故障和输电线路雷击条件下暂态模电流、

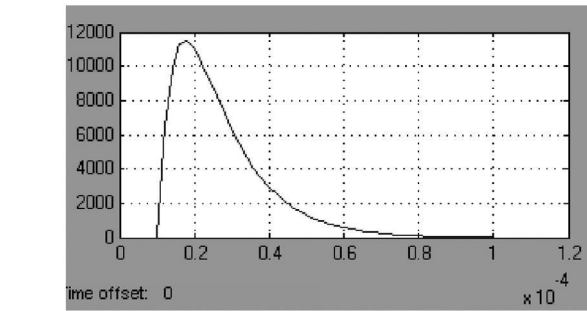


图 2 应用模型仿真的标准雷电流波

2 线路仿真模型的建立

研究的是电压等级为 500 kV 的超高压输电线路, 其系统接线图见图 3。图中 S_1 、 S_2 分别为系统两端电压源电压, R 、 X 为线路的电阻和电抗。故障点设置如图 3 所示 d 点, 考虑单相短路、两相短路、两相短路接地以及三相短路 4 种普通短路故障类型和直击雷与感应雷两种雷击故障。

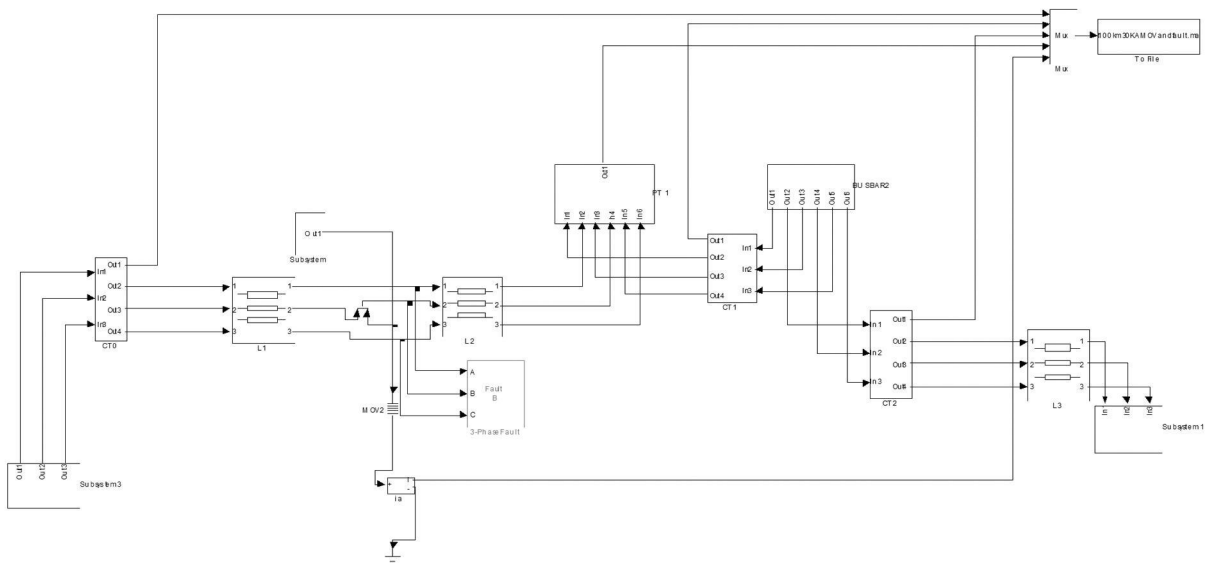


图 4 500 kV 超高压输电线路仿真模型

暂态模电流的小波近似分量和雷击实时识别判据计算的仿真波形。子图中 s_1 、 s_2 分别表示线路 L_{MN} 、线路 L_{NR} 母线 N 侧模量电流； a_{15} 、 a_{25} 分别表示线路 L_{MN} 、线路 L_{NR} 母线 N 侧模量电流的小波尺度 5 的近似分量；Ratio1、Ratio2 分别表示线路 L_{MN} 、线路 L_{NR} 雷击实时识别判据计算的仿真波形。

3.1 普通短路情况下的仿真研究

3.1.1 单相短路

仿真模型如图 4 所示，将三相故障器设置为单相短路故障 $f^{(1)}$ ，故障相为 A 相，故障时间为 20.1 ms 对应电压峰值发生故障；仿真条件故障点 d 距离 N 侧母线 200 km、150 km、50 km 不同距离发生短路故障。从表 1 单相短路情况可以看出暂态模电流小波尺度 5 的近似分量能量与暂态模电流总能量的百分比值 E_a 的值基本接近 100%，即趋近 1。若设门槛值为 $E_0 = 0.65$ ，则 $E_a > E_0$ 。从图 5 单相短路故障时的仿真波形也可看出 Ratio1、Ratio2 趋近于 1。

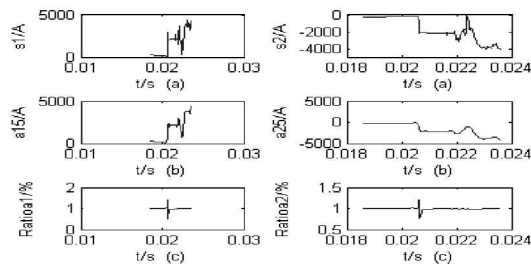


图 5 单相短路故障时的仿真波形

3.1.2 两相短路

将三相故障器设置为两相短路故障 $f^{(2)}$ ，故障相为 A、B 相，故障时间为 20.1 ms 对应电压峰值发生故障；仿真条件故障点 d 距离 N 侧母线 200 km、150 km、50 km 不同距离发生短路故障。从表 1 两相短路情况可以看出 E_a 的值基本接近 100%，即趋近 1。若设门槛值为 $E_0 = 0.65$ ，则 $E_a > E_0$ 。从图 6 两相短路故障时的仿真波形也可看出 Ratio1、Ratio2 趋近于 1。

3.1.3 两相短路接地

将三相故障器设置为两相短路接地故障 $f^{(1,1)}$ ，故障相为 AB 相且接地，故障时间为 20.1 ms 对应电压峰值发生故障；仿真条件故障点 d 距离 N 侧母线 200 km、150 km、50 km 不同距离发生短路故障。从表 1 两相短路接地情况可以看出 E_a 的值基本接近 100%，即趋近 1。若设门槛值为 $E_0 = 0.65$ ，则 $E_a > E_0$ 。从图 7 两相短路接地故障时的仿真波形也可看出 Ratio1、Ratio2 趋近于 1。

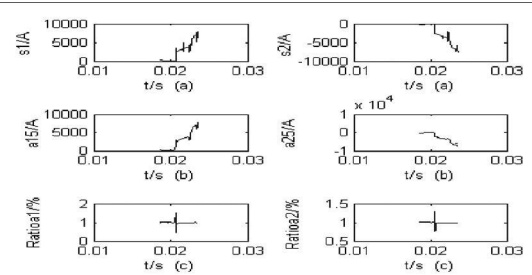


图 6 两相短路故障时的仿真波形

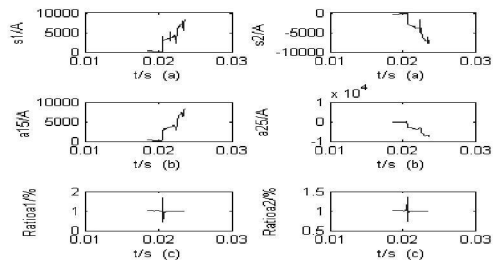


图 7 两相短路接地故障时的仿真波形

3.1.4 三相短路

将三相故障器设置为三相短路故障 $f^{(3)}$ ，故障相为 A、B、C 三相，故障时间为 20.1 ms 对应电压峰值发生故障；仿真条件故障点 d 距离 N 侧母线 200 km、150 km、50 km 不同距离发生短路故障。从表 1 三相短路情况可以看出 E_a 的值基本接近 100%，即趋近 1。若设门槛值为 $E_0 = 0.65$ ，则 $E_a > E_0$ 。从图 8 三相短路故障时的仿真波形也可看出 Ratio1、Ratio2 趋近于 1。

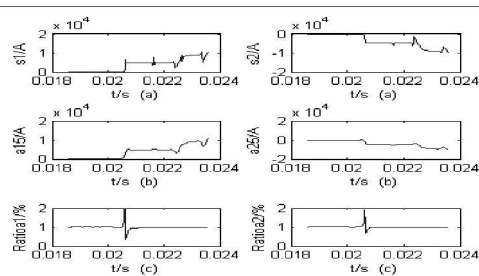


图 8 三相短路故障时的仿真波形

3.2 雷电情况下的暂态仿真

3.2.1 直击雷

图 9 仿真条件为线路 L_{MN} 距离 N 侧母线 150 km 发生线路雷击，雷电流幅值为 30 kA，线路雷击类型为直击雷，雷击相别为 B 相，属于故障性雷击；图 10 仿真条件为线路 L_{MN} 距离 N 侧母线 150 km 发生线路雷击，雷电流幅值为 15 kA，线路雷击类型为直击雷，雷击相别为 B 相，属于非故障性雷击视为雷电干扰；从表 2 可以看出故障性雷击时 E_a 的值基本接近 100%，即趋近 1。若设门槛值为 $E_0 = 0.65$ ，则 $E_a >$

E_0 。非故障性雷击时 E_a 的值基本接近 50%，即 $E_a < E_0$ 。从图 9、图 10 仿真波形也可以明显看出故障性雷击时 $Ratioa1$ 、 $Ratioa2$ 趋近于 1，非故障性雷击时 $Ratioa1$ 、 $Ratioa2$ 小于门槛值。

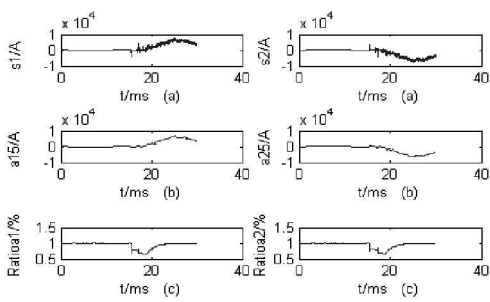


图 9 故障性雷击 (30 kA) 时的仿真波形

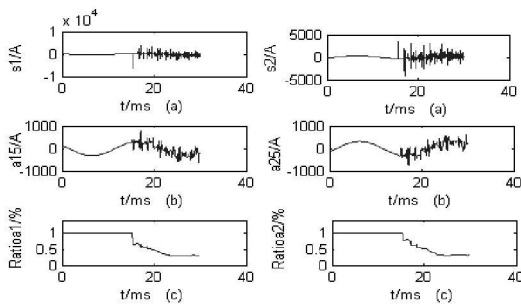


图 10 非故障性雷击 (15 kA) 时的仿真波形

3.2.2 感应雷

感应雷击于输电线路附近，在三相导线上感应的暂态波形基本一致，幅值基本相似，但存在一定的差异。因此，在仿真中做了这样的假设：三相暂态波形采用标准的雷电流波形，在幅值上各相差 10%，即 $i_1 \times 1.1 = i_2 = i_3 \times 1.1 = 5 \text{ kA}$ 。感应雷不会造成短路故障视为雷电干扰；从表 2 可以看出感应雷时 E_a 的值基本接近 60%，即 $E_a < E_0$ 。图 11 为线路 L_{MN} 距离

N 侧母线 150 km 附近发生线路雷击时的仿真波形，可以明显看出感应雷击时 $Ratioa1$ 、 $Ratioa2$ 小于门槛值。

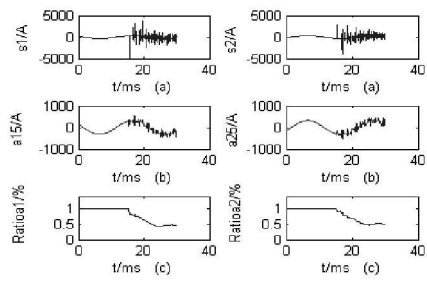


图 11 感应雷击 (5 kA) 时的仿真波形

4 仿真结果分析

依据小波电流能量比值算法对各种普通短路及雷击情况下进行仿真研究，并将直击雷造成线路短路即故障性雷击与普通短路故障均视为短路故障；感应雷与不引起绝缘闪络的直击雷造成的影响即非故障性雷击视为雷电干扰。从不同情况的仿真可以看出短路故障情况下 E_a 的值基本接近 100%，即趋近 1，若设门槛值为 $E_0 = 0.65$ ，则 $E_a > E_0$ ，仿真波形 $Ratioa1$ 、 $Ratioa2$ 趋近于 1；雷电干扰情况下 E_a 的值基本接近 60%，即 $E_a < E_0$ ，仿真波形 $Ratioa1$ 、 $Ratioa2$ 小于门槛值。此法有效地识别了输电线路上的雷电干扰，可使继电保护装置不发生误动作，减少对电力系统稳定的破坏。

5 结论

表 1 各种短路情况不同条件下的仿真结果

类型	条件	E_a	E_{d1}	E_{d2}	E_{d3}	E_{d4}	E_{d5}
单相短路 $f^{(1)}$	200 km	99.481 0	0.223 2	0.166 9	0.088 7	0.034 0	0.006 3
	150 km	99.622 0	0.116 1	0.151 6	0.081 7	0.023 4	0.005 2
	50 km	99.687 0	0.112 2	0.109 0	0.065 8	0.022 8	0.003 2
两相短路 $f^{(2)}$	200 km	99.924 6	0.023 2	0.028 9	0.015 5	0.006 4	0.001 4
	150 km	99.931 1	0.027 0	0.022 2	0.013 9	0.005 0	0.000 8
	50 km	99.943 6	0.016 5	0.020 5	0.014 9	0.004 1	0.000 3
两相短路接地 $f^{(1,1)}$	200 km	99.907 5	0.030 3	0.036 1	0.017 1	0.007 4	0.001 6
	150 km	99.922 0	0.027 9	0.026 2	0.016 3	0.006 4	0.001 2
	50 km	99.931 2	0.017 6	0.022 6	0.020	0.007 6	0.001 0
两相短路 $f^{(3)}$	200 km	99.691 8	0.094 7	0.118	0.026 7	0.026 7	0.005 8
	150 km	99.716 4	0.110 7	0.090 8	0.057 5	0.021 1	0.003 5
	50 km	99.739 8	0.066 3	0.082 7	0.077 4	0.030 3	0.003 6

表 2 两种雷击情况不同条件下的仿真结果

类型	条件	Ea	E _{d1}	E _{d2}	E _{d3}	E _{d4}	E _{d5}	
直击雷	故障性 30 kA	200 km	98.961 4	0.128 3	0.255 9	0.381 2	0.170 4	0.102 7
		150 km	99.188 6	0.092 4	0.186 3	0.355 1	0.114 4	0.063 3
		50 km	99.392 9	0.068 5	0.143 7	0.234 4	0.096 2	0.064 3
	非故障性 15 kA	200 km	45.403 3	9.432 3	14.019 2	16.778 4	9.96	4.406 7
		150 km	37.041 6	9.784 8	16.701 2	19.052 9	11.432 4	5.987 1
		50 km	47.392 2	7.470 5	14.093 9	16.341 3	9.43	5.272 1
感应雷	非故障性 5 kA	200 km	60.593 2	4.653 4	7.330 3	10.295 1	10.524 4	6.603 6
		150 km	57.637 2	4.395 1	7.619 2	11.966 3	10.966 3	7.800 2
		50 km	59.956 4	4.657 8	7.026 8	12.213 3	7.531 7	8.614 0

首先介绍了雷电流的波形,并利用 MATLAB 软件构建雷电流和输电线路仿真模型,通过参数的设定,对四种常见的普通短路和两种形式的雷击进行仿真实验。由仿真的数据和波形可以明显看出普通短路与雷电干扰及故障性雷击的区别,实现了输电线路雷电干扰暂态的识别方法,大量的仿真数据说明了该方法的可靠性和可行性。

参考文献

[1] 钟麟,王峰. MATLAB 仿真技术与应用教程 [M]. 国防工业出版社, 2004. 1.
 [2] 施围,邱毓,等. 高电压工程基础 [M]. 机械工业出版社, 2006. 8.
 [3] 董杏丽,葛耀中,董新洲,等. 行波保护中雷电干扰问题的对策 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 74-78.
 [4] 李海峰,王钢,赵建仓,等. 输电线路感应雷击暂态特性分析及识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):

114-119.

[5] 王钢,李海峰,赵建仓,等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139-144.
 [6] 段建东,张保会,等. 超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 30-35.
 [7] 司大军,束洪春,陈学允,等. 输电线路雷击的电磁暂态特性分析及识别方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 64-67.
 [8] 段建东,任晋峰,张保会,等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, (23): 7-13.

作者简介:

张丽娜 (1984-),女,硕士研究生,研究方向是电力系统继电保护。

(收稿日期: 2008-12-12)

(上接第 4 页)

[14] Denis Lee Hau Aik Goran Andersson. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC system [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1316.
 [15] 林良真,叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC [J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65-66.
 [16] M. O. Fauque Yuyan Zhang Venkata Dinavahi. Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SMULNK [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 378-387.

作者简介:

艾飞 (1983-),男,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;

李兴源 (1945-),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE 高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究;

王晓丽 (1981-),女,硕士,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

任永生 (1982-),男,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

韦立 (1983-),男,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

刘建 (1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009-02-19)