

# 基于恒频注入信号的消弧线圈自动跟踪补偿技术研究

丛伟<sup>1</sup>, 李盼盼<sup>1</sup>, 李洪涛<sup>2</sup>, 王勇焕<sup>2</sup>, 刘振伶<sup>2</sup>, 张晓峰<sup>3</sup>, 陈远喆<sup>3</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 河南油田水电厂, 河南 南阳 473132;  
3. 济南富吉电气有限公司, 山东 济南 250011)

**摘要:** 目前大多数消弧线圈补偿方案都是基于测量故障发生后的分布电容电流大小而展开的, 属于故障后补偿, 该类方案难以满足分布电容电流较大系统的补偿要求。提出基于恒频注入信号的消弧线圈自动跟踪补偿方案, 在系统正常运行时即可准确测得分布电容, 并根据设定的脱谐度自动调节消弧线圈, 在单相接地故障发生前就可做好补偿准备。对于运行方式灵活、分布电容经常变化的配电网, 能够快速、准确跟踪分布电容的变化, 达到理想的补偿效果。该方法能够准确计算出系统的分布电容和绝缘电阻, 用来监视系统的绝缘情况。实验室模拟实验和现场运行实验结果表明, 基于恒频注入信号的消弧线圈自动跟踪补偿方案具有很高的精度和灵敏度, 能够较好地满足现场需求。

**关键词:** 恒频注入信号; 消弧线圈; 跟踪补偿; 小电流接地系统

## Automatic arc suppression coil compensation technology based on fixed-frequency signal injection method

CONG Wei<sup>1</sup>, LI Pan-pan<sup>1</sup>, LI Hong-tao<sup>2</sup>, WANG Yong-huan<sup>2</sup>, LIU Zhen-ling<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-feng<sup>3</sup>, CHEN Yuan-zhe<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;  
2. Water-Electricity Plant of Henan Oilfield, Nanyang 473132, China;  
3. Jinan Fuji Electrical Company, Jinan 250011, China)

**Abstract:** Most of the arc suppression coil compensation systems work based on the magnitude of post-fault distributed capacitance current. In power system with large distributed capacitance current, because this system can not offer compensation before fault, large current shock is inevitable. This paper proposes an automatic arc suppression coil compensation technology based on fixed-frequency signal injection method, which can calculate system equivalent distributed capacitance accurately in normal operation status, and then adjust the arc suppression coil according to pre-determined compensation degree. This system can offer compensation before the occurrence of single-phase ground fault, and can possess preferable compensation effect for distribution system with flexible operation manner and variation distributed capacitance. This method can calculate distribution capacitance and insulation resistor to monitor the insulation status of power system. Laboratory simulation test and field test running results indicate that the arc suppression coil compensation system based on fixed-frequency signal injection method has high accuracy and sensitivity and can offer ideal compensation effect for distribution system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50807032).

**Key words:** fixed-frequency injection signal; arc suppression coil; compensation; floating neutral system

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0185-05

## 0 引言

在中性点非有效接地系统中发生单相接地故障时, 流过接地点的电流为系统对地分布电容电流, 其大小与系统电压等级、电网规模、线路结构等有

关。当该电流大至一定程度时, 将会形成持续电弧, 使许多原本属于瞬时性的接地故障发展为永久性接地故障, 带来较为严重的后果<sup>[1-4]</sup>。在系统中性点加装消弧线圈, 能够对接地电容电流进行有效补偿, 当发生瞬时性接地故障时, 如果补偿得当, 接地点的电弧将自动熄灭, 绝缘恢复, 故障也将消除, 即使发生了永久性接地故障, 经过消弧线圈补偿后,

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (50807032)

接地点的烧灼程度、系统的过电压水平等也将得到很大改善。可见，消弧线圈对提高配电系统运行的安全性、减少故障损失、提高供电可靠性具有十分重要的作用<sup>[5]</sup>。

为获得理想的补偿效果，必须快速、准确获得系统当前的分布电容参数，据此调节消弧线圈实现自动跟踪补偿<sup>[6-8]</sup>。本文提出一种通过注入恒频信号进行分布电容精确测算、进而完成消弧线圈自动跟踪补偿的新技术。在系统正常运行时，通过消弧线圈的副边向电网注入恒频的电流信号，在系统一次侧对注入信号进行测算，可快速、准确地计算出系统对地分布电容、脱谐度和阻尼率等参数，在完成消弧线圈的自动跟踪补偿功能的同时，还可以对系统的绝缘性能进行监视。

### 1 注入恒频信号计算分布电容的原理

基于恒频注入信号计算分布电容的原理示意图如图 1 所示。

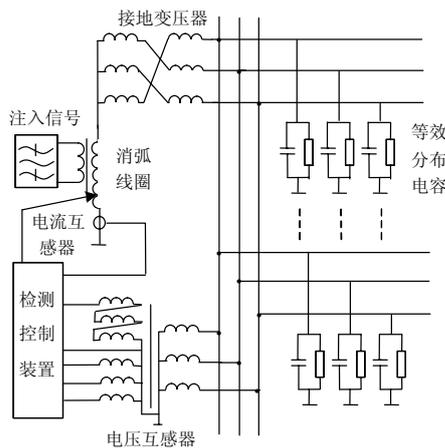


图 1 注入信号法计算分布电容原理图

Fig.1 Sketch map for capacitance calculation based on injection signal method

该系统由接地变压器、消弧线圈（含副边）、注入信号源、信号检测及消弧线圈控制装置等几部分组成。注入信号源接至消弧线圈的副边，通过消弧线圈将注入信号耦合到系统一次侧，其幅值可由安装在消弧线圈处的电流互感器测得。信号注入到一次系统后，通过系统的等效分布电容构成回路。注入信号在线路和等效分布电容上产生的压降可以通过开口三角形电压互感器测到。与等效分布电容的容抗相比，线路自身阻抗和系统零序阻抗很小，可以忽略不计，因此从开口三角形电压互感器测到的电压可以认为就是分布电容的压降。通过电流电压关系，可以推算出等效分布电容的大小，这就是基

于恒频注入信号计算分布电容的原理。

对注入信号频率的选择要遵循以下基本原则：

(1) 注入信号的频率要与电力系统固有的工频和整倍数次谐波频率相区分，为一间谐波信号；

(2) 注入信号的频率不能离工频太近，以防幅值较大的工频信号影响检测精度；

(3) 注入信号的频率也不能太高，因为频率越高，线路的感抗越大，容抗越小，分布电容测算的误差也越大。

(4) 注入信号频率的选择还要考虑数字信号处理过程的便利。

综合上述因素，本文选择的注入信号频率为 83.3 Hz。

### 2 系统对地分布电容的计算

对图 1 所示的系统进行分析，做出注入信号回路的等值电路如图 2 所示。

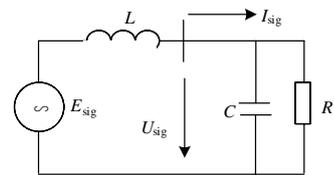


图 2 分布电容计算等值电路图

Fig.2 Equivalent circuit for capacitance calculation

图中， $\dot{E}_{sig}$  为等效到一次侧的注入信号源； $L$  为消弧线圈原边等值电感与接地变压器零序电感之和，由于接地变绕组一般为 Z 型结构，零序阻抗很小，可以忽略不计； $\dot{U}_{sig}$  为注入信号在等效分布电容两端产生的压降，也就是从开口三角形电压互感器检测到的信号电压； $\dot{I}_{sig}$  为流过消弧线圈原边的注入信号电流大小，可以通过安装在消弧线圈处的电流互感器测得； $R$ 、 $C$  为系统对地等值电阻和分布电容，线路自身阻抗和系统零序阻抗均忽略不计。

由于  $\dot{U}_{sig}$  可以看做  $\dot{I}_{sig}$  在  $R$ 、 $C$  并联阻抗上产生的压降，所以有：

$$\frac{\dot{I}_{sig}}{\dot{U}_{sig}} = \frac{1}{R} + j\omega_{sig}C \quad (1)$$

$$\omega_{sig} = m \cdot \omega_1 \quad (2)$$

其中： $\omega_{sig}$  为注入信号的角频率； $\omega_1$  为基波角频率； $m$  为实数。

将式 (2) 带入到式 (1) 中，有：

$$\frac{\dot{I}_{sig}}{\dot{U}_{sig}} = \frac{1}{R} + jm\omega_1 C = \frac{1}{R} + j\frac{1}{mX_c} \quad (3)$$

整理得：

$$R = \frac{1}{\operatorname{Re} \left[ \frac{\dot{I}_{\text{sig}}}{\dot{U}_{\text{sig}}} \right]} \quad (4)$$

$$X_C = m \cdot \frac{1}{\operatorname{Im} \left[ \frac{\dot{I}_{\text{sig}}}{\dot{U}_{\text{sig}}} \right]} \quad (5)$$

通过式(4)和式(5), 不仅能够计算出系统的对地容抗, 而且还可以计算出电网的对地绝缘电阻。因此该方法不仅可以为消弧线圈跟踪补偿提供依据, 还可以用于计算电网的阻尼率  $d = \frac{1}{R\omega_1 C}$ 。电

网正常运行时, 阻尼率一般不会超过 5%, 即使比较潮湿的情况, 阻尼率也不会超过 10%。但是当电网绝缘降低时, 阻尼率就会明显增大, 因此可以通过电网阻尼率对电网的绝缘情况加以监视。

计算出系统的对地容抗后, 可以根据设定的脱谐度调节消弧线圈, 使系统总是工作在预先设定的工作点附近, 一旦发生单相接地故障, 就可平稳的进入到补偿后状态<sup>[9-11]</sup>。

向一次系统注入特殊频率的信号势必会带来一些影响, 为尽可能减小信号注入对一次系统和二次设备的影响, 本文采取了如下措施:

(1) 在注入方式上采取定期短时注入与线路投退启动注入相结合的方法。如果系统运行方式和网络结构变化较为频繁, 可以采取定期注入方式, 注入周期取决于现场需要。注入信号持续时间一般不超过 1 s, 短时注入不会对一次系统和二次设备带来较大影响。如果系统运行方式较为固定, 注入周期可以延长, 或者只有进行线路投退操作时才启动信号注入, 最大限度地减小注入信号所带来的影响。

(2) 尽可能降低注入信号的幅值。在满足检测精度要求的前提下, 注入信号幅值越小, 对一次系统和二次装置的影响也越小。大量的实验室和现场实验表明: 注入到消弧线圈二次侧的信号幅值控制在 2~3 A 之间即可较好地满足检测精度需求。由于注入信号源接在消弧线圈的二次侧, 实际耦合到一次系统的注入信号幅值约为 40~60 mA (取决于消弧线圈原边和副边的匝数比)。如此小的间谐波信号对一次系统和二次设备的影响完全可以忽略。

### 3 实验室测试模型的构建

为验证本文所提方案的可行性和准确性, 搭建了实验室模型进行测试, 结构与图 1 类似, 只不过将图 1 中的接地变换为隔离变, 其作用是模拟系统提供电源, 并将模拟系统与实验室供电电源进行

电气隔离。模拟系统的工作电压为 380 V, 与实际系统的工作电压有较大差别, 因此必须重新计算选择电容, 使得从模拟系统二次侧得到的电流、电压值与从实际系统二次侧感得到的电流、电压值一致<sup>[12]</sup>。

对于实际的 10 kV 系统而言, 若系统的分布电容电流小于 10 A, 无需装设消弧线圈, 而当前的电网规模, 分布电容电流一般也不会大于 80 A, 考虑一定的裕度, 认为分布电容电流范围为 5~100 A, 分布电容电流与分布电容的关系为:

$$I_{\text{grd}} = 3\omega_1 C_1 \cdot U_{\phi} \quad (6)$$

$$\text{即: } 5 \sim 10 \text{ A} = 3 \times 314 C_1 \times \frac{10000}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

可得:

$$C_1 = 0.92 \sim 18.4 \mu\text{F} \quad (8)$$

设实际系统电压互感器的变比为  $n_{\text{PT1}}$ , 消弧线圈处电流互感器的变比为  $n_{\text{CT1}}$ , 则实际系统的容抗为:

$$X_{C1} = \frac{3\dot{U}_{01}}{3\dot{I}_{01}} = \frac{3\dot{U}_{02} \cdot n_{\text{PT1}}}{3\dot{I}_{02} \cdot n_{\text{CT1}}} = X_{C2} \cdot \frac{n_{\text{PT1}}}{n_{\text{CT1}}} \quad (9)$$

式中:  $X_{C1}$  为实际系统一次侧对地容抗;  $X_{C2}$  折算到二次侧的对地容抗。

即:

$$X_{C2} = X_{C1} \cdot \frac{n_{\text{CT1}}}{n_{\text{PT1}}} \quad (10)$$

同理, 在模拟系统中:

$$X_{C2}' = X_{\text{CM}} \cdot \frac{n_{\text{CTM}}}{n_{\text{PTM}}} \quad (11)$$

式中:  $X_{C2}'$  为模拟系统中折算到二次侧的对地容抗;  $X_{\text{CM}}$  为模拟系统一次侧对地容抗;  $n_{\text{PTM}}$ 、 $n_{\text{CTM}}$  分别为模拟系统中电压互感器、电流互感器的变比。

根据二次侧等效的原则, 在模拟系统中, 折算到二次侧的对地容抗应与实际系统折算到二次侧的对地容抗大小一样, 即:

$$X_{C2} = X_{C2}' \quad (12)$$

于是有:

$$X_{C1} \cdot \frac{n_{\text{CT1}}}{n_{\text{PT1}}} = X_{\text{CM}} \cdot \frac{n_{\text{CTM}}}{n_{\text{PTM}}} \quad (13)$$

$$X_{\text{CM}} = X_{C1} \cdot \frac{n_{\text{CT1}}}{n_{\text{PT1}}} \cdot \frac{n_{\text{PTM}}}{n_{\text{CTM}}} \quad (14)$$

设:

$$n_{\text{PT1}} = \left( \frac{10000}{\sqrt{3}} \right) / (100/3) \approx 175$$

$$n_{\text{CT1}} = 100/5 = 20$$

$$n_{PTM} = (380/\sqrt{3}) / (100/3) \approx 6.65$$

$$n_{CTM} = 5/5 = 1$$

带入到式 (14) 中, 可得:

$$C_M = (0.92 \sim 18.4) \cdot \frac{175}{20} \cdot \frac{1}{6.65} \approx (1.2 \sim 24) \mu F \quad (15)$$

即模拟系统的电容值按该范围选取时, 测量装置所感受到的容抗与安装在实际系统中感受到的容抗相等。

利用上述模拟系统对所研制的装置进行了反复的模拟实验, 取模拟电容为各种不同的数值时, 计算结果如表 1 所示。

表 1 模拟系统中分布电容计算结果

Tab.1 Calculation results in simulation system

序号	实际投入的分布电容值/ $\mu F$	装置测量的分布电容值/ $\mu F$	误差/%
1	5.12	5.02	1.95
2	12.26	12.04	1.79
3	19.28	18.96	1.66
4	31.54	30.98	1.78
5	38.83	38.24	1.52

由表 1 可以看出, 在实验室中, 装置对分布电容的测量精度较高, 分布电容值越大, 测量结果也相对越准确, 测量误差一般能够控制在 2% 以内。

### 4 现场测试结果

基于恒频注入信号进行消弧线圈自动跟踪补偿的装置样机在河南油北区变电站 10 kV 系统进行了多次现场实验, 表 2 是 2009 年 7 月 7 日在河南油北区的实验结果。

表 2 现场分布电容测算结果

Tab.2 Calculation results in power system

序号	$3U_0 / V$	实际系统分布电容/ $\mu F$	测算分布电容/ $\mu F$	误差/%
1	1.6	3.89	3.62	6.94
2	2.8	3.67	3.42	6.81
3	5.2	4.12	3.83	7.03
4	1.6	2.35	2.25	4.26
5	8.2	2.38	2.28	4.2
6	12.8	2.35	2.25	4.26

可以看出, 基于恒频信号注入原理测算得到的分布电容值与实际值十分接近, 最大误差约为 7%, 最小误差约为 4%, 能较好地满足现场应用的要求。与实验室测试结果相比, 现场测试结果的误差稍大, 主要原因有:

(1) 表 2 中第三列为实际系统的分布电容, 其准确值难以直接获得, 本文是通过零序电压和零序电流计算得到的, 本身就存在一定误差。

(2) 基于恒频信号注入原理测算得到的分布电容值实际包括了线路阻抗和系统零序阻抗, 表 2 的测算结果忽略了上述阻抗值, 这也是产生误差的重要原因之一。通过参数补偿可以有效减小误差, 本文不再详细讨论。

### 5 结语

消弧线圈生产制造技术的进步使得自动跟踪补偿成为可能, 而要进行准确的跟踪补偿, 对系统等效分布电容进行精确计算至关重要。由于系统的分布电容值一般较大, 采用工频信号计算会受很多因素影响, 计算精度难以满足现场应用要求。本文提出并采用短时注入恒频信号计算系统等效分布电容的方法, 能够精确地测量出系统等效分布电容, 为消弧线圈的自动跟踪补偿提供了理论依据。由于注入信号的幅值较小、注入时间较短, 不会给系统带来不利的影 响, 能够较好地满足现场应用的要求。

### 参考文献

- [1] 李润先. 中压电网系统接地实用技术[M]. 二版. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
LI Run-xian. Practical grounding technology for medium voltage power system[M]. Second edition. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 要焕年, 曹梅月. 论城乡中压电网的中性点接地方式[J]. 电力设备, 2001, 2(3): 5-21.  
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Discussion on neutral grounding scheme for urban and rural medium voltage networks[J]. Electrical Equipment, 2001, 2(3): 5-21.
- [3] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 三版. 北京: 水利电力出版社, 1994.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Power system relaying protection principle[M]. Third edition. Beijing: China Water Power Press, 1994.
- [4] 李颖峰. 配电网中性点接地方式探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(19): 58-60.  
LI Ying-feng. Discussion on neutral grounding modes for distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(19): 58-60.
- [5] 徐玉琴, 陈志业, 李鹏. 晶闸管投切电容式消弧线圈的设计与应用研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 38-41.
- [6] 李新泉, 齐郑, 杨以涵. 一种新型消弧方法的研究及其实现[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 83-87.  
LI Xin-quan, QI Zheng, YANG Yi-han. Research and realization on a new tape arc-suppression method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 83-87.

- 83-87.
- [7] 陈忠仁, 吴维宁, 张勤, 等. 调匝式消弧线圈自动调谐新方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (24): 75-78. CHEN Zhong-ren, WU Wei-ning, ZHANG Qin, et al. New automatic tuning method for multi-tap arc-suppression coil[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (24): 75-78.
- [8] 陈忠仁, 董浩斌, 李景禄. 调气隙式自动消弧装置测量原理研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (10): 25-27. CHEN Zhong-ren, DONG Hao-bin, LI Jing-lu. Study on measuring principle of adjusting gapped-core type automatic arc suppression device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (10): 25-27.
- [9] 陈芳靖, 陈忠仁, 桂存兵. 基于模块化结构的消弧接地一体化装置研制[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (23): 56-59. CHEN Fang-jing, CHEN Zhong-ren, GUI Cun-bing. Development of an incorporate device of arc-suppression coil and grounding fault line selection[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (23): 56-59.
- [10] 裴善鹏, 连鸿波, 李万彬, 等. 快速调匝式消弧线圈及接地选线一体化装置研究[J]. 现代电力, 2006, 23 (1): 20-24. PEI Shan-peng, LIAN Hong-bo, LI Wan-bin, et al. Research on the incorporate device of quick multi-tap arc-suppression coil and detection of earth fault feeder[J]. Modern Electric Power, 2006, 23 (1): 20-24.
- [11] 蔡旭, 李仕平, 杜永忠, 等. 变阻尼调匝式消弧线圈及接地选线装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (10): 85-90. CAI Xu, LI Shi-ping, DU Yong-zhong, et al. An integrated controller of multi-tap arc-suppression with variational damp and detection of earth fault feeder[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (10): 85-90.
- [12] 潘贞存. 消弧线圈自动跟踪补偿与接地选线定位技术的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006. PAN Zhen-cun. Study on auto-tuning of arc suppression coil and ground fault detection for non-effective grounded power system[D]. Jinan: Shandong University, 2006.

收稿日期: 2009-10-26; 修回日期: 2010-01-05

作者简介:

丛伟 (1978-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统继电保护与自动装置的研究; E-mail: weicon@sdu.edu.cn

李盼盼 (1983-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护装置开发研究;

李洪涛 (1965-), 男, 高级工程师, 从事电力系统运行工作。

(上接第 184 页 continued from page 184)

- ZHOU Sen, ZHENG Yu-ping, LIU Han, et al. Application of IEC60870-5-103 standard in the field of the testing of microprocessor-based protective relay[J]. Relay, 2005, 33 (23): 16-18.
- [2] 包文娟, 朱桂荣. 微机继电保护测试系统的研制[J]. 自动化与仪器仪表, 2006 (5): 66-68. BAO Wen-juan, ZHU Gui-rong. Development of computer relay protection test system[J]. Automation & Instrumentation, 2006 (5): 66-68.
- [3] 李刚毅, 金蓓弘. 自动化回归测试的技术和实现[J]. 计算机应用研究, 2006 (2): 186-189. LI Gang-yi, JIN Bei-hong. Techniques and realization of automated regression testing[J]. Application Research of Computer, 2006 (2): 186-189.
- [4] 李忠安, 沈全荣, 王言国, 等. 电力系统智能装置自动化测试系统的设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (8): 77-80. LI Zhong-an, SHEN Quan-rong, WANG Yan-guo, et al. Automated testing system for IED[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (8): 77-80.
- [5] 刘斌, 高小鹏, 陆民燕, 等. 嵌入式软件可靠性仿真测试系统研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26 (4): 490-493. LIU Bin, GAO Xiao-peng, LU Min-yan, et al. Study on reliability simulation testing system for embedded software[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26 (4): 490-493.
- [6] 张超, 廖碧莲. 继电保护测试技术现状及其发展[J]. 江西电力, 2006, 31 (5): 4-6. ZHANG Chao, LIAO Bi-lian. Status and developments of relay protection testing technology[J]. Jiangxi Electric, 2006, 31 (5): 4-6.
- [7] 赵志民, 秦立军, 刘世民, 等. 继电保护测试技术的现状与发展[J]. 现代电力, 2002, 19 (1): 43-48. ZHAO Zhi-min, QIN Li-jun, LIU Shi-min, et al. Status and development of relay protection testing technology[J]. Modern Electric Power, 2002, 19 (1): 43-48.
- [8] 高天德, 杨小丽. 基于配置文件的自动化测试软件设计方法[J]. 测控技术, 2009, 28 (6): 69-74. GAO Tian-de, YANG Xiao-li. Design of auto-test software based on configuration files[J]. Measurement & Control Technology, 2009, 28 (6): 69-74.

收稿日期: 2009-10-23; 修回日期: 2009-11-27

作者简介:

王治国 (1977-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护及自动化测试; E-mail: wzgnow@163.com

李兴建 (1977-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护仿真测试;

王言国 (1977-), 男, 系统分析师, 工程硕士, 研究方向为软件工程。