

# 基于 CT 饱和综合判据的变压器差动保护的研究

刘玉东<sup>1,2</sup>, 王增平<sup>2</sup>, 张志梅<sup>3</sup>, 张龙<sup>1,2</sup>

(1. 保定中力电力科技发展有限公司, 河北 保定 071000; 2. 华北电力大学, 河北 保定 071000;

3. 石家庄供电公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 介绍了一种新型的基于 CT 饱和综合判据的变压器比率制动差动保护方案。首先, 分析了比率制动差动保护的原理及算法; 其次, 在分析了谐波制动法、时差法和附加稳定区法的基础上, 得出了新型的 CT 饱和综合判据并分析了其优点; 再次, 给出了基于 CT 饱和综合判据的变压器差动保护的数值计算方法, 可有效减轻 CPU 的负担, 从而使程序运行更稳定; 最后利用动模试验验证了基于 CT 饱和综合判据的比率制动差动保护的可靠性与快速性, 并且验证了它在 CT 饱和延时闭锁差动保护期间可以快速反应变压器区内故障。

**关键词:** 变压器差动保护; CT 饱和; CT 饱和综合判据; 递推式快速傅里叶变换

## Study of transformer differential protection based on the CT-saturation-integrate-method

LIU Yu-dong<sup>1,2</sup>, WANG Zeng-ping<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-mei<sup>3</sup>, ZHANG Long<sup>1,2</sup>

(1. Baoding Zhongli Power Science and Technology Development Co., Ltd, Baoding 071000, China;

2. North China Electric Power University, Baoding 071000, China;

3. Shijiazhuang Power Supply Company, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** A new transformer differential protection is introduced. First, this paper analyzes scheme and arithmetic of transformer differential protection. Secondly, it puts forward the CT-Saturation-Integrate-Method and its merits based on harmonic restraint method, time difference method and additional restraint region method. Thirdly, it puts forward the numerical computation method of transformer differential protection. Finally, it tests the higher reliability and rapidness of the CT-Saturation-Integrate-Method dependent of experimentation of the dynamic model. Also, the method can identify the transformer's conversion fault rapidly while differential protection is blocked.

**Key words:** transformer differential protection; CT saturation; CT-saturation-integrate-method; recurrence formula of FFT

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)17-0001-04

## 0 引言

当前, 电力系统中的变压器主保护主要是差动保护。由于变压器差动保护在原理上依赖于变压器各侧的电流来区分内、外部故障, 因此电流互感器 (CT) 的转换精度成为差动保护能否正确反应变压器区内、区外故障的关键。近距离区外故障所产生的大穿越短路电流可能导致变压器保护各侧 CT 的饱和程度不一致, 从而产生较大的差流。虽然三段式比率制动特性曲线的上扬在大多数情况下可以躲过 CT 饱和带来的影响, 但是在严重情况下差动保护仍可能误动作。除此之外, 相邻变压器空投涌流中的非周期分量流过系统阻抗, 导致公共母线上电压的非周期波动, 引起该变压器产生和应涌流, 和应涌流中衰减较慢的非周期分量也可能引起电流互

感器局部暂态饱和, 导致差动保护误动作<sup>[1]</sup>。

针对比率制动变压器差动保护中的 CT 饱和, 国内外的研究机构与生产厂家广泛采取的措施主要有谐波制动法、时差法、附加稳定区法等。这几种 CT 饱和解决方案都能比较好地解决 CT 饱和的识别问题, 但都存在着各种各样的不足之处。本文给出一种新型的三段式比率制动差动保护方案, 在此基础上提出相对完善的 CT 饱和识别方法。

## 1 三段式比率制动差动保护方案

本文中介绍的变压器差动保护的比率制动特性如图 1 所示。横坐标  $I_r$  为制动电流, 纵坐标  $I_d$  为差动电流,  $I_{d0}$  为最小动作电流,  $I_{ic}$  为差动速断电流,  $K_1$  为比率制动第二段的斜率,  $K_2$  为比率制动第三段的斜率,  $I_{r1}$  为比率制动的第一个拐点制动电流,

$I_{r2}$  为比率制动的第二个拐点制动电流,  $I_{ra}$  为变压器区外故障引起 CT 饱和的最小制动电流, 曲线  $R$  为附加稳定区的边界线, 曲线  $F$  为故障特性曲线。

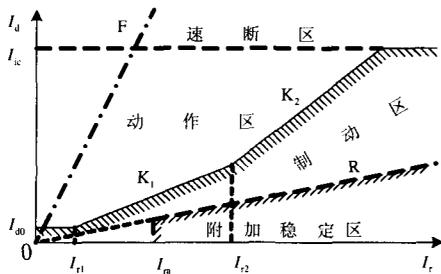


图 1 变压器差动保护比率制动特性

Fig.1 Percentage bias restraint of transformer differential protection

比率制动动作方程如式 (1):

$$\begin{cases} I_d \geq I_{d0} & I_r < I_{r1} \\ I_d \geq I_{d0} + K_1 \cdot (I_r - I_{r1}) & I_{r1} \leq I_r < I_{r2} \\ I_d \geq I_{d0} + K_1 \cdot (I_{r2} - I_{r1}) + K_2 \cdot (I_r - I_{r2}) & I_r \geq I_{r2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_d = \left| \sum_m I_m \right| \\ I_r = \frac{I_{\max} - \sum_k I_k}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $I_m$  为变压器各侧归算到基准侧的电流,  $I_{\max}$  为  $I_m$  中的最大电流,  $I_k$  为  $I_m$  中除  $I_{\max}$  外的各侧电流。

由式 (1) 可知, 制动电流的取法是将多侧差动等效为两侧差动, 以指向变压器为参考正方向。在变压器区外故障时制动电流很大, 数值上等于最大外部短路电流, 保证变压器差动保护可靠制动; 在内部故障时制动电流很小, 在理论上数值几乎为零, 增加了差动保护在内部故障时的灵敏度。这一点体现了式 (1) 中制动电流取法的优越性。

图 1 中, 增加第二段制动特性是为了进一步增强差动保护在区外发生严重故障时防止差动保护误动作的能力, 在一定程度上也可以防止差动保护因变压器发生区外故障时 CT 饱和而误动作。曲线  $R$  为附加稳定区的边界线, 即 CT 饱和判据中识别变压器区外故障的边界线。曲线  $F$  为故障特性曲线, 设此曲线的目的是为了能够在变压器发生区内故障时立即解除 CT 饱和延时闭锁。

图 1 中, 各定值的整定原则如下:

1) 最小动作电流  $I_{d0}$ , 即曲线无制动时的动作电流门槛, 按躲过变压器最大负荷条件下的不平衡电流整定:  $I_{d0} = K_{rel} \cdot I_{unb.0}$ , 其中  $I_{unb.0}$  为变压器最大负荷状态下, 实测差动保护中的不平衡电流,  $K_{rel}$  为可靠系数, 一般取 1.5 ~ 2.0。

2) 拐点制动电流  $I_{r1}$ 、 $I_{r2}$  配合使用, 一般取:  $I_{r1} = (0.8 \sim 1.0) I_n / n_a$ ,  $I_{r2} = (3.0 \sim 8.0) I_n / n_a$ , 其中,  $I_n$  为变压器额定电流,  $n_a$  为电流互感器变比。

3) 比率制动斜率  $K_1$ 、 $K_2$  的选取应兼顾变压器外部严重短路的可靠性和内部轻微匝间短路存在流出电流时的灵敏度, 一般取:  $K_1 = 0.2 \sim 0.4$ ,  $K_2 = 0.5 \sim 0.7$ 。

4) 变压器区外故障引起 CT 饱和的最小制动电流  $I_{ra}$ , 一般取为:  $I_{ra} = (5.0 \sim 8.0) I_n / n_a$ 。

5) 故障特性曲线  $F$  的斜率按照变压器发生区内故障时能够立即解除 CT 饱和延时闭锁来整定。由式 (1) 可知, 变压器发生区内故障时, 制动电流理论上几乎为零, 考虑到最大电流侧发生 CT 严重饱和, 即  $I_{\max}$  为零, 此时,  $F$  的斜率为  $I_d$  与  $I_r$  的比值, 为 2。所以  $F$  的斜率取为 2, 即可可靠解除 CT 饱和和对差动保护的闭锁。

6) 附加稳定区的边界线  $R$  的斜率, 按照可靠识别出变压器发生区外故障来整定, 取为比率制动斜率  $K_1$  的一半。

差动保护方案中有关 CT 饱和的部分可参考后面的论述。

## 2 可靠、快速的 CT 饱和综合判据

我们先来分析一下目前应用比较广泛的几种 CT 饱和识别方法。

判据 1: 谐波制动法。通过理论分析和试验得知, CT 饱和将出现大量的谐波分量电流, 主要为二次谐波分量和三次谐波分量。因此我们可以利用二、三次谐波与基波的比值来识别 CT 饱和。

变压器发生区内故障时, 故障电流中可能也会含有大量的谐波分量, 在此情况下谐波制动判据有 CT 饱和误识别的可能性, 此时差动保护将延迟动作。因此这种方法不能作为 CT 饱和识别的充分条件, 而 CT 饱和时必将出现大量的谐波分量又为 CT 饱和的识别提供了必要条件。

判据 2: 时差法。由于电感中的电流不能突变, 短路后 CT 的励磁电流上升达到铁心饱和需要一定的时间 ( $T/4 \sim T/2$ ,  $T$  为工频周期的时间), 在此之前 CT 能无误差地准确传变一次电流。在故障发生初始很短的一段时间内, CT 是未饱和的, 因此对

于区外严重故障差动保护动作时间和故障启动时间之间存在时间差,而区内故障,差动保护的動作和故障启动是基本同时的。由此我们采用时间差的方法可以识别 CT 饱和。由于时差法是应用于区外故障 CT 饱和与区内故障的明显的差别基础上的,因此时差法作为 CT 饱和识别的主判据毋庸置疑。

在工程实际应用中,由于精确选取识别 CT 饱和的时间差在理论上没有充分的依据,加之时间的精确测量也同样存在难度,因此,时差法不能百分之百识别出区外故障 CT 饱和。即时差法不宜作为 CT 饱和识别的必要条件。

判据 3: 附加稳定区法。变压器区外故障后,电流互感器不会立即饱和,此时电流互感器能正确反应一次电流。根据基尔霍夫电流定律计算变压器各侧电流得到的差动电流,在此期间基本平衡,仅会产生较小的不平衡电流,待电流互感器饱和以后才会产生很大的差动电流。根据这一特征,增加一附加稳定区(图 1 中曲线 R 下方阴影部分),它能正确区分出变压器区内故障与区外故障引起的 CT 饱和。

在变压器发生区内故障时,差动电流与制动电流同时沿着故障特性曲线增加并且最终落到动作区,差动保护将正确反应变压器内部故障;而在区外故障 CT 饱和时,在故障发生最初的 ( $T/4 \sim T/2$ ) 时间内,差动电流与制动电流首先落在附加稳定区内,在饱和特征出现以后差动电流与制动电流迅速向动作区移动并且最终落在动作区。因此可以利用这种差动电流与制动电流的变化轨迹来识别区外故障引起的 CT 饱和。与时差法一样,它可以作为 CT 饱和识别的主判据。

由于附加稳定区法依赖于经过零点的故障电流,因此在某些情况下不能快速识别 CT 饱和,如区外故障后故障电流不是立即经过零点,或者故障发生以前差动电流过小等原因均不能很好地快速识别 CT 饱和。因此附加稳定区法不宜作为 CT 饱和识别的必要条件。

考虑到以上三种判据的特点,我们可以将它们组合起来应用,得到 CT 饱和综合判据,用矩阵 Y 表示。Y 的元素 y1、y2 表示 CT 饱和判据的最终判别结果,布尔型整数 a、b、c 分别表示判据 1、判据 2、判据 3 的 CT 饱和判别结果,则 CT 饱和综合判据的数学表达式为式 (2):

$$Y = [y1 \quad y2] = [a \quad a] \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式 (2) 可知,当时差法和附加稳定区法两种

判据其中任一判据的输出结果为真,且谐波制动法的输出结果也为真,则综合判据的结果为真,即大电流特征被识别为区外故障 CT 饱和,而非区内故障。由此得知,在考虑了时差法和附加稳定区法的充分特性和谐波制动法的必要特性后,CT 饱和综合判据在最大限度内实现了冗余性与可靠性的完美统一。

当 CT 饱和综合判据识别出区外故障 CT 饱和时,闭锁差动保护 8 个周期。在上面对比率制动差动保护方案的论证中得知,变压器发生区内故障时制动电流很小,即使考虑到最大电流侧发生 CT 饱和这种最严重的情况,差动电流与制动电流的运行轨迹位于故障特性曲线以下区域的几率亦非常小。如果在差动保护被延时闭锁期间发生转换性故障,即差动电流与制动电流满足稳定地落在故障特性曲线以上的时间超过 1 个周期,CT 饱和延时闭锁立即被解除,差动保护快速正确动作。

### 3 比率制动差动保护方案中的数值计算

对于保护功能一体化的微机保护来说,比率制动方程式 (1)、CT 饱和综合判据式 (2) 计算工作量的多少尤为重要。我们采用的计算方法主要有以下几种:

1) 差动保护中矢量的计算是基于递推式快速傅里叶变换的。由于傅里叶变换的系数具有周期相等性,所以在一个采样间隔内只需计算一个采样值与系数的乘积,对上个采样间隔计算的结果进行叠加,即可计算出该通道交流量的基波分量或者其它单次谐波分量。

2) 变压器故障差动突变量启动判据需要实时计算差动电流的突变量,计算公式为式 (3)。这同时为时差法提供了差动启动电流的计算结果,为附加稳定区法提供了差动电流的计算结果。

$$\|I_{d(k)} - I_{d(k-N)}\| - \|I_{d(k-N)} - I_{d(k-2N)}\| > I_{ds} \quad (3)$$

式 (3) 中,  $I_{d(k)}$ 、 $I_{d(k-N)}$ 、 $I_{d(k-2N)}$  分别为当前采样点、前一周采样点、前两周采样点各侧瞬时值电流的差动电流;  $I_{ds}$  为差动电流突变量启动整定值。

3) 变压器故障突变量启动判据在每个采样间隔内实时计算各侧电流的突变量,计算公式为式 (4)。这也同时为时差法提供了故障启动电流的计算结果,为附加稳定区法提供了制动电流的计算结果。值得一提的是,我们采用的 CT 饱和综合判据中的制动电流为变压器各侧的最大电流,而非比率制动动作方程式 (1) 中的制动电流,以此来减少 CPU 的工作量。

$$\left| I_{(k)} - I_{(k-N)} \right| - \left| I_{(k-N)} - I_{(k-2N)} \right| > I_s \quad (4)$$

式(4)中,  $I_{(k)}$ 、 $I_{(k-N)}$ 、 $I_{(k-2N)}$ 分别为当前采样点、前一周采样点、前两周采样点各侧相电流的瞬时值;  $I_s$ 为相电流突变量启动整定值。

4) 由于2)、3)中提到的电气量的计算结果均为瞬时值, CT饱和综合判据的计算方法也是基于瞬时值的基础之上的。CT饱和综合判据需要在每个采样间隔内都得到实时计算, 才可以保证判据的快速性。由于瞬时值电流的差动电流与制动电流的关系是随着时间而变化的, 为了可靠利用瞬时值来识别变压器区外、区内故障, 我们采取了“ $N/3$ 取 $N/6$ ”(  $N=24$ , 一个工频周期的采样点数)的推理方法, 即在故障电流经过零点后增大的过程中, 我们连续计算 $N/3$ 个采样点, 其中存在任意 $N/6$ 个采样点, 满足差动电流与制动电流落在了图1中的附加稳定区内, 则我们推断发生了变压器区外故障。采取类似的方法可以推断出差动电流与制动电流在( $T/4 \sim T/2$ )的时间间隔内落在动作区内。此种模糊的推理方法可能不是很严谨, 但是它在正确识别出区外故障CT饱和的前提下减轻了计算量, 减小了综合判据应用于工程实际的难度。

通过对数值计算方法的简化与优化, CPU的负担明显减轻, 这保证了程序运行的稳定性。

#### 4 动模试验中比率制动差动保护的验证

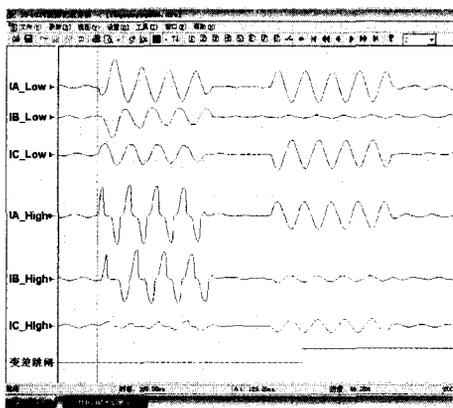


图2 变压器转换性故障动模试验录波图

Fig.2 Waveform of transformer's conversion fault

图2为变压器高压侧区外发生A、B两相接地短路导致CT饱和, 之后变压器高压侧区内发生A相接地故障的动模试验录波图。IA\_Low、IB\_Low、IC\_Low为变压器低压侧的三相电流, IA\_High、IB\_High、IC\_High为变压器高压侧的三相电流。此

动态模型变压器的接线方式为Y- $\Delta$ 11接线。

由图2可知, 在变压器高压侧区外发生A、B两相短路故障时, 高压侧的电流互感器发生明显的饱和现象。此时, 变压器差动保护没有因为差动电流过大而误动, 说明CT饱和综合判据在CT饱和和识别方面有效。在故障发生后130ms(差动保护被CT饱和判据延时闭锁期间), 发生变压器高压侧区内A相接地故障, 此时, 变压器差动保护快速动作, 没有受到CT饱和延时闭锁造成的影响。这些足以说明CT饱和综合判据在整套变压器差动保护方案中的作用都是有效的。

经过动模试验的多次合理验证之后, 采用此CT饱和综合判据的比率制动式变压器差动保护方案已成功应用于多套工程实际项目中。

#### 5 结论

变压器保护中, 比率制动差动保护的可靠性与灵敏性非常重要。CT饱和综合判据可快速、可靠地识别区外故障CT饱和, 并且可以在发生转换性区内故障时快速解除CT饱和对比率制动差动保护的延时闭锁。

#### 参考文献

- [1] 袁宇波, 李德佳, 陆于平, 等. 变压器和应涌流的物理机理及其对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 9-14.  
YUAN Yu-bo, LI De-jia, LU Yu-ping, et al. Physical Mechanism of Sympathetic Inrush of Transformer and Its Influence on Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 9-14.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] 袁季修, 盛和乐. 电流互感器的暂态饱和及应用计算[J]. 继电器, 2002, 30(2): 1-5.  
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le. The Transient Saturation of Current Transformer and Its Application Calculation[J]. Relay, 2002, 30(2): 1-5.
- [4] 李岩, 陈德树, 张哲, 等. 鉴别TA饱和的改进时差法研究[J]. 水利电力科技, 2002, 28(4): 34-38.  
LI Yan, CHEN De-shu, ZHANG Zhe, et al. Reearch of the Improved Time Difference Method to Distinguish Ta's Saturation[J]. Hydraulic and Electric Power Technology, 2002, 28(4): 34-38.
- [5] SEIMENS AG.7UT51 Numerical Differential Protection Relay Instruction Manual[Z]. SIEMENS, 1995.

(下转第21页 continued on page 21)

健康发展乃至整个国民经济的发展具有十分重要的意义。由于电力系统负荷的复杂性,存在着多种不确定性和难以解析描述的非线性,因此预测时不仅要求较高的精确性,还要求较强的鲁棒性、实时性和容错性。基于以上考虑,本文运用改进粒子群算法和 BP 算法相结合形成的混合算法(改进 PSO-BP 算法)来训练神经网络,并对某地区短期电力负荷进行预测。实例结果表明,运用该方法能有效提高电力负荷预测的准确性和有效性,具有较好的工程应用价值和实际指导意义。

### 参考文献

- [1] Vila J P,Wagner V,Neveu P.Bayesian Nonlinear Model Selection and Neural Network:a Conjugate Prior Approach[J].IEEE Trans on Neural Networks,2000,11(2): 265-278.
- [2] Senjyu T,Takara H,Funabashi T.One-hour-ahead Load Forecasting Using Neural Network[J].IEEE Trans on Power Systems,2002,17(1):113-118.
- [3] Kim K H,Youn H S,Kang Y C.Short-term Load Forecasting for Special Days in Anomalous Load Conditions Using Neural Networks and Fuzzy Inference Method[J].IEEE Trans on Power Systems,2000,15(2): 559-565.
- [4] 鲍正江,胡海兵.一种基于神经网络的电力负荷预测方法[J].浙江电力,2004,23(4):10-12.  
BAO Zheng-jiang,HU Hai-bing.An Electric Load Forecast Method Based on the Neural Network[J]. Zhejiang Electric Power,2004,23(4):10-13.
- [5] 姚李孝,姚金雄,李宝庆,等.基于竞争分类的神经网络短期电力负荷预测[J].电网技术,2004,28(10):45-48.

- YAO Li-xiao,YAO Jin-xiong,LI Bao-qing,et al.Short-time Load Forecasting Using Neural Network Based on Competitive Learning Classification[J].Power System Technology,2004, 28(10):45-48.
- [6] 卫志农,王丹,孙国强,等.基于级联神经网络的短期负荷概率预测新方法[J].电工技术学报,2005,20(1):95-98.  
WEI Zhi-nong,WANG Dan,SUN Guo-qiang,et al.A Novel Method of Short Time Load Probability Forecasting Based on Cascaded Neural Network[J]. Transactions of China Electro Technical Society,2005,20(1):95-98.
- [7] 张红梅,卫志农,等.基于粒子群支持向量机的短期电力负荷预测[J].继电器, 2006,34(3):28-31.  
ZHANG Hong-mei,WEI Zhi-nong,et al. A Short-term Load Forecasting Approach Based on PSO Support Vector Machine[J]. Relay, 2006,34(3):28-31.
- [8] 康重庆,夏清,张伯明.电力系统负荷预测研究现状与发展方向的探讨[J].电力系统自动化,2004,28(17):1-11.  
KANG Chong-qing,XIA Qing,ZHANG Bo-ming.Power System Load Forecasting:Current Status and Future Prospects[J].Automation of Electric Power Systems,2004, 28(17):1-11.
- [9] 姜勇.电力系统短期负荷预测的模糊神经网络方法[J].继电器,2002,30(7):11-13.  
JIANG Yong.Fuzzy Neural Network for Short-term Load Forecasting[J].Relay,2002,30(7):11-13.

收稿日期:2007-02-27; 修回日期:2007-04-02

作者简介:

乔维德(1967-),男,副教授,研究方向为智能控制等。

E-mail:qwd@cztvu.com

(上接第4页 continued from page 4)

- [6] 沈全荣,严伟,梁乾兵,等.异步法电流互感器饱和判别新原理及其应用[J].电力系统自动化,2005, 29(16): 84-86.  
SHEN Quan-rong, YAN Wei, LIANG Qian-bing, et al. Asynchronous Method for the Recognition of Current Transformer Saturation and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 84-86.

(上接第16页 continued from page 16)

LIU Jian, GOU Xin-peng, XU Jing-qiu, et al. Short-term Load Forecasting of Distribution Networks Based on Partition Loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003,27(19):34-37.

收稿日期:2007-02-01; 修回日期:2007-06-22

作者简介:

刘玉东(1978-),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为电力系统继电保护及相关领域; E-mail: vip.yudongliu@163.com

王增平(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统自动化微机保护方向的研究与教学工作;

张志梅(1980-),女,硕士,主要从事电力系统继电保护和电网调度工作。

罗滇生(1971-),男,博士,副教授,主要研究领域为电力市场理论研究及应用、电力系统在线监测;E-mail: hhylds@sohu.com

肖伟(1983-),男,硕士研究生,主要研究领域为电力市场理论研究及应用;

何洪英(1976-),女,博士,主要从事智能信号处理技术在电力系统中的应用等方面的研究。

收稿日期:2007-03-03; 修回日期:2007-05-09

作者简介: