

# 特高压长线路电流差动保护自适应电容电流补偿方法

桑丙玉<sup>1,2</sup>, 王晓茹<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 国网电力科学研究院, 江苏 南京 210061)

**摘要:** 分析了线路电流差动保护中两端各补偿一半电容电流的传统补偿方法, 指出该方法在区内故障时存在受故障点影响补偿不精确、降低灵敏度的缺点。提出了一种自适应电容电流补偿方法, 在保证相同的区外故障可靠性基础上, 大大提高了区内故障的灵敏度。对一条 1000 kV 线路故障和电流差动保护进行了仿真试验, 证明该自适应补偿方法的有效性和正确性, 适合作为特高压输电线路电流差动保护电容电流补偿方法。

**关键词:** 特高压; 电流差动; 电容电流; 自适应补偿; 灵敏度

## Adaptive compensation scheme of capacitance current to differential protection in UHV lines

SANG Bing-yu<sup>1, 2</sup>, WANG Xiao-ru<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210061, China)

**Abstract:** The traditional capacitance current compensation is influenced by different fault locations and has lower sensitivity when internal faults occur in one end. An improved adaptive compensation scheme is proposed in this paper. The scheme combines the traditional compensation with compensation utilizing fault distance. The performances of two compensations are compared in the analytical way, showing that, when they have same security on external faults, the improved one has higher sensitivity when internal fault in one end. According to the simulations on the faults and the two compensations in a 1000 kV line, the results verify that the proposed method has achieved a great improvement on sensitivity of internal faults. It is a proper capacitance current compensation scheme for UHV transmission lines.

**Key words:** UHV; current differential; capacitance current; adaptive compensation; sensitivity

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)08-0001-05

## 0 引言

超(特)高压长线的分布电容电流一直是影响电流差动保护性能的主要因素, 随着我国晋东南-荆门 1 000 kV 特高压线路的出现, 这个问题更突出<sup>[1-4]</sup>。目前, 减少分布电容电流影响的方法主要有三种<sup>[5-10]</sup>: (1) 并联电抗器。并联电抗器通常采取欠补偿方式, 只能补偿部分稳态电容电流。(2) 电容电流补偿算法。目前, 克服线路分布电容电流影响的主要方法是通过电容电流稳态或时域补偿方法来做一定的弥补。(3) 采用差动保护新原理。许多文献在理论上提出了耐受、甚至不受电容电流影响的差动保护新原理。由于实际电力系统中对继电保护可靠性要求很高, 新原理的实践应用还需要长时间的研究。

由于特高压输电线路的特殊结构和对继电保护性能的更高要求, 对目前应用于超高压输电线路上的电流差动保护及其电容电流补偿方法在特高压输电线路上的应用需要作进一步研究。

本文针对传统的电容电流补偿方法在区内故障时受故障点影响补偿不精确, 灵敏度低的缺点, 提出了一种改进的自适应电容电流补偿方法, 相比较传统的电容电流补偿方法, 该方法有相同的区外故障安全性, 在区内相同的短路故障条件下, 在送电端和受电端都有更好的补偿效果, 灵敏度提高。对一条 1 000 kV 线路故障时的保护行为进行的 EMTDC 仿真实验, 证明了该补偿方法的正确性和有效性。

## 1 传统电容电流补偿方法分析

目前已提出的电容电流补偿方法, 无论是稳态补偿还是暂态补偿, 都是取全线路等值电容的一半和对应的工频或暂态电压进行计算的。下面以工频稳

基金项目: 教育部直属高校聘请外籍教师重点资助项目

态量差动保护判据为例，分析其存在的缺陷。

常用数字式电流差动保护判据为<sup>[5]</sup>：

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > I_0 \quad (1)$$

$$|\dot{I}_m + \dot{I}_n| > k |\dot{I}_m - \dot{I}_n| \quad (2)$$

式中： $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$  分别为线路两端m侧、n侧的分相电流相量(以母线流向线路为正)； $I_0$  是动作门槛值； $k$  是制动系数，一般取  $0 < k < 1$ 。式(1)为辅助判据，式(2)为主判据，两式同时成立时，保护动作于跳闸。

稳态电容电流半补偿式为<sup>[6]</sup>：

$$\dot{I}_{cm} = (\dot{U}_{m\phi} - \dot{U}_{m0}) \frac{\omega c_1 l}{2j} + \dot{U}_{m0} \frac{\omega c_0 l}{2j} \quad (3)$$

式中： $\dot{I}_{cm}$  为m侧补偿电流； $\dot{U}_{m\phi}$ 、 $\dot{U}_{m0}$  对应于m侧测得的相电压及零序电压； $c_1$ 、 $c_0$  分别为线路单位长度的正序、零序电容； $l$  为线路长度。因此，式(1)、式(2)判据中的 $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$  为保护实际测得的电流相量加上相应侧补偿电流值。

如图1所示系统接线图， $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$  为线路两侧测得的电流， $\dot{I}'_m$ 、 $\dot{I}'_n$  为经过电容电流补偿的两侧电流。

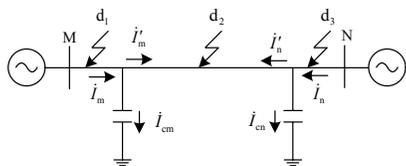


图1 线路图

Fig.1 Graph of the system

正常运行和区外故障时，如图2的相量图所示， $\dot{I}_m$ 、 $\dot{I}_n$  大小基本相等，相位差小于  $180^\circ$ ， $(\dot{I}_m + \dot{I}_n)$  为一容性差流，即线路的分布电容电流  $\dot{I}_c$ 。 $\dot{I}_c$  超前  $(\dot{U}_m + \dot{U}_n) 90^\circ$ ，利用式(3)补偿的电流  $\dot{I}_{cm}$ 、 $\dot{I}_{cn}$  大小基本相等，夹角为两端电压的相角差，补偿后的两侧电流  $\dot{I}'_m$ 、 $\dot{I}'_n$  大小接近相等，相位接近  $180^\circ$ ，能可靠不动作。

区内中点附近故障时，两端应补偿的电容电流大致等于一半线路长度的电容电流，符合式(3)，补偿的电容电流大小基本相等，夹角仍为两端电压相角差，补偿后的两端电流夹角基本不变，但值都增大了，所以相加后动作量变大，灵敏度提高，如图3(b)相量图所示。

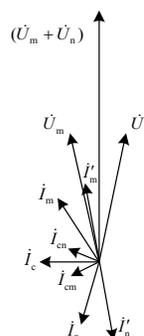


图2 正常运行和区外故障时的相量图

Fig.2 Phasor graph of normal operation and external fault

当区内故障点偏在一端时，近故障端应补偿的电容电流小，远故障端应补偿的电容电流大，若仍然按照式(3)线路等值电容的一半进行补偿，就会使近故障端补多了，远故障端补少了，尤其在区内出口处故障时，传统的半补偿方式在远故障端补偿的电容电流仅为应补偿电容电流的一半，会造成很大的误差，下面分析这种误差对灵敏度的影响。

当m端出口发生金属性短路时(假定负荷电流由m侧流向n侧)，m端故障相电压接近0，应补偿的电容电流几乎为0，利用式(3)计算出电容电

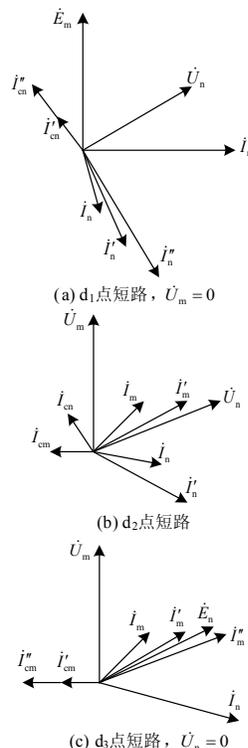


图3 线路内部故障时的相量图

Fig.3 Phasor graph of internal fault

流接近 0, 对 m 端的影响不大。而 n 端应补偿的电容电流应是线路全部长度的电容电流  $\dot{I}_{cn}''$ , 式 (3) 计算出的补偿电容电流  $\dot{I}'_{cn}$  仅为应当补偿的一半, 所得补偿后的电流  $\dot{I}'_n$  幅值增加较小, 角度和  $\dot{I}_m$  相差仍很大, 相加后动作量小, 灵敏度低。如果补偿全部的电容电流  $\dot{I}_{cn}''$ , 补偿后的电流  $\dot{I}_n$  幅值增大, 和  $\dot{I}_m$  夹角也变小, 相加后动作量变大, 灵敏度提高, 如图 3 (a) 的相量图所示。

如果故障发生在 N 端, 如图 3 (c) 的相量图所示, 可以得出相同的结论。

从上面的分析可得出: 正常运行和区外故障时, 传统半补偿方式效果很好, 保证了可靠性。当线路内部发生故障时, 传统半补偿方式受故障点影响非常大, 补偿很不准确, 故障点偏向一端时补偿后两端电流夹角仍很大, 灵敏度低, 很难满足特高压快速切除故障的要求。

## 2 自适应电容电流补偿方法

针对传统补偿方法在区内故障灵敏度低的缺点, 提出了一种自适应电容电流补偿方法, 在保证区外故障安全性的基础上, 大大提高了区内故障的灵敏度。自适应电容电流补偿式如下:

$$\begin{cases} \dot{I}_{cm} = [(\dot{U}_{m\phi} - \dot{U}_{m0}) \frac{\omega c_1}{2j} + \dot{U}_{m0} \frac{\omega c_0}{2j}] l_m \\ \dot{I}_{cn} = [(\dot{U}_{n\phi} - \dot{U}_{n0}) \frac{\omega c_1}{2j} + \dot{U}_{n0} \frac{\omega c_0}{2j}] (l - l_m) \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 中:  $l_m$  为 m 端需补偿的线路长度, 其他量定义同式 (3)。自适应补偿的思想是: 在正常运行和区外故障时,  $l_m$  取  $l/2$ , 和传统补偿的可靠性相同; 区内故障时,  $l_m$  取测距公式计算出的值, 实现更精确的补偿, 提高灵敏度。下面分析如何实现  $l_m$  的自适应取值。

所利用的测距公式如下:

$$\begin{cases} Z_{m\phi_1\phi_2} = \frac{\dot{U}_{m\phi_1} - \dot{U}_{m\phi_2}}{\dot{I}_{m\phi_1} - \dot{I}_{m\phi_2}} \\ Z_{n\phi_1\phi_2} = \frac{\dot{U}_{n\phi_1} - \dot{U}_{n\phi_2}}{\dot{I}_{n\phi_1} - \dot{I}_{n\phi_2}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} Z_{m\phi} = \frac{\dot{U}_{m\phi}}{\dot{I}_{m\phi} + KI_{m0}} \\ Z_{n\phi} = \frac{\dot{U}_{n\phi}}{\dot{I}_{n\phi} + KI_{n0}} \end{cases} \quad (6)$$

$\dot{U}_{m\phi}, \dot{U}_{n\phi} (\phi=A, B, C)$  分别为 m、n 端相电压,  $I_{m\phi}, I_{n\phi}$  分别为 M、N 端相电流。式 (5) 为相间短路测量阻抗计算公式, 式 (6) 为接地短路测量阻抗计算公式 (为减小过渡电阻对测距的影响, 取测量阻抗的电抗值计算距离)。

m 端采集本端的三相电压和电流, 同时接收对端的三相电压和电流, 分别求出两端的零序电流值, 流程图如图 4 所示。

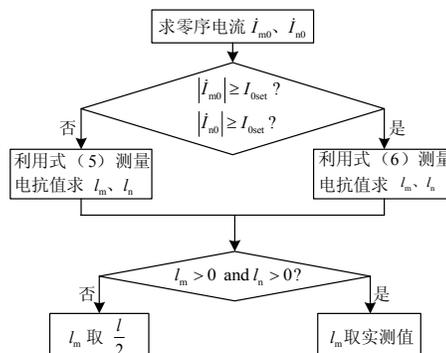


图4 自适应补偿流程图

Fig.4 Flow chart of self-adaptive compensation

图 4 的可行性分析: 首先用零序电流判断采用接地测量值计算还是相间测量值计算; 判断出来后, 三相都用相同的公式计算距离, 再根据不同的测距结果对各相采用不同的补偿值。正常运行和区外故障时, 零序电流小于门槛值, 三相都用相间公式计算距离, 两端电压基本相同, 两端电流方向相反,  $l_m, l_n$  一正一负, 用  $l/2$  值补偿, 可靠性不变。区内故障时, 假设发生 A 相接地故障, 零序电流大于门槛值, 三相都用接地公式计算距离, 对于故障 A 相, 因为是区内故障, 测出的  $l_m, l_n$  都为正, A 相就采用实测值进行补偿, 灵敏度提高; 而对于 B、C 相属于区外故障, 测出的  $l_m, l_n$  一正一负, 就代入  $l/2$  值补偿, 可靠性不变。区外出口和区内出口处金属性接地故障时, 若接地点与中性点间电阻为零, 则故障相电压降为 0, 此时近故障端测距值都为 0, 这种情况下测距值无法反映区内外故障, 仍需采用传统的补偿方法, 利用差动判断故障。

## 3 两种补偿方法的性能比较

### 3.1 安全性比较

在正常运行和区外故障时, 用的仍是传统的半补偿方法, 可靠性和原来相同。

### 3.2 区内金属性故障的灵敏度比较

区内金属性故障时, 测距值比较精确, 由第 1 节的分析知道, 利用实际故障点距离计算出的电容

电流值符合实际，补偿很准确，灵敏度比传统补偿提高了。唯一不同的是区内出口处金属性接地故障且接地点与中性点间电阻为零时，采用传统补偿方法，灵敏度和原来相同。

### 3.3 区内带过渡电阻故障的灵敏度比较

因为采用电抗值测距，在一定程度上减少了过渡电阻的影响，在小过渡电阻接地故障时，测距值能够反映故障点的偏向，灵敏度比传统的高。高阻接地故障时，传统的电流差动保护判据本身已不能满足灵敏度要求<sup>[9]</sup>，可将文献[10]中的专门针对高阻接地故障的判据和本文改进补偿后的全电流差动判据相结合。

## 4 仿真验证

用 EMTDC 建立 1 000 kV 双电源单回输电线路仿真模型，线路模型采用分布参数的贝瑞隆模型，线路参数来自晋东南-荆门特高压示范工程试验参数<sup>[11]</sup>，具体参数见图 5。

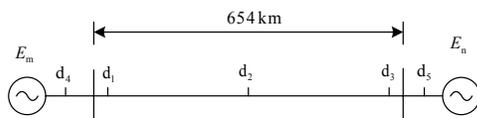


图 5 仿真线路参数和模型

Fig.5 Parameters and model of simulation line

$$r_1 = 0.0758 \ \Omega/\text{km}, l_1 = 0.8392 \ \text{mH}/\text{km}, c_1 = 0.01397 \ \mu\text{F}/\text{km},$$

$$r_0 = 0.1542 \ \Omega/\text{km}, l_0 = 2.644 \ \text{mH}/\text{km}, c_0 = 0.009296 \ \mu\text{F}/\text{km}$$

设传统补偿方法补偿后保护动作为  $I_{d1}$ ，制动量为  $I_{set1}$ ，动作系数  $K_1 = I_{d1} / I_{set1}$ ；本文提出的自适应补偿方法补偿后动作为  $I_{d2}$ ，制动量为  $I_{set2}$ ，动作系数  $K_2 = I_{d2} / I_{set2}$ 。

### 4.1 区外故障

区外 0.4 s 发生故障， $K_1$ 、 $K_2$  如图 6 所示。

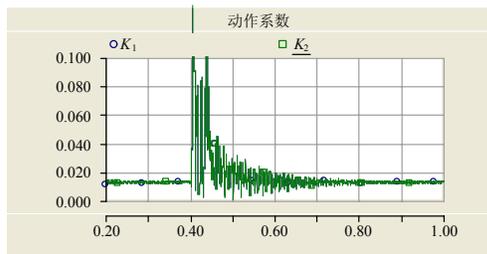


图 6 区外故障的动作系数

Fig.6 Acting quotiety of external fault

两种补偿方法在正常运行和区外故障时的可靠性完全相同。由于两种方法都是基于稳态补偿，在区外故障的暂态过程中动作系数变化很大，可能会

引起保护误动。

### 4.2 区内金属性故障

设线路 mn 内部在 0.4 s 发生金属性接地短路，在不同的短路点  $K_1$ 、 $K_2$  的值如图 7 所示。

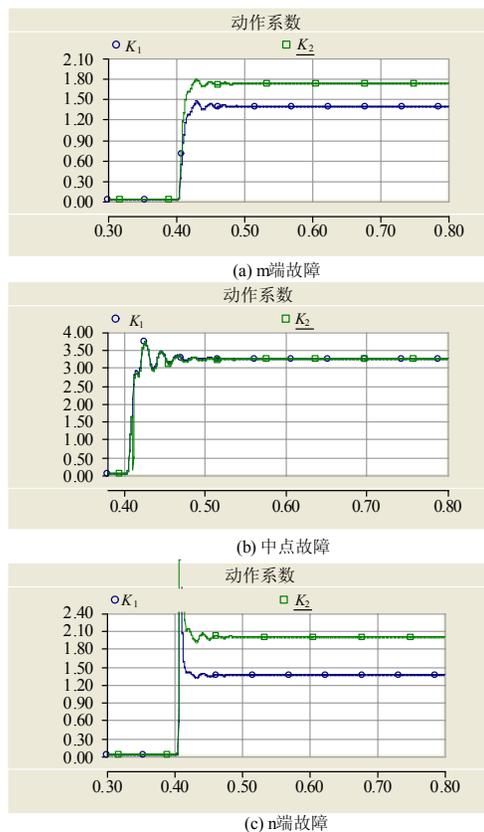


图 7 区内金属性故障的动作系数

Fig.7 Acting quotiety of internal fault without resistance

表 1 给出了区内不同点故障时  $K_1$ 、 $K_2$  的值。

表 1 区内不同点故障的动作系数比较

Tab.1 Acting quotiety of different internal fault location

故障点	送电端 10% 处	送电端 60% 处	送电端 90% 处
$K_1$	1.39	2.02	1.83
$K_2$	1.72	2.79	2.45

由图 7 和表 1 可以看出，中点故障时，改进补偿和传统半补偿的动作系数相同，即灵敏度相同，说明金属性故障时测距很准确；在送电端和受电端故障时，改进的补偿方法由于采用实测距离进行补偿，比较精确，灵敏度得到提高。

### 4.3 区内带过渡电阻故障

表 2 给出了区内不同点带不同过渡电阻短路时的动作系数。

表 2 区内带过渡电阻故障的动作系数比较

Tab.2 Acting quotiety of internal fault with different resistance

故障点	送电端			中点			受电端		
	R/Ω	60	100	200	60	100	200	60	100
$K_1$	1.27	1.25	0.9	3.1	2.7	1.7	1.79	1.62	1.43
$K_2$	1.61	1.34	0.77	3.0	2.6	1.4	2.15	1.97	1.36

由表2可以看出, 在小过渡电阻情况下, 测距比较准确, 改进补偿的灵敏度和传统补偿差不多, 有时还高于传统的灵敏度。在送电端过渡电阻为200 Ω 时, 传统的差动保护判据本身已不能满足灵敏度要求, 这也验证了文献[9]中送电端可带过渡电阻非常小的分析。所以高阻接地故障时, 应配合其他的保护判据一起使用。

### 5 结论

理论分析和仿真结果表明: 特高压长线路发生区内故障时, 传统的稳态补偿方法由于采用固定的电容值计算补偿电流, 受故障点的影响很大, 当故障偏向一端时, 补偿不准确, 影响差动保护的灵敏度。本文提出的自适应补偿方法将实测值和固定值相结合, 正常运行和区外故障时采用传统的固定补偿, 可靠性和原来完全相同; 区内故障时根据故障位置不同自适应计算电容电流值进行补偿, 区内中点处故障时灵敏度和原来相同, 区内非中点处故障时灵敏度得到提高, 可以作为于特高压长线路电流差动保护的电容电流补偿措施。

### 参考文献

[1] 沈晓凡, 粟小华, 周春霞. 750 kV 输电线路对继电保护的影响[J]. 电力设备, 2006(1): 18-19.  
SHEN Xiao-fan, SU Xiao-hua, ZHOU Chun-xia. Influence of 750 kV Transmission Line on Protection[J]. Electrical Equipment, 2006 (1): 18-19.

[2] 李瑞生, 索南加乐. 750 kV 输电线路的特殊问题及其对线路保护的影响[J]. 继电器, 2006, 34(3): 1-4.  
LI Rui-sheng, SUONAN Jia-le. The Special Problems of 750 kV Transmission Line and Its Influences on Relay Protection[J]. Relay, 2006, 34(3): 1-4.

[3] 陈德树, 唐萃, 尹项根, 等. 特高压交流输电继电保护及相关问题[J]. 继电器, 2007, 35(5):1-3.  
CHEN De-shu, TANG Cui, YIN Xiang-gen, et al. Special Issues and Suggestion on Protective Relaying Applied in UHV Transmission Line[J]. Relay, 2007, 35(3): 1-3.

[4] 贺家李, 李永丽, 李斌, 等. 特高压输电线路继电保护配置方案(二)保护配置方案[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 1-6.  
HE Jia-li, LI Yong-li, LI Bin, et al. Relay Protection for UHV Transmission Lines Part Two Disposition of Relay

Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 1-6.

[5] 伍叶凯, 邹东霞. 电容电流对差动保护的影响及补偿方案[J]. 继电器, 1997, 25(4): 4-8.  
WU Ye-kai, ZOU Dong-xia. The Influence of Capacitance Current to Differential Protection and Its Compensation Scheme[J]. Relay, 1997, 25(4): 4-8.

[6] 索南加乐, 张悛宁, 齐军, 等. Π模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(5): 12-18.  
SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Study of Current Differential Protection Using Time-domain Capacitive Current Compensating Algorithm on Π-model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18

[7] 吴通华, 郑玉平, 朱晓彤. 基于暂态电容电流补偿的线路差动保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 61-67.  
WU Tong-hua, ZHENG Yu-ping, ZHU Xiao-tong. Current Differential Protection Based on Transient Capacitance Current Compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 61-67.

[8] 郭征, 贺家李. 输电线纵联差动保护的新原理[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 1-5.  
GUO Zheng, HE Jia-li. Novel Principle of Pilot Differential Relay Protection of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 1-5.

[9] 汤俊, 王晓茹. 反应重负荷下高阻故障的稳态量线路差动保护判据[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 72-77.  
TANG Jun, WANG Xiao-ru. Current Differential Protection Criterion Using Steady Currents for Heavy-load Line with High Fault Resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 72-77.

[10] 索南加乐, 刘凯, 张悛宁. 基于电阻性差流的差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 45-49.  
SUONAN Jia-le, LIU Kai, ZHANG Yi-ning. New Principle of Differential Protection Based on the Resistance Component of Differential Current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 45-49.

[11] Xu Z Y, Du Z Q, Ran L, et al. A Current Differential Relay for a 1000 kV UHV Transmission Line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007: 1392-1399.

收稿日期: 2009-05-26; 修回日期: 2009-11-20

作者简介:

桑丙玉 (1983-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统保护; E-mail: sbyu5920@163.com

王晓茹 (1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护和安全稳定控制、变电站自动化技术方面的教学与研究工作。