

# 继电保护技术的新进展

葛耀中 西安交通大学电气工程学院 (710049)

**【摘要】** 电力系统继电保护技术的发展方兴未艾。将近一个世纪以来,它已经历了三个发展阶段、两次飞跃。在简要回顾继电保护技术发展史的基础上,介绍了继电保护技术的新进展,其中包括有:利用故障分量的继电保护,自适应继电保护,小波变换与继电保护, GPS 在继电保护中的应用。

**【关键词】** 继电保护 故障分量 自适应保护 小波变换 全球卫星定位系统 (GPS)

## 1 概论

与当代新兴科学技术相比,电力系统继电保护是相当古老了,然而电力系统继电保护作为一门综合性科学又总是充满青春活力,处于蓬勃发展中。之所以如此,是因为它是一门理论和实践并重的科学技术,又与电力系统的发展息息相关。它以电力系统的需要作为发展的泉源,同时又不断地吸取相关的科学技术中出现的新成就作为发展的手段。电力系统继电保护技术的发展过程充分地说明了这一论点。

首先让我们简要地回顾一下继电保护的技术发展史<sup>[1]</sup>。随着电力系统的出现,继电保护技术就相伴而生。在19世纪末已开始利用熔断器防止在发生短路时损坏设备,建立了过电流保护原理,1905~1908年研制出电流差动保护,自1910年起开始采用方向性电流保护,于19世纪20年代初生产出距离保护,在30年代初已出现了快速动作的高频保护。由此可见,从继电保护的基本原理上看,到本世纪20年代末现在普遍应用的继电保护原理基本上都已建立,迄今在保护原理方面没有出现突破性发展。从实现保护装置的硬件看,从1901年出现的感应型继电器至今大体上经历了机电式、整流式、晶体管式、集成电路式、微型计算机式等发展阶段。纵观继电保护将近100年的技术发展史可以看出,虽然继电保护

的基本原理早已提出,但它总是在根据电力系统发展的需要,不断地从相关的科学技术中取得的最新成果中发展和完善自身。总的看来,继电保护技术的发展可以概括为三个阶段、两次飞跃。三个阶段是机电式、半导体式、微机式。第一次飞跃是由机电式到半导体式,主要体现在无触点化、小型化、低功耗。第二次飞跃是由半导体式到微机式,主要在数字化和智能化。显而易见,第二次飞跃有着尤为重要的意义,它为继电保护技术的发展开辟了前所未有的广阔前景。当前正面临第二次飞跃的大好机遇,因此应该立足于充分发挥微机保护的智能作用,根据电力系统发展的需要,利用相关技术的新成就,把继电保护技术提高到一个更高的水平。

## 2 利用故障分量的继电保护<sup>[2]</sup>

故障信息的识别、处理和利用是继电保护技术发展的基础。30年代以来在电力系统的发展对继电保护不断提出的新的要求的条件下,在继电保护技术中广泛而成功地应用了故障时出现的负序和零序对称分量。60年代以来开展了暂态行波用于保护的研究,开辟了继电保护技术中利用故障暂态信息的新途径。上述情况表明,不断发掘和利用新的故障信息对继电保护技术的进一步发展有着十分重要的意义。计算机在继电保护中的应用为识别和获取故障信息创造了前所未有的有利条件,反映故障信息的故障分量的成功应用,促进了继电

保护技术的进一步发展。

### 2.1 故障分量

故障分量是故障信息的具体表现，在图 1 中示出系统故障状态的分解。发生故障的网络所处的状态（图 1 (a)）称为故障状态，利用叠加原理，故障状态又可分解为非故障状态（图 1 (b)）和故障附加状态（图 1 (c)）。非故障状态包括正常运行、系统振荡、两相运行等，电压  $\dot{U}_F$  是假定故障点 F 处无故障时该点

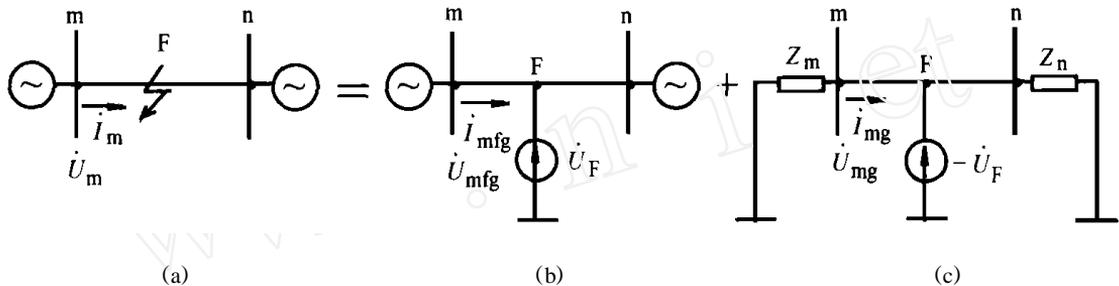


图 1 系统故障状态的分解图

的电压。由图 1 可得

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{mfg} + \dot{U}_{mg} \quad (1)$$

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{mfg} + \dot{I}_{mg} \quad (2)$$

式中故障附加状态（图 1 (c)）中所出现的  $\dot{U}_{mg}$ 、 $\dot{I}_{mg}$  即为故障分量，其中包含的只是故障信息，因此故障附加状态可以作为分析、研究故障分量的依据，由此可以得出，故障分量具有以下主要特征：

(1) 非故障状态下不存在故障分量的电压、电流，故障分量只在系统故障时才出现。

(2) 故障分量独立于非故障状态，但仍受系统运行方式的影响。

(3) 故障点的电压故障分量最大，系统中性点处为零。

(4) 保护装设处的电压、电流故障分量之间的相位关系由保护装设处到系统中性点之间阻抗决定，不受系统电势和短路点过渡电阻的影响。

故障分量中包括有稳态和暂态分量，二者都是可以利用的。

### 2.2 故障分量的获取方法

由式 (1)、(2) 可知，故障分量的电压、电流可表示为

$$\dot{U}_{mg} = \dot{U}_m - \dot{U}_{mfg} \quad (3)$$

$$\dot{I}_{mg} = \dot{I}_m - \dot{I}_{mfg} \quad (4)$$

在非故障状态中不存在的负序、零序分量的条件下，可以认为  $\dot{U}_{mfg} = \dot{I}_{mfg} = 0$ ，因此，负序和零序分量的电压、电流可以直接由保护装设处的电压、电流  $\dot{U}_m$ 、 $\dot{I}_m$  中用对称分量滤波器得到，此外，如欲获得正序电压、电流或相电压、电流时的故障分量则必须按式 (3)、(4) 所示的方法提取。

目前在微机保护中广泛采用式 (5) 所示的算法提取故障分量

$$i_g(t) = i(t) - (-1)^n i(t - nT/2) \quad (5)$$

式中  $i_g(t)$  —故障分量电流；

$i(t)$  —实测的故障电流；

$T$  —工频周期；

$n = 1, 2, \dots$

上述算法虽不十分严格和精确，但基本上能满足实用要求，且简单易行，例如当  $n = 1$  时，即用相邻的两个半周波的对应采样值相加；当  $n = 2$  时，则用相邻两个周波的对应采样值相减。应该注意的问题是，利用式 (5) 只能得到短时的故障分量，当  $n = 1$  时，故障分量持续半个周波； $n = 2$  时，故障分量输出 1 个周波。

### 2.3 故障分量在微机保护中的应用

由于故障分量可以确切地反映故障信息，因此可以在继电保护技术中应用于识别故障。迄今，故障分量在微机保护中已用于起动元件、方向元件、距离保护、差动保护和利用通道的纵联保护中，对提高保护的性能指标起到显著的作用。

故障分量在微机保护中的应用虽然已经取

得令人注目的效果,但仍存在一些有待深入研究解决的问题。主要问题之一是寻求更为精确地获取故障分量的方法。由式(5)可见,目前广泛采用的算法只有在工频周期不变的条件下,才是准确的,在正常运行条件下发生故障,一般可以得到满意的结果。当电力系统出现振荡时,由于电压、电流的幅值和频率均处于不断变化中,因此在这种非故障状态下也会出现较大的  $i_g(t)$ ,从而使这种方法失效。文献<sup>[5]</sup>应用自适应预测与控制理论与方法在振荡情况下有效地获得故障分量。此外,如何在重复性故障的条件下获取故障信息还是一项有待进一步研究解决的课题。

### 3 自适应继电保护

自适应继电保护是本世纪80年代提出的一个较新的研究课题。自适应继电保护可以定义为能根据电力系统运行情况和故障状态的变化而实时改变保护原理、性能、特性、定值的保护。自适应保护的提出,引起了人们极大的关注和兴趣。

事实上,传统的继电保护也力图适应系统运行方式的变化和故障状态,在传统的保护中也有许多自适应性能,例如过电流保护的反时限特性,差动保护中的制动特性,在距离保护中考虑了转换性故障及防止系统振荡误动的方法等。由此可见,自适应保护并不是一个新提出的概念,但是现在又强调这一研究课题却具有重要理论和实用意义。因为计算机及相关技术在继电保护中的应用为自适应继电保护的发展提供了前所未有的良机。

十余年来,微机保护在国内外取得了迅猛发展。我国从1984年华北电力学院推出第一套微机距离保护装置以来,国内各学校、科研、生产单位已陆续研制和生产出适用于线路和元件的各种保护装置,它们已完全能取代传统的模拟式保护装置,从而使我国的微机保护进入当前国际先进行列。另一方面,也应看到,不少微机保护装置在原理和性能上大体与传统保护一样,只是传统保护的翻版,传统保

护中已经存在的问题,在微机保护中依然存在,并未得到改进和解决。关键在于如何才能充分发挥保护的潜在智能作用,而自适应继电保护是其中一个充满希望的研究方向。

#### 3.1 自适应继电保护举例

作为一个例子,这里介绍由西安交通大学与南京电力自动化设备厂共同研制WXB-32型馈电线自适应电流保护装置,该装置由自适应电流速断、自适应过电流和三相自动重合闸组成,已投入试运行,情况良好。

##### 3.1.1 自适应电流速断保护 [2]

为了克服传统电流速断存在的缺点,自适应电流速断保护的定值不是按最大运行方式和线路末端三相短路的条件整定的,也不是固定不变的,而是根据电力系统的实际运行方式和短路类型,实时自动整定,表示为

$$I_{DZ} = \frac{K_d K_k E}{Z_S + Z_L} \quad (6)$$

式中  $E$ —等效电源的电势;  
 $Z_L$ —被保护线路阻抗;  
 $Z_S$ —系统阻抗;  
 $K_d$ —短路类型系数;  
 $K_k$ —可靠系数。

式(6)中,  $Z_L$  和  $K_k$  已知,电势  $E$  可设定或实时求得,短路类型系数由短路条件实时判定,在三相短路时取  $K_d = 1$ ,两相短路时取  $K_d = \sqrt{3}/2$ 。系统阻抗  $Z_S$  也在发生短路时实时算出,利用电压故障分量  $\dot{U}_g$  和电流故障分量  $\dot{I}_g$  可得到  $Z_S = \dot{U}_g / \dot{I}_g$

自适应电流速断具有以下主要特点:

- (1) 电流速断的定值,由微机保护自动计算整定,使用起来简便可靠。
- (2) 根据系统的实际运行方式和短路类型确定保护的定值,可使保护范围达到最佳,克服了传统速断保护的缺点。
- (3) 与传统的电流闭锁电压速断相比,自适应电流速断不仅不需要复杂的人工整定计算,而且扩大了保护范围。
- (4) 与距离继电器相比,自适应电流速断

可以达到相近的保护范围，但是却没有电压死区和 PT 断线时仍能继续可靠地动作。

以上说明了自适应电流速断的优越性。

### 3.2.1 自适应过电流保护<sup>[2]</sup>

由于传统过电流保护必须按最大负荷电流整定，从而限制了保护的灵敏度。与传统的过电流保护不同，自适应电流保护能够根据负荷电流的变化实时自动地改变过电流保护的整定值，下面以反时限过电流保护为例说明自适应过电流保护的基本原理。

在最大负荷电流  $I_{Hmax}$  的条件下，过电流保护的整定值为

$$I_{Dz} = KI_{Hmax} \quad (7)$$

根据式 (7) 可选用一条反时限特性，表示为

$$t = f(I) \quad (8)$$

当线路故障时，如果短路电流小于式 (7) 的定值，按上述特性动作的过电流保护将不能检出故障，但是通过对负荷电流的实时监控，便可根据实际负荷电流  $I_H$  自动改变定值使保护具有更灵敏的另一条反时限特性

$$t = (I) \quad (9)$$

过电流保护将有可能更灵敏并且更快地切除故障。

## 3.2 自适应继电保护的前景展望

从上面的实例可以看出，自适应继电保护能克服同类型传统保护中长期以来存在的问题。虽然自适应继电保护目前还处在初期发展阶段，但现有的研究成果已经有力地说明了它的优越性。下面提出对自适应继电保护前景展望，供同行参考。

### 3.2.1 保护性能最佳化

保护性能最佳化是在考察现有保护（包括微机保护）存在问题的基础上提出的。在微机保护出现以前，由于技术条件的限制，保护最佳化的目标是难以实现的，与之相适应的是保守的思维方式和决策方法，与传统保护不同，自适应保护的突出特点之一就是要具有自动识别系统运行状态和故障状态的能力，并针对状态的变化，实时自动地调整保护的绩效，其中

包括动作原理、动作特性和整定值，从而使其达到最佳效果。

### 3.2.2 整定计算自动化、在线化

继电保护的整定计算是一项复杂又艰巨的任务，这是由电力系统的结构变化、运行情况的复杂性和多样性决定的，目前计算机辅助整定计算已大大提高了效率，但是都是在人工和离线条件下进行的。

自适应继电保护技术的发展预示出未来整定计算自动化、在线化的可能性，本文给出自适应电流保护就具有在线整定计算的能力，虽然电力系统继电保护整定计算远比这种最简单的电流保护复杂得多，但是随着自适应继电保护技术的进步，特别是电力系统继电保护信息网的形成和发展，可以预见，整定计算自动化、在线化的时期一定会到来。

### 3.2.3 使用简便化

微机保护之所以在短短的十余年间会取得如此迅速的发展，并受到用户热情欢迎，其主要原因之一是简化了装置的调试和维护，自适应继电保护将能进一步发挥计算机的智能作用使装置的使用更加简便化。

## 4 小波变换与继电保护

近年来，小波理论和方法在应用和工程界引起了极大的反响，它被认为是富里叶变换的重大发展，在应用科学领域，特别在数字信号处理、图象边缘检测、模式识别等领域，认为它是近年来工具和方法上的重大突破，小波变换已在通信、遥感技术、生物医电信号处理、宇航、数值分析等领域中应用，并卓有成效，小波变换在电力系统继电保护技术中的应用也将显示出巨大的作用。

### 4.1 小波变换的基本概念

在信号分析中通常采用的有效方法是富里叶分析，它的实质是：把一个信号波形分解成许多不同频率的正弦波之和。如果这些波加起来成为原来的波形，那么我们就确定了这个波形的富里叶变换，这里正弦波是由 - 到 + 时域的函数。这种方法对那些本质上具有正弦

性质的信号,例如语音信号、特别有用,然而对非平稳变化信息,不连续信号却无能为力。

小波变换是把一个信号波形用具有不用位置和尺度的小波函数表示,小波可以定义为一个仅持续1个或几个周期的振荡波。小波变换突出的特点是它在时域和频域具有良好的局部化性质,因此成为分析非平稳变化信号或具有突变性信号的锐利工具。例如一个单一的锯齿波可以用16个小波表示出来,而用正弦波时要用256个,这是因为富里叶变换很难表示其中的不连续部分的缘故。

## 4.2 小波变换在暂态行波测距和行波保护中的应用

### 4.2.1 小波变换的必要性

利用故障暂态行波进行测距是当前国内外的一个重要研究课题,其中的关键技术问题是如何在对暂态行波分析的基础上正确检测出其中的故障信息。输电线路发生故障产生的暂态行波是一个突变的、具有奇异性的信号,因为富里叶变换是频域分析方法,所以它在时域上没有任何分辨能力。实践结果表明,对于象高压输电线路这样具有非线性参数和干扰严重的场合;相关法等时域分析法也不可靠。总之,无论是单纯的频域分析法,还是单纯的时域分析法都不足以精确地描述象暂态行波这样的非平稳变化信号,因此就要寻找一种信号的表示方式,它能够在整体上提供信号的主要特征而又能提供任一局部时间内信号变化剧烈程度的信息。小波分析法恰好能满足上述要求,而根据小波变换的奇异性检测及模极大值理论更有效地识别出行波在暂态行波测距中所需的故障点反射波。

### 4.2.2 小波变换用于行波测距举例<sup>[3]</sup>

某500kV输电系统如图2所示,当在线路MN上F点发生A相接地短路时,在线路N端检测到的A相暂态行波电流波形及其小波变换如图3所示。

对A相电流信号(图3(a))进行小波变换(图3(b)),变换共进行三次,分别对应于尺度因子为 $2^1$ ,  $2^2$ ,  $2^3$ 。图3(c)示出了对

应于图3(b)的小波变换模极大值。

由图3可见,图中、点分别是初始行波到达N端和故障点反射波到达N端的时刻,用它可计算出故障点的距离。图中点对应于零模分量到达,、点分别对应于相邻母线R的反射波和对端母线M的反射波再经故障点透射过来的电流行波。由图3还可看出小波变换具有的消除噪声的优越性能。

### 4.2.3 小波变换在继电保护中的应用

继电保护技术中的首要任务是正确检测出故障,电力系统中出现故障时通常都伴有奇异性或突变性。目前,利用小波变换的奇异性检测及模极大值理论已提出了实现故障起动和选相方法,这种方法的主要特点是快速和可靠。

众所周知,减小继电保护装置的动作时间是增大输电线路传输容量和提高系统稳定性的简单有效措施之一。70年代末研制出的行波保护装置被认为是继电保护技术上的一个突破性进展,然而,由于快速动作与可靠性之间的矛盾未能很好解决,致使行波保护的快速性的优越性未能充分显示出来,这也是近年来为什么人们把目光集中于利用稳态故障分量实现继电保护的一个重要原因。小波变换分析的应用将为快速可靠地检出行波信息提供有效的工具,基于小波变换的继电保护装置必将展示出其巨大的优越性。

## 5 全球卫星定位系统(GPS)在继电保护技术中的应用

### 5.1 GPS简介

GPS是美国于1993年建成的卫星定位和授时系统。该系统由24颗空间导航卫星,地面测控站和GPS接收机三大部分组成,它具有全球性、全天候连续实时定位和授时功能,并且无条件向民用领域开放,从而成为全球共享的一个高科技资源,在导航、军事、民用各方面有广泛的用途。90年代后期以来,西方国家和我国相继开展了GPS在电力系统和继电保护技术中的应用研究,取得了丰硕成果。

GPS在电力系统继电保护技术的应用时,

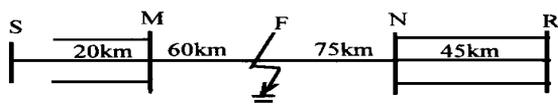


图2 500kV 输电系统图

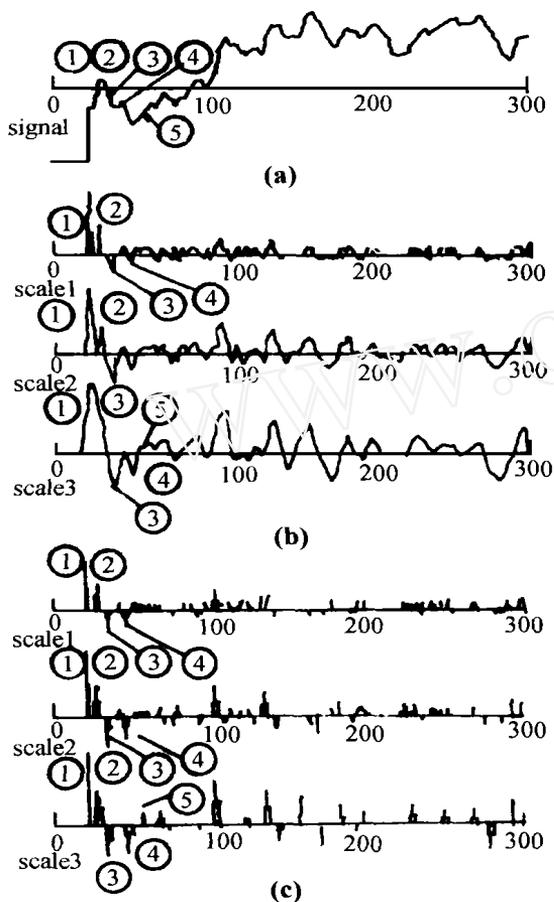


图3 故障暂态行波电流及其小波变换

主要是从 GPS 接收机获取精确时间和同步脉冲信号。GPS 接收机能提供两种时间信号如图 4 所示，时间和同步误差不大于  $1\mu\text{s}$ 。

### 5.2 GPS 在电力系统中的应用

GPS 在电力系统中有着十分广泛的用途，主要用于建立电网统一时钟和同步测量，它们对运行管理、事故分析、安全监视、紧急控制、继电保护、故障测距等有重要作用。

在继电保护技术中有一些直接比较两端电气量的保护原理对两端电气量有同步要求，在微机保护中实现这类原理时遇到了两端电气量采样同步的问题，比较突出地表现在输电线路

电流差动保护和电流相位差动保护中，GPS 的应用无疑将显著提高上述保护的性能。

GPS 用于双端量或多端量的故障测距中更显示出诱人的前景，下面给出了利用 GPS 实现双端量行波测距的新原理。图 5 中示出了一条输电线路  $mn$ ，线路长度为  $L\text{km}$ ，设在  $F$  点发生故障，线路段  $mF$  的长度为  $x_m$ ， $Fn$  线段的长度为  $x_n$ ，线路  $mn$  两端均可由 GPS 获

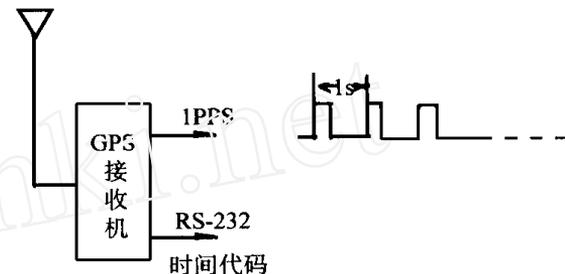


图4 GPS接收机

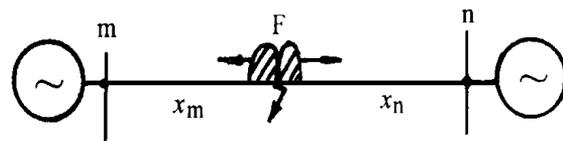


图5 输电线路

取标准时间信息。

当  $F$  点故障后，行波到达线路  $m$ 、 $n$  两端母线的时刻分别为  $T_m$ 、 $T_n$ ，则故障点距  $m$ 、 $n$  两端母线的距离可由下式进行计算：

$$x_m = [(T_m - T_n) V + L] / 2 \quad (10)$$

$$x_n = [(T_n - T_m) V + L] / 2 \quad (11)$$

式中  $V$ —波速。

根据上述原理已研制出  $XC-11$  型行波测距装置<sup>[4]</sup>。在图 5 所示的线路上利用专门研制的系统暂态信号发生器进行了仿真试验。输电线路  $mn$  全长  $135\text{km}$ ，故障发生在距  $m$  端母线  $75\text{km}$  处，故障日期为 1995 年 9 月 19 日， $m$  端记录的时间为 9 时 33 分 3 秒  $847726\mu\text{s}$ ， $n$  端为 9 时 33 分 3 秒  $847676\mu\text{s}$ ，取波速  $V = 0.3\text{km}/\mu\text{s}$ ，代入式 (10)、(11) 得出  $x_m = 75\text{km}$ ， $x_n = 60\text{km}$ 。仿真结果表明，利用 GPS 的两端量行波测距装置可以达到很高的测距精度，该装置已在东北电网投入试运行。

# 元件保护正确动作率长期偏低问题的我见

王维俭 清华大学电机系 (100084)

**【摘要】** 针对我国元件保护正确动作率长期偏低的现象,作者阐述了问题产生的主要根源,并结合国情讨论了如何改变元件保护落后面貌的意见和建议,与全国设计、制造、科研和运行管理部门的各位同仁共商。

**【关键词】** 电气主设备 元件 继电保护 正确动作率

## 0 前言

全国电力系统继电保护工作会议已于1997年9月在哈尔滨胜利召开,与会代表认真总结了1994~1996年继电保护管理年的丰富经验,为已经取得的显著进步和成绩,欢欣鼓舞,但是三年来全国主设备(元件)保护的运行水平却停滞不前,个别地方和部门甚至有倒退现象,在大机组(包括发电机和变压器)日益增多、300MW及以上发电机已成为我国系统主力机组的迅速发展形势面前,“元件保

护不适应的问题越来越突出,到了非解决不可的时候了”<sup>[1]</sup>,要求有关工作人员“发挥产学研相结合的优势,勇敢攻关,要有所作为,要有创新精神”<sup>[1]</sup>。

## 1 我国电气主设备保护水平长期落后的面貌和症结所在

1990~1993年期间,220kV及以上主网保护的正确动作率<sup>[2]</sup>,曾在93.2%~94.28%间徘徊不前,经过管理年的大力整顿,1994~1996年全国正确动作率平均达96.96%,其中10个网省局已达98.2%及以上,华东全网平均高达98.44%,可喜可贺!

1997—10—13 收稿

## 6 后记

本文不可能全面概括国内外继电保护技术的新进展,而主要介绍了我校近年来在继电保护领域中所进行的主要科研工作及取得的成果。这里把它们作为继电保护技术的新进展介绍出来,希望能引起同行的兴趣和关注。

### 参考文献

1 A. M.

,1984

- 2 葛耀中著. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安交通大学出版社, 1996
- 3 董新洲. 小波理论应用于输电线路行波故障测距研究. 博士学位论文, 西安交通大学电气工程学院, 1996
- 4 董新洲、葛耀中、徐丙垠等. 利用GPS的输电线路行波故障测距研究. 电力系统自动化, 1996. 11
- 5 孔繁鹏. 自适应预测与控制理论在计算机继电保护中的应用研究. 博士学位论文, 西安交通大学电气工程学院, 1996

## NEW DEVELOPMENT OF PROTECTIVE RELAYING

Ge Yaozhong (Xian Traffic University, 710049, Xian, China)

**Abstract** Relaying technology is advancing dramatically. It has gone through three stages and two leaps in this century. Based on looking back on the history of relaying technology development, new advances including protective relaying using superimposed fault components, wavelet transform, GPS and adaptive protective relays are introduced into the paper.

**Keywords** Relaying fault component adaptive protection wavelet transform