

## ABSTRACT

Along with the development of electric power system, large numbers of HV/EHV transmission lines will come forth. The study of HV/EHV transmission line protection is an insistent demand. This dissertation is devoted in the study of composing a suit of HV/EHV transmission line back-up protection with excellent performance. The dissertation mainly concerns how to analyze and improve the earth-fault distance relay operating characteristics.

A new digital simulation software package TRCP (Tape Resistance Characteristic Program) is developed in this work. Using MFC and VC++6.0 as the developing platform, TRCP is object-oriented and multithreading and it runs in windows operating system. A novel method of static characteristic analysis for distance relay is used. In a distributed parameter system model, the fault resistance is modified according to "the improved direct principle". The action of the distance relay is decided by the fault current and fault voltage based on the steady state computation of EMTP-ATP. The fault place is changed orderly after the critical tape-resistant of one fault place is found. The tape-resistance characteristic of this kind of distance relay is obtained when every fault place in the system model is considered. The influence of changing system parameters such as source impedance is studied. The simulation results show that this method is valid and has a great application prospect.

The performance of some distance relays is analyzed on the condition of parallel line and annular distributed lines by TRCP. The research shows that some distance relays have a stable static characteristic such as the multi-phase compensated distance relay, the quadrilateral characteristic distance relay and the fault component reactance relay while others are susceptible to misoperation. In addition, improvement is discussed and a new scheme for distance protection is put forward.

Finally, an integrated scheme for a suit of HV/EHV transmission line back-up protection device is designed.

**Keywords:** EHV transmission line, protection relaying, distance protection, EMTP, ATP

## 1 绪论

本章在简述输电线路继电保护发展史的基础上,介绍了国内外超高压输电线路继电保护的发展现状,综述了近年来超高压输电线路微机保护技术的新进展,并讨论了今后的发展方向,最后说明了论文的主要工作与章节安排。

### 1.1 引言

随着新世纪的到来,我国基本上进入大电网、大电厂、大机组、高电压输电、高度自动控制的新时代。近 20 年来,我国电力事业的发展令世人瞩目。从 1988 年起连续 11 年每年新增投产大中型发电机组超过 10000MW。各大区电网和省网随着电源的增长加强了网架建设,从 1982 到 1999 年底,全国新增 35kV 以上输电线路 372837km,新增变电容量 732690MVA,而 1950 至 1981 年 30 年期间新增输电线路为 277257km,变电容量 70360MVA。到 2000 年底,我国电力装机总容量已达到 31932.09 万千瓦,全国发电量达到 136848171 万千瓦小时,居世界第二位,基本满足了国民经济发展对电力的需要。根据我国电网的远景规划,在北方火电基地建成之前,我国将形成北部、中部、南方三大联合电力系统,随着长江三峡水利枢纽工程、黄河小浪底水利枢纽工程、二滩水电站等一批大型、超大型水电站的建成投产,到 2020 年以前,一个覆盖全国的统一的联合电网将初具规模<sup>[1, 2]</sup>。

在我国,220KV 电网不断完善和扩充,各电网中 500kV (包括 330kV) 主网架逐步形成和壮大。到 1999 年底 220kV 以上输电线路总长达 495123km,变电容量达 593690MVA。其中 500kV 线路(含直流线路)达 22927km,变电容量达 80120MVA。由于超高压线路在联合电网中担当着极为重要的角色,因此对它的继电保护设备的各项性能提出了很高的要求。在 500kV 系统建设初期,这些超高压线路的保护设备只能完全依靠进口。随着对进口保护的消化,吸收和改进工作的深入,高压和超高压微机继电保护装置的研制和生产工作在全国各大相关厂家和院所逐步展开,其代表产品有许昌继电器厂的 WXB-11 型微机高压线路保护装置,南瑞继电保护公司研制的 LFP-900 系列微机成套保护装置,北京四方保护与控制设备有限公司的 CSL-200 系列数字式线路保护等。这些微机线路保护装置在电力系统的推广应用,极大的提高了我国电网继电保护系统的运行水平。

## 1.2 输电线路继电保护发展历史与研究现状

自本世纪初第一代机电型感应式过流继电器(1901年)在电力系统应用以来,继电保护已经经历了一个世纪的发展。在最初的二十多年里,各种新的继电保护原理相继出现,如差动保护(1908年)、电流方向保护(1910年)、距离保护(1923年)、高频保护(1927年),这些保护原理都是通过测量故障发生后的稳态工频量来检测故障的。随着现代科学技术和工业的不断发展,基于上述原理的保护装置也经历了机电式、整流式、晶体管式、集成电路式、微处理机式等不同的发展阶段。尽管以后的研究工作不断发展和完善了电力系统的保护,但是这些保护的基本原理并没有变,至今仍然在电力系统继电保护领域中起主导作用。

1965年初,英国剑桥大学的 P.G.McLaren 等提出利用采样技术来实现输电线路的距离保护<sup>[3]</sup>。1966年下半年,澳大利亚新南威尔士大学的 I.F.Morrison 预测了输电线路和变电所采用计算机控制的前景,包括计算机用作继电保护的前景,并进一步进行了计算机式保护的理论研究,主要研究适用于继电保护的各种算法<sup>[4]</sup>。1969年前后,美国西屋公司的 G.D.Rockefeller 等开始进行具体装置的研制<sup>[5]</sup>,并于1972年发表该装置的试运行样机的原理结构与现场实验结果。从六十年代末计算机保护概念的提出开始,继电保护技术得到了迅速发展。输电线路<sup>[6-9]</sup>、电力设备<sup>[10-13]</sup>等的数字保护技术被很快开发出来。

微机继电保护技术的成熟与发展是近三十年来继电保护领域最显著的进展。经过长期的研究和实践,现在人们已普遍认可了微机保护在高压、超高压电网中无可替代的优势<sup>[14, 15]</sup>。微机保护具有自检功能,有强大的逻辑处理能力、数值计算能力和记忆能力,并且具备很强的数字通信能力,这一切都是电磁继电器、晶体管继电器所难以匹敌的。计算机技术的进步,更高性能、更高精度的数字外围器件的采用,一直是微机继电保护不断发展的强大动力。此外,微机保护以软件计算实现保护功能,使得继电保护摆脱了传统保护原理的束缚,能够充分利用现代工程数学、信息技术、人工智能等学科的成果,结合继电保护的工程实践,研制性能更加优良、更能满足实际需要的保护装置。总之,不断开发计算机技术的潜力,研制、采用新型优良器件,有效的运用信息处理的最新技术,才能推动继电保护技术的进步。

在保护装置硬件方面,近年来的进步集中体现在光学电流电压互感器、数字信号处理器(Digital Signal Process-DSP)和全球定位系统(Global Positioning System-GPS)的实际应用。

传统的电压、电流传感器都是采用电磁原理的电磁型传感器。这种电磁型传感器有许多缺点,例如体积大重量沉,运输、安装不便,易受电磁干扰,容易饱和,测量

频带不宽，CT 断线还会产生危险的过电压。电磁型传感器的这些固有缺点，将会使继电保护在电力系统向大容量、高电压方向发展面临更大的困难。另一种在高压系统中应用的传感器——电容式电压传感器和电流传感器则由于其暂态性能欠佳，很难满足继电保护的要求；而光学电流电压互感器（OCT、OVT）是一种有前途的测量高电压、大电流的装置。这类装置具有绝缘性能好、结构简单、运行可靠、测量大电流时无磁饱和、抗电磁干扰、体积小、重量轻及运输安装方便等优点，有着广泛的应用前景。国外自六十年代开始光学电流电压互感器的研究，八十年代至九十年代初期，美国、日本相继有产品挂网运行成功，以这类互感器为基础的继电保护系统也表现了良好的性能。国内自 1982 年开始有多家单位进行了这方面的研究，目前三相 OCT、OVT 及相关继电保护装置也同时挂网运行。

电力系统中一次侧的电量经过传感器变换成为小电流、小电压信号后，经过低通滤波器，引入继电保护装置。对于微机继电保护装置而言，在 CPU 进行计算和逻辑判断以前，还需要将这些模拟信号转变成数字信号，这一般由 ADC 或 VFC 等器件完成。继电保护为了适应现代电力系统发展的需要，在快速性、灵敏性、选择性等各项指标上必须有较大的提高，这无疑对微机保护中采样、计算等环节提出了更高的要求。随着计算机技术的发展，CPU 的性能越来越高，速度越来越快，但是以通用微处理器为核心的微机继电保护装置由于受器件、CPU 和总线性能的限制，其数据采集和计算难以同时做到多通路、高速度和高精度，限制了保护装置性能的提高。例如，虽然微机继电保护装置所用的 CPU 从八位到十六位，甚至三十二位，指令周期也越来越短，但仍然难以达到实时浮点数计算的要求。超大规模集成电路的飞速发展，为解决这一困难提供了可能，数字信号处理器（Digital Signal Process-DSP）就是其中的首选。从功能上来说，DSP 芯片也是一种单片机，能够按照程序的指令执行数据采集、运算等工作。它是专为实时数字信号处理及其它精密计算的应用而设计开发的。它能完成高精度计算，更由于其硬件内部集成了许多高速信号处理算法如快速傅立叶变换、多种数字滤波器等等，从而使其具有极强的实时处理能力。可以想见，DSP 的出现，不但可以提高微机保护数据采集与计算的速度和精度，甚至可能改变往常继电保护装置的设计思想。目前，DSP 在电力系统的许多领域得到应用，如电机控制、数据采集等等，一些科研单位也开始研制由 DSP 构成的微机保护并制成正式的产品。DSP 在保护中的应用必将可以极大的提高保护的性能，是开发超高压线路保护装置时值得考虑的硬件平台。

全球定位系统（Global Positioning System-GPS）是美国于 1993 年全面建立的一代卫星导航和定位和授时系统。它由 24 颗卫星组成，具有全球覆盖、全天候工作、24 小时连续实时地为美国军方提供高精度位置、速度、时间信息的能力。GPS 传递的时间在地面测控站的监控下能与国际标准时间（Universal Coordinated Time，简称



UCT) 保持高度同步, 最高精度可达  $10\sim 1\text{ns}$ 。这一特点使 GPS 成为目前世界上传播范围最广、精度最高的时间发布系统, 具有很高的利用价值。美国政府同意在较低的精度下 (最高精度可达  $100\text{ns}$ ) 将 GPS 无条件用于全世界民用领域。由于 GPS 信息具有精度高, 可靠性好, 接受简单, 不受天气、地形等条件的限制的优点, 可以广泛的应用于民航、测量、勘探等工农业许多领域, 电力系统也不例外。GPS 在电力系统的最基本的应用就是其基本功能——高精度的时间信息。有了 GPS, 电网可以很容易的实现全国范围的时间统一, 从而为系统的测量、控制、管理和运行监视提供便利条件。有了全网统一的时间标准, 对于继电保护来说, 不但可以使各处的故障录波数据相互比照, 便于事故的分析, 更重要的是在统一的时间标准下可以实现远距离同步采样, 从而实现以往难以实现的双端或多端故障测距, 长距离输电线的电流差动、电流相位差动等等。有了精确的同步采样数据, 我们还能够实时测量诸如电压、频率、有功、无功等许多电量, 由这些电量可以计算出系统阻抗、频率等等, 为继电保护提供实时的系统参数, 使保护达到最佳效果。

在电力系统高压输电线路保护原理方面, 距离保护一直是主要的保护方式。自六十年代后期以来的三十多年时间里, 人们对微机距离保护进行了多方面的研究, 其中采用新原理和新方法以提高接地距离保护承受过渡电阻的能力是一个重要的研究方向, 尤其是在超高压电网中, 由于输电线路通常要经过山区地带, 接地短路时过渡电阻很大。因此, 距离保护必须具备足够的反映经过渡电阻短路的能力<sup>[16]</sup>。

传统的方向阻抗继电器, 在正向两相和单相经过渡电阻外部接地短路时, 都可能出现超范围动作的现象, 且允许的过渡电阻也较小, 因而方向阻抗继电器作为接地故障的测量元件是不够理想的<sup>[17]</sup>。文献[18]分析了按比较三相补偿电压和零序电流相位原理构成的多相补偿接地距离继电器的静态运行特性, 指出该继电器具有容许较大过渡电阻的优点。但当区外不对称故障伴随振荡时, 或当本侧电源领先对侧电源的相角增大时, 该继电器都可能拒动。文献[19]提出了综合比相式新型接地距离继电器, 该继电器综合了电抗元件、欧姆元件、选相元件和方向元件的性能, 具有优良的选相性能, 在防止继电器区外稳态超越和提高保护耐受过渡电阻能力方面性能有所提高。文献[20]对几种类型的突变量距离继电器的性能进行了分析和比较, 探讨了提高突变量距离继电器对过渡电阻反应能力的途径。文献[21]提出了基于微分方程算法的接地电抗继电器方案, 建议用正序和负序电流的故障分量的和来近似代替流过故障点的故障电流, 通过微分方程求解故障距离来判断故障是否在保护区内。这种继电器反映高阻接地故障的能力明显提高, 但继电器耐受过渡电阻的能力受系统正序和负序运行参数变化的影响较大。由于系统的零序网络相对比较稳定, 文献[22]推荐用流过继电器的零序电流代替流过故障点的故障电流。因为解微分方程算法是以瞬时值计算为基础, 数学模型简单, 计算速度快, 保护耐受过渡电阻能力强, 成为微机接地距离保护的优

选算法。但基于微分方程算法接地电抗继电器在电力系统某些运行方式下存在区外稳态超越问题。文献[23]为此提出了相位补偿原理视在距离新算法,可根据系统运行工况的变化选择不同的零序电流的相位补偿值,保证区外故障时,保护不超范围误动。但保护性能受角度整定值的影响较大。 $I_0$ 极化接地距离继电器在反映高阻接地故障方面显示出了优良的性能。常规  $I_0$ 极化接地距离继电器,在正方向单相经过渡电阻外部接地短路时,可能会超越误动;当继电器安装侧处于受电端时,保护耐受过渡电阻的能力很差。文献[24]提出了改进的  $I_0$ 极化接地距离保护方案,根据系统实际运行工况进行动作特性方程的切换,提高耐受过渡电阻的能力。文献[25]在以上的基础上提出了双下偏零序电流极化接地距离继电器。

随着电力系统规模的扩大,电网电压等级的提高,传统的保护原理已经不能满足系统稳定性和电力设备安全性对快速切除故障的要求。在最近二十年的研究中,继电保护技术取得了一些新进展。

## 1.3 超高压输电线路保护技术的新进展

电力系统继电保护的技术在最近二十年得到了很快发展,例如故障分量保护、自适应保护、人工智能保护和小波保护等,其中最明显、对电力系统影响最大的是反应故障分量的高速继电保护<sup>[26]</sup>。

### 1.3.1 故障分量保护

在一般的情况下,如果不考虑系统中饱和等因素的影响,电力系统可以作为一个线性系统来研究。对于突发性故障,根据叠加原理,故障后的系统可以认为是由故障前状态和故障分量叠加而成,而系统电量中的故障分量中含有大量的故障信息,可以用来快速检测故障,基于故障分量的继电保护原理开始得到广泛关注。

所谓故障分量,就是从故障时的量中减去故障前的负荷分量。它是故障后才出现的量。对故障分量的计算只需在故障点施加一个与故障前该点电压大小相等,方向相反的电压,而令所有电源电势为零即可求得。

用公式表达故障后的电流、电压:

$$i_A = i'_A + \Delta i_A = i'_A + (\Delta i_A)_{\text{transient}} + (\Delta i_A)_{\text{steady-state}}$$

$$v_A = v'_A + \Delta v_A = v'_A + (\Delta v_A)_{\text{transient}} + (\Delta v_A)_{\text{steady-state}}$$

式中,  $i'_A$ 、 $v'_A$  是故障前的负荷分量,  $\Delta i_A$ 、 $\Delta v_A$  是由故障引起的故障分量,由于  $\Delta i_A$ 、 $\Delta v_A$  直接与故障相联系,最适合用来做故障检测。 $(\Delta i_A)_{\text{transient}}$ 、 $(\Delta v_A)_{\text{transient}}$

是故障分量中的暂态分量,  $(\Delta i_A)_{\text{steady-state}}$ 、 $(\Delta v_A)_{\text{steady-state}}$  则是故障分量中的工频稳态分量, 也称之为工频变化量。考虑输电线路参数的分布性和客观存在的干扰,  $(\Delta i_A)_{\text{steady-state}}$ 、 $(\Delta v_A)_{\text{steady-state}}$  既包含非周期分量(直流分量), 又包含许多高频分量。

始于七十年代末的行波保护是利用故障暂态分量来实现保护工作的开端。其实质是按故障初期故障暂态分量电流、电压的极性关系来判别故障方向, 再利用通道对线路两侧的方向判别元件的动作进行比较, 构成快速方向保护。如文献[27]提出的行波距离保护, 文献[28]提出的利用噪声的保护。这种保护要利用故障分量中的暂态分量, 就不能滤掉干扰产生的不良影响, 因而安全性差。国内学者为提高保护的可靠性, 倾向于使用利用工频变化量的保护。

沈国荣在文献[29]中提出了利用工频变化量构成工频变化量方向继电器的概念, 这种方向继电器具有适用性广, 理论和结构简单, 可靠性高和动作快速的优点。文献[30]提出了工频变化量距离继电器的原理, 当补偿电压变化量的幅值超过故障前补偿电压的幅值时动作, 允许的过渡电阻大, 结构简单, 动作速度快。目前的应用还有: 两相电流差的突变量选相元件, 相差动高频保护等。

故障产生的信号中含有大量的信息, 其频带范围很宽, 从直流、工频到高频, 直至整个频域。但是长期以来, 继电保护只利用了其中的工频成分或很高频率的行波成分。大量的高频分量被作为干扰滤除掉了。这一方面是由于我们对故障暂态量的认识不足造成的, 另一方面很大程度上是由于受到普通传感器频带等硬件条件的限制。近些年来, 一些学者开始了一种新的继电保护领域的探索, 既“通过检测故障暂态产生的高频信号实现传输线及电力设备等的保护”, 简称“暂态保护”, 取得了一些成果。例如在故障测距、故障选相、线路的瞬时与永久故障的判别等方面得到尝试应用, 有的学者还提出试图通过故障高频信号实现单端电量的全线速动保护。目前, 暂态保护的应用仍然十分有限, 其关键就在于对电力系统故障暂态中的高频成分的研究还远远不够, 对其特性的认识几乎是空白。随着硬件条件的成熟, 小波分析, 人工智能等新的数学分析工具的应用, 暂态保护在超高压线路中的应用也是可能的。

## 1.3.2 自适应保护

自适应保护是 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方式和故障状态的变化而实时改变保护性能、特性或定值的保护<sup>[31]</sup>。电力系统在运行过程中, 其状态、参数及网络结构会随着运行方式的变化而变化。继电保护要做到有选择、高灵敏度的判断故障, 就必须适应这种变化。传统的继电保护为了达到这个要求, 往往采用抬高整定值、增加闭锁判据等措施, 另外也有限的使用了一些自适应的原理, 如反时限原理的过流、过热、过激磁等保护方案, 有比例制



动特性的差动保护判据等。八十年代以来,随着微机继电保护的应用和发展,计算机的高速计算、逻辑判断能力,强大的数据记忆功能,为自适应原理在继电保护中的应用创造了良好的条件。

文献[32]的作者针对电力系统频率变化的影响、单相接地短路时过渡电阻的影响、电力系统振荡的影响以及故障发展问题提出了自适应对策,从理论和实践两方面探讨了自适应距离保护的可行性。文献[33]对自适应原理在输电线路继电保护的应用作了全面的分类描述,使自适应继电保护的原理得到了进一步的发展和完善。文献[34~37]研究了如何将自适应原理应用于距离保护。自适应技术是数字技术的应用带来的继电保护领域的一个进步。但是自适应技术并没有改变现有各种保护的基本原理。

根据自适应保护中运用的信息不同,可以将其分为两种方式:一种是在中调所设置中央计算机,采集全系统的信息,经过计算机处理,再通过通信网络传递给当地计算机,然后改变当地保护的定值和特性;另一种是直接利用保护当地的电量和非电量信息,实现自适应保护。由于主设备保护的自身特点和我国电力系统自动化条件的限制,我国采用的自适应方案基本上都是第二种方式。随着我国电力系统通信的进步和电网发展的实际需要,第一种方式的自适应保护也将会得到大力发展。由于自适应保护在不改变保护原理的同时大大提高了保护的灵敏度和准确性,突破了常规保护的限制,并且往往可以减少整定值的数量,降低整定难度,在输电线路的继电保护、变压器保护、发电机保护、自动重合闸等领域内都有着广泛的应用前景。

### 1.3.3 智能式保护

进入九十年代以来,电力系统保护领域内的一些研究工作转向人工智能的应用,尽管迄今并不成熟,但却在提高继电保护智能化方面开辟了一个暂新的领域。人工智能就是由计算机来表示和执行人类的智能活动,如判断、识别、理解、学习、规划和求解等。人工智能的研究在逐步扩大机器智能,是计算机逐步向人的智能靠近。一般认为,人工智能大致包括以下几个方面:模糊数学和模糊集理论,专家系统,人工神经网络。

模糊数学并不是要将数学变成模糊的东西,其核心思想是用数学手段仿效人脑思维,对复杂事物进行模糊度量,模糊识别,模糊推理,模糊控制和模糊决策。现有文献大多将模糊数学应用于变压器差动保护的研究<sup>[38, 39]</sup>。基本思想都是将多个输入量及相关保护判据给予不同的置信度,通过模糊推理得到最终的跳闸决策,希望更有效的避免某一判据误动或拒动对整个保护的不利影响。近年来,具有模糊指令计的嵌入式微控制器的出现为模糊技术的实现提供了良好的硬件基础,将是它得到进一步发展。

专家系统突破了以往数值计算、数据处理的限制,使得计算机的知识处理更接近



于人类专家的职能，因而在人工翻译、医疗诊断、天气预报等领域取得了巨大的成功。但是由于专家系统的实现中还有许多困难，比如受知识的获取和表示以及推理的实时性的制约，专家系统在继电保护中的研究仅限于非实时应用方面。

人工神经网络 (Artificial Neural Networks-ANN) 是由大量类似于神经元的处理单元相互连接而成的非线性复杂网络系统。它是在现代神经科学研究成果上提出的，试图通过模拟大脑神经网络处理、记忆信息的方式完成人脑那样的信息处理功能。对于难于得到解析解，又缺乏专家经验，但能够表示或转化为模式识别或非线性映射的一类问题，可以考虑用 ANN 求解。传统人工智能 (如模糊集理论、专家系统) 模拟的是人的逻辑思维，适于处理象规划、决策和语义理解等较高级的问题。而 ANN 模拟人的形象思维，适于解决象模式识别联想记忆等较低级的认识问题。

近年来，有关 ANN 在继电保护中的应用的研究异常活跃。相继出现了用人工神经网络与模糊控制理论来实现故障类型的判别、故障测距、方向保护、主设备保护、线路保护等<sup>[40-42]</sup>。

## 1.3.4 小波分析的应用

微机继电保护是运用数学运算方法实现故障量的测量、分析和判断的。因此各种数字信号分析工具是十分重要的，如 Fourier 变换、Kalman 滤波、最小二乘滤波等。在对稳态信号的处理中，这些方法发挥了巨大的作用。但是，他们却不太适合于处理非稳态信号。以 Fourier 变换为例，它能将信号的时域特性变换为频域特性来研究，并且这种变换是对称的，即在相应的 Fourier 反变换的作用下，信号的频域特性也能方便的通过它所对应的时域特性来研究。因为 Fourier 变换具有这种良好的时-频分析能力，使得长期以来，他在继保研究和应用中起着举足轻重的作用。但是，由于 Fourier 变换中所用的基函数——正弦函数和余弦函数本身的特性，决定了它没有任何时-频局部化的作用，也就是说，若要得到某个固定频率的频谱信息，就必须使用全部的时域信息进行 Fourier 变换；若已知局部的频谱信息，并不能得到信号在局部时域中的特性。同样，信号在局部时域上的改变会影响全部的频域特性。然而在继电保护中，对于一些突发性故障，我们特别关心电量发生突变的时刻（故障时刻）以及在这一段局部时域中的频谱特性。Fourier 变换显然不适合时域这样的突变信号的时-频分析。

近年来发展起来的小波分析 (Wavelet Analysis) 为解决这一难题提供了完美的工具。小波分析的特点在于：对于检测高频信号，其时窗会自动变窄，同时频窗变宽，使得它能包含丰富的频率分量；而在监测低频信号是，其时窗则会自动变宽，相应的频窗变窄。与加窗 Fourier 变换相比，它刻画低频分量有更高的分辨率。这种自适应的“变焦”功能决定了小波变换在突变信号处理上的特殊地位。

通过新的数学手段,故障信号整个频带的信息可以同时被用来检测故障,为提高故障判别的精度提供了手段,并能够使一些基于单一工频信号的传统算法难以识别的问题得到解决。自从1986年Meyer构造出了一个二进制伸缩与平移小波函数系以来,已有多种小波函数得到应用,如二进小波、B\_样条小波、Mayer小波等,并发展出许多小波分析方法,如Mallat塔式算法、小波包算法等。小波分析已广泛应用于地震勘探、图像处理、流体湍流、机器视觉等许多领域,取得了令人瞩目的成就。

在电力系统中,小波分析也是大有作为的。可以将它用于奇异信号检测,滤波与去噪,故障定位等许多方面。目前,小波分析在电力系统主设备保护中的应用主要可以归纳为两方面:一是利用小波变换捕捉和处理微弱突变信号的能力进行故障监测。这也是小波分析在继电保护中的基本用法。二是利用小波分析这一新的数学工具,寻找新的故障特征,这是一个全新的领域,虽然目前成果还不多,但是相信会是一个很有前景的研究方向。小波分析是一个崭新的数字信号处理工具,随着这门学科自身不断的发展和继电保护研究者对它认识的不断深入,它必将在继电保护领域发挥更加重要的作用,为继电保护的发展做出更大的贡献<sup>[43]</sup>。

## 1.4 论文的主要工作和章节安排

本论文工作从超高压电网安全稳定运行对继电保护的实际情况出发,围绕设计和构成微机超高压输电线路成套保护装置这一中心课题展开。针对微机距离保护中现存的不足之处,进行了较系统和深入的理论研究。主要内容包括:建立ATP-EMTP仿真模型,开发距离继电器静态特性仿真软件,对目前微机距离保护中普遍使用的接地距离继电器的静态运行特性进行理论分析和数字仿真,在此基础上,提出一种超高压输电线路后备保护方案。具体的章节安排如下:

- 1 综述微型机线路保护的发展历史、研究现状以及微机继电保护发展的新技术和新趋势。通过对研究现状的重点介绍,明确本论文的主要研究内容和研究方向。

- 2 介绍距离继电器静态运行特性的分析方法,着重介绍了距离继电器运行特性的计算机辅助分析方法。

- 3 在介绍ATP程序的基础上,建立了更符合实际情况的500kV系统模型,其网络结构为考虑分布参数的平行双回线接环网,共有三个等值系统并加了一台空载变压器,并且详细描述了各种模型的参数计算方法以及对各种短路故障进行仿真的方法。

- 4 介绍了利用MFC (Microsoft Foundation Class Library)和可视化开发工具Microsoft Visual C++ 6.0开发的距离继电器分析软件TRCP。程序运行在Windows操作系统下,具有方便直观的界面,可以方便地分析各种距离继电器的特性,比较、研究继电器在不同条件下的动作情况。

# 华中科技大学硕士学位论文

---

---

5 对几种接地距离继电器进行了静态特性的仿真研究, 根据仿真结果, 提出了距离保护的一种改进方案。

6 本章介绍了以 DSP 为硬件平台的一套超高压线路保护装置的后备保护方案, 该方案的保护范围无死区, 躲负荷能力强, 适应非全相运行并易于现场运行人员理解掌握。

7 全文总结。



## 2 距离继电器静态运行特性的分析方法

本章详细介绍了两类距离继电器的分析方法，即相量推导的方法和数字仿真分析的方法，并比较了两种方法的优缺点及其不同的应用范围。

### 2.1 概述

继电保护中，距离继电器的工作状态有两种——动作状态与不动作状态。在运行中，常有一些变化的因素影响继电器的工作状态。当某一因素沿一定轨迹变化而使继电器始终处于临界动作状态时，这一轨迹就称为继电器的动作特性。这一变化的因素就是决定继电器这一动作特性的变量。继电器的动作特性与变量的选择有密切的关系，不同的变量将得出表现形式不同的动作特性。而变量的选择与继电器的构成原理、研究对象及故障的形式等有密切的关系。常用的变量有：测量阻抗  $Z_m$ ，支接阻抗  $Z_f$ （支接电阻  $R_f$ ），振荡阻抗  $Z_n$ 。此外，电源电势比值  $m$  和电势角  $\delta$  等也属于这一类变量。

一般来说，对距离继电器构成原理的分析方法可分为两类：相量推导的方法和数字仿真分析的方法。其中，相量推导的方法又包括电压相量图法，电流电压相量图法，阻抗分析法等。数字仿真分析方法<sup>[44~47]</sup>大多是利用 EMTP(Electromagnetic Transient Program)、ATP(Alternative Transient Program)、EMTDC(Electromagnetic Transient Direct Current Program)、MATLAB(Matrix Laboratory)，或者根据需要，编写程序进行仿真研究。

本论文的工作重点是研究具有新原理的接地距离继电器的性能。在采用新原理和新方法改进接地距离保护工作性能方面，如何提高保护耐受过渡电阻能力的研究占有重要地位。论文将对各种具有新原理的接地距离继电器，如多相补偿接地距离继电器、双下偏接地距离继电器、四边形接地距离继电器、故障分量距离继电器等的静态运行特性进行分析。

论文中对距离继电器的静态运行特性进行分析时采用的方法有：1.用电压相量图法分析继电器的动作情况；2.用数字仿真分析方法分析距离继电器的支接电阻特性。

下面，对这两种方法做重点介绍。

## 2.2 相量推导分析方法

利用相量图分析继电器的工作行为一直是继电保护人员使用的基本方法。单相阻抗继电器的动作行为可利用其测量阻抗进行分析。而现代距离继电器的原理日趋复杂,不再反映单一的电流和电压,其动作特性很难、甚至不可能在阻抗平面上表示出来,必须求助于相量图。相对数字仿真分析方法而言,相量图分析法使用起来更简便,能清晰、直观地看出系统参数和继电器的定值等变化时对继电器工作行为的影响。

### 2.2.1 电压相量图法

为了分析距离继电器的工作行为作电压相量图有一定的难度,这主要表现在以下4方面<sup>[16]</sup>:

1. 由于距离继电器都要反映补偿电压或其它由电压与电流组成的复合电压,故为了作出它们的相量不仅要确定电压和电流的相位,而且要确定它们的幅值。
2. 为分析距离继电器的行为,不仅要知道故障相的量而且要知道健全相的量,所以在作电压相量图时要计及各相之间的互感。
3. 为了分析双侧电源状态下距离继电器的工作行为,在作电压相量图时要计及负荷电流的影响。
4. 为了分析过渡电阻对距离继电器工作行为的影响,要做出过渡电阻值在很大范围内变化时的电压相量图。

总之,在作图不仅要能定性(确定电压与电流的相位),而且要能定量(确定它们的幅值),这些正是作补偿电压相量的需要。实际上在作图时是从给定的系统参数和运行方式(由电动势所决定)出发作出一次系统的电压相量图,在系统电压相量图上不难找到某一电流在某一已知阻抗上的压降,于是就可决定继电器中某一电流在任一阻抗上的压降。

电压相量图法的特点是方法简便,概念清楚,只需辅以少量的计算,就能获得较为精确的结果,很适合距离继电器的动作分析。但是,由于作图的精度终究有限,况且精确分析并非应用相量图分析的初衷,在实际使用时往往酌情简化。

下面以常规 $I_0$ 极化接地距离继电器在单相经过渡电阻 $R_f$ 接地故障的分析为例说明这种方法。

常规 $I_0$ 极化接地距离继电器的动作条件判别式为:

$$180^\circ \leq \arg\left(\frac{\dot{U}'}{i_0}\right) \leq 360^\circ \quad (\text{式 2.1})$$

式中  $\dot{U}' = \dot{U} - (i + ki_0)Z_{set}$  为加于继电器的补偿电压，即整定点 Y 的等值电压； $\dot{U}$ 、 $i$  分别为继电器安装侧故障相的相电压、相电流； $k = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}$  为输电线路阻抗的零序补偿系数； $Z_0$ 、 $Z_1$  为线路单位长度的零序、正序阻抗； $Z_{set}$  为距离继电器的整定阻抗； $i_0$  为流过继电器的零序电流；在  $i_0$  极化接地距离继电器中，采用  $i_0$  作为极化电流。

分析时考虑图 2.1 所示的双侧电源系统。

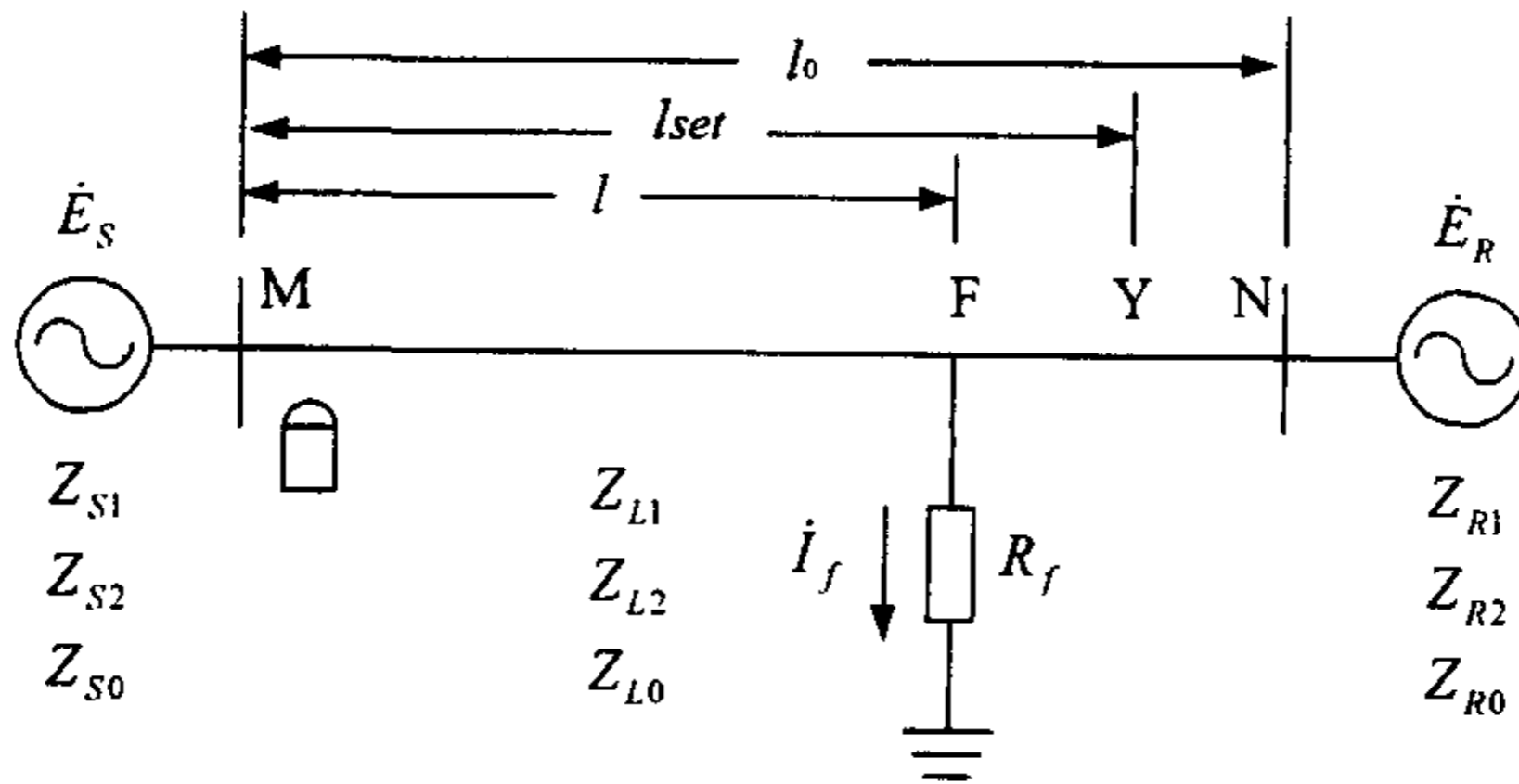


图 2.1 系统模型

图中， $\dot{E}_S = E_S \angle \delta$  和  $\dot{E}_R = E_R \angle 0^\circ$  为被保护输电线路 MN 两侧电源的电势； $Z_{S1}$ 、 $Z_{S2}$ 、 $Z_{S0}$ 、 $Z_{R1}$ 、 $Z_{R2}$ 、 $Z_{R0}$ 、 $Z_{L1}$ 、 $Z_{L2}$ 、 $Z_{L0}$  分别为本侧电源、对侧电源、输电线路的正序、负序、零序阻抗； $l$  为故障距离； $l_{set}$  为故障距离的整定值； $l_0$  为输电线路的长度。

用电压相量图分析时，就是要找出在故障时的补偿电压  $\dot{U}'$  和极化电流  $i_0$  的相量位置，从而根据(式 2.1)判定继电器是否动作。

单相接地故障为不对称故障，为简化分析，仅考虑故障相的情况。因此，分析中仅绘出故障相的各电压向量。

具体分析方法如下：

1. 计算短路时短路点电压  $\dot{U}'_F$

利用叠加原理进行短路计算。单相接地短路时，流向故障点的正序、负序、零序电流分量相等，且有：



$$i_{f1} = i_{f2} = i_{f0} = \frac{\dot{U}_F}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0} + 3R_f} \quad (\text{式 2.2})$$

式中， $\dot{U}_F$  为短路点 F 在故障发生前的电压； $Z_{\Sigma 1}$ 、 $Z_{\Sigma 2}$ 、 $Z_{\Sigma 0}$  分别为系统归算到短路点 F 的等值正序、负序、零序阻抗。

流过短路点的故障电流为：

$$i_f = i_{f1} + i_{f2} + i_{f0} = \frac{3\dot{U}_F}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0} + 3R_f} \quad (\text{式 2.3})$$

短路时短路点电压为：

$$\dot{U}'_F = R_f i_f = R_f * \frac{3\dot{U}_F}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0} + 3R_f} \quad (\text{式 2.4})$$

## 2. 作出短路后的电压相量图

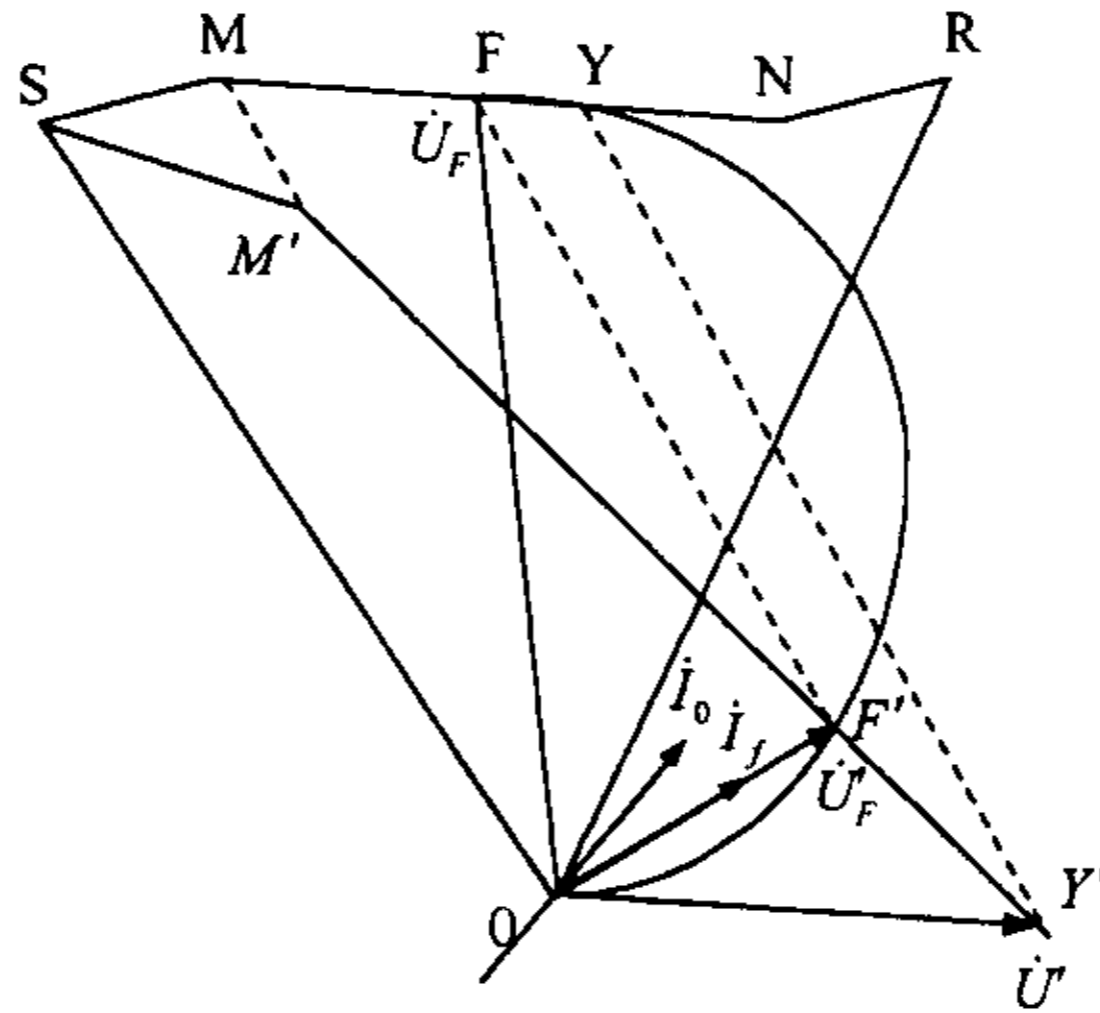


图 2.2 内部单相接地短路时故障相的电压相量图

图 2.2 是短路后的电压相量图。图上任意两点之间的距离和方向都表示该两点之间的电压相量差。例如： $\overline{OF}$  就表示短路前 F 点的电压  $\dot{U}_F$ ， $\overline{OF'}$  就表示短路后故障点的电压相量  $\dot{U}'_F$ 。S, M, F, Y, N, R 就是图 2.1 中短路前系统上的各点在电压相量图上的位置， $M'$ ,  $F'$ ,  $Y'$  则是短路后各相应电压相量变化后的位置。SMFY 四点应与  $S M' F' Y'$  四点保持几何相似，这是由于短路前后发生变化的仅是流过各部分阻抗的电流，所以，虽然各部分电压降的大小和方向发生了变化，但比例关系保持不变，相对位置应该保持几何相似。另外， $\overline{OY'}$  是短路时 M 侧继电器的补偿后电压  $\dot{U}'$ ，所

以,  $Y'$  是由  $M'F'$  按比例延伸而得。

短路后电压相量图的作图过程如下: 首先作正常时电压多边形  $OSMFYNR$ , 根据(式 2.3)相对于  $\overline{OF}$  作  $i_f$  相量, 由于  $R_f$  为纯电阻, 短路后的故障点电压  $\overline{OF'}$  与  $i_f$  同相。由戴维南等效定理知, 从短路点看去的系统等效阻抗保持不变,  $\angle OF'F$  也保持不变, 即可作出  $OF'F$  圆弧, 此圆弧即为  $R_f$  变化时  $F'$  点的轨迹。当定出  $\overline{OF'}$  大小时就定出  $F'$  点, 按几何相似原理, 使折线  $SM'F'Y'$  与折线  $SMFY$  相似。图中所示情况表明: 内部故障时, 由于过渡电阻  $R_f$  不大,  $U'$  落在动作区内, 继电器能正确动作。

## 2.3 数字仿真分析方法

从以上的分析可以看到: 用相量图分析方法, 例如电压向量图法直接按继电器的动作条件判别式观察继电器是否动作时, 是很直观的。论文中采用这种分析方法来分析在某些具体情况下接地距离继电器的动作行为, 取得了较好的效果。但是, 这种方法分析的是一个具体的短路点、一个具体的过渡电阻状态下继电器的动作情况, 而要观察某一个变量(如支接电阻)在不同数值时对继电器动作情况的影响轨迹时, 采用这种方法则需要多次计算, 才能求出该变量的临界动作特性(如支接电阻动作特性)。如果用数值仿真的方法, 利用计算机来辅助分析距离继电器的静态动作特性, 则可以通过一次计算直接找出该变量的临界动作特性。“直接法”就是这样的一种方法。

### 2.3.1 “直接法”原理<sup>[48]</sup>

“直接法”的出发点是先给定过渡电阻值, 计算流入继电器的电流、电压值, 然后计算继电器的动作条件判别式以判断它是否动作, 根据这一判断再修改过渡电阻值重新计算, 逐步逼近两个临界电阻  $R_1$  和  $R_2$ 。

具体来说, 当在线路上某一点发生金属性短路时继电器动作, 计  $R_1 = 0$ , 然后等步长的增加过渡电阻  $R$ , 即  $R + \Delta R_0 \rightarrow R$ , 其中  $\Delta R_0$  为支接电阻变化的初始步长, 一旦计算结果表明继电器由动作转为不动作时,  $\Delta R$  取负值, 往后就采用图 2.3 所示步长减幅二分之一反复逼近的方法。

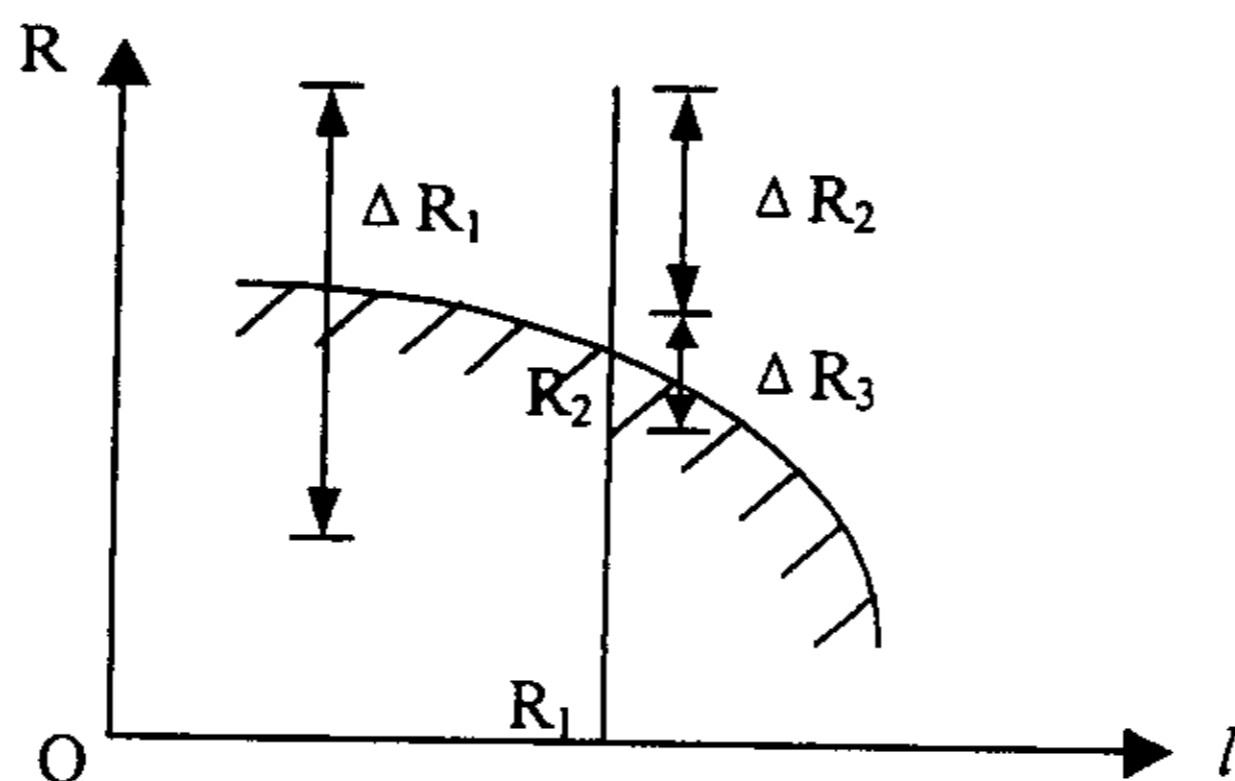


图 2.3 步长减幅二分之一反复逼近

图 2.3 中, 在  $\Delta R_1 = \Delta R_0$  时, 继电器由动作转为不动作, 则取  $\Delta R_2 = -\frac{1}{2}\Delta R_1$  对过渡电阻  $R$  进行修正  $R + \Delta R_2 \rightarrow R$ , 此时, 如果继电器仍不动作, 则取  $\Delta R_3 = \frac{1}{2}\Delta R_2$ ; 反之, 如果继电器由不动作转为动作, 则取  $\Delta R_3 = -\frac{1}{2}\Delta R_2$ , 对过渡电阻进行修正  $R + \Delta R_3 \rightarrow R$ , 如此反复, 直到第  $k$  次的  $|\Delta R_k| < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为过渡电阻计算的精度) 时, 停止计算并取最后一个过渡电阻的值为临界过渡电阻  $R_2$ 。

当在金属短路状态下继电器不动作时, 采用较小的等步长电阻正向增加过渡电阻  $R$  进行“扫描”, 进入动作区后再用上述减半步长法逐步逼近真值  $R_1$  和  $R_2$ 。

这样, 通过初始的等步长扫描和减半步长逐步逼近的方法, 可以比较迅速而精确的计算出两个临界支接电阻值  $R_1$  和  $R_2$ 。

### 2.3.2 “改进直接法”原理

由于只找到两个临界支接电阻值, 上述“直接法”存在一定的局限性<sup>[49]</sup>。

其一, 当线路上某一点发生短路时, 继电器对所有的  $R$  值都动作, 但中间有一个不动区, 如图 2.4 所示, 这时采用“直接法”将会把动作特性的上半部分  $[R_3, \infty]$  漏掉。

其二, 当在一个短路点有四个临界支接电阻时, 如图 2.5 所示, 用“直接法”只能得到其中的两个临界电阻值  $R_1$  和  $R_2$ , 另外一个支接电阻动作区  $[R_3, R_4]$  将被丢掉。



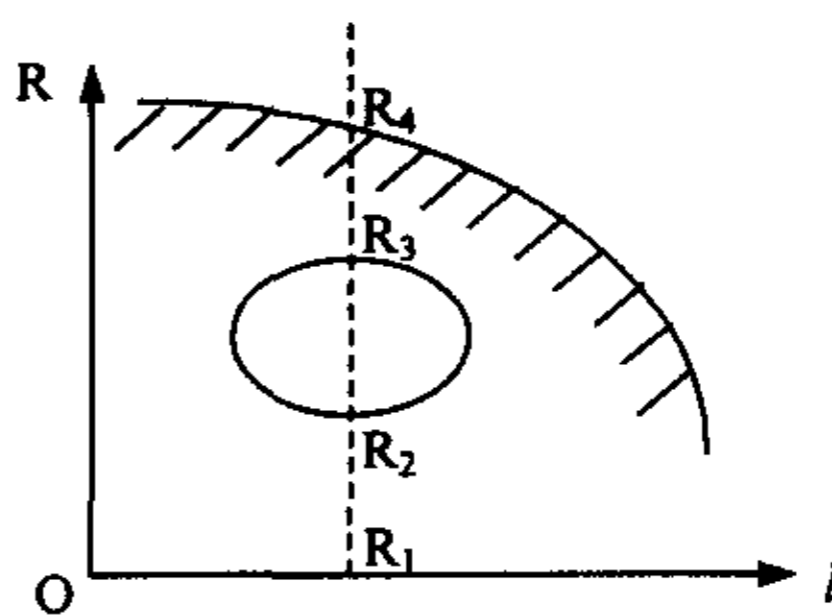
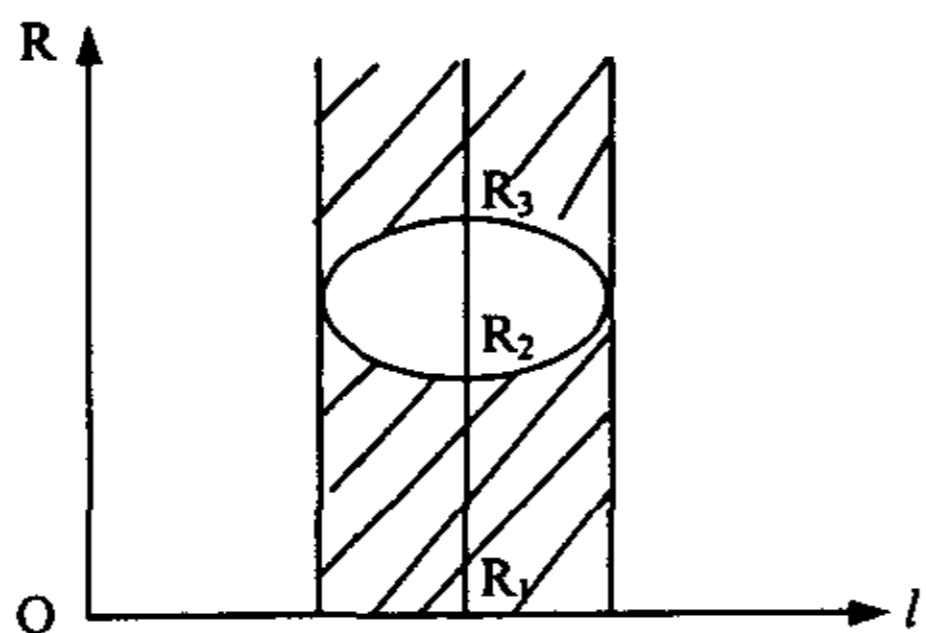


图 2.4 中间有一个不动区的支接电阻动作特性      图 2.5 有四个临界电阻值的支接电阻动作特性

考虑到上述局限性，可在原“直接法”的基础上，增加从过渡电阻  $R = R_{\max}$  ( $R_{\max}$  为过渡电阻计算的最大范围) 开始逐渐减小过渡电阻以搜寻另外两个临界支接电阻  $R_3$  和  $R_4$ 。这样，在  $[0, R_{\max}]$  这个过渡电阻闭区间上，当过渡电阻  $R \in [R_1, R_2] \cup [R_3, R_4]$  时，继电器动作；否则，继电器不动作。

具体情况又可分为以下三种：

1. 当距离继电器只有一个支接电阻动作区时，用“改进直接法”分析时，必然会有  $R_1 = R_3$ ， $R_2 = R_4$ ，在闭区间  $[0, R_{\max}]$  上，当过渡电阻  $R \in [R_1, R_2]$  时，继电器动作；否则，继电器不动作。

2. 当距离继电器的支接电阻动作特性为所有的  $R$  值都动作，但中间有一个不动区时，用“改进直接法”分析时， $R_1 = 0\Omega$ ， $R_4 = R_{\max}$ ，在闭区间  $[0, R_{\max}]$  上，当过渡电阻  $R \in [0, R_2] \cup [R_3, R_{\max}]$  时，继电器动作；否则，继电器不动作。

3. 当在一个短路点有四个临界支接电阻值时，该继电器的支接电阻动作特性不再是一个圆，而是较复杂的曲线，此时，用“改进直接法”分析时，在闭区间  $[0, R_{\max}]$  上，当过渡电阻  $R \in [R_1, R_2] \cup [R_3, R_4]$  时，继电器动作；否则，继电器不动作。

## 2.4 本章小结

由于本论文的工作重点是研究具有新原理的接地距离继电器的性能，而如何提高保护耐受过渡电阻能力是研究中的一个重要方面，因此，本章详细介绍了距离继电器的分析的方法：相量推导的方法和数字仿真分析的方法。并重点介绍了论文中用到的分析方法：1. 用电压相量图法分析继电器的动作情况；2. 用数字仿真分析方法——“改进直接法”分析距离继电器的支接电阻特性。

### 3 ATP-EMTP 网络模型的建立

本章在介绍 ATP 程序的基础上,建立了更符合实际情况的 500kV 系统模型,其网络结构为考虑分布参数的平行双回线接环网,共有三个等值系统并加了一台空载变压器,文中还详细描述了各种模型的参数计算方法以及对各种短路故障进行仿真的方法。

#### 3.1 引言

对距离继电器的新原理进行仿真研究,建立一个典型的、有代表性的电力网络模型是必不可少的。由于计算条件的限制,通常的分析模型是采用集中参数的双端电源网络。对这种模型进行故障计算比较简单,文献[48、49]建立基于单回线路的模型,利用对称分量法,根据复合序网进行故障计算,求解出流入继电器的电流、电压;文献[50]建立基于平行双回线的模型,采用相量进行计算,直接列写线路方程和边界条件方程,联立求解得到整个线路模型上的主要电流、电压值。

上述的模型仅考虑了最简单的情况,没有考虑现实电网中普遍存在的环网情况。另一方面,对长距离输电线来说,集中参数模型已经不能满足仿真需要,分布参数模型更符合实际情况。本章利用 ATP-EMTP 可以建立复杂网络模型的优势,建立如图 3.1 所示的较为复杂的 500kV 系统模型,对各种短路故障进行仿真计算。被保护的线路是 I 线,继电器可以装在 M 或 N 处。

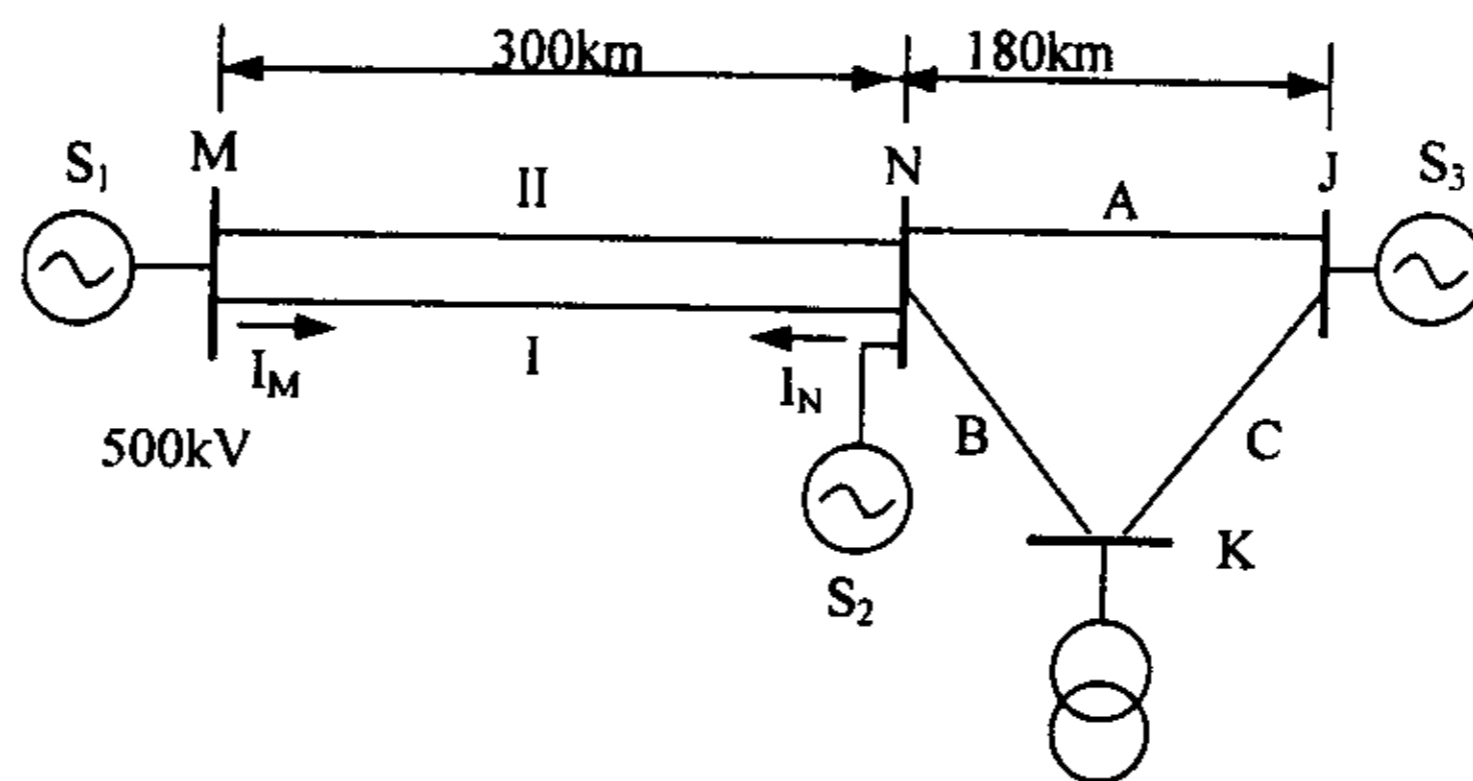


图 3.1 ATP-EMTP 仿真系统示意图

## 3.2 ATP-EMTP 仿真软件介绍

EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) 是由加拿大 UBC (University of British Columbia) 教授 H.W.Dommel 在美国 BPA(Bonneville Power Administration) 工作期间, 于 1968 年首先编制的电磁暂态程序, 以后又经过很多专家的不断努力而日臻完善。BPA 对 EMTP 的开发工作做出了很大贡献, 广泛吸收了好的模型和新的功能, 版本不断扩大和更新。

1984 年, DCG (the EMTP Development Coordination Group) 和 EPRI(the Electric Power Research Institute) 分别提议将 BPA-EMTP 和 EPRI-EMTP 商品化, 而加拿大 EMTP 用户团和美国 EMTP 用户团的副主席 W. Scott Meyer 和 Tsu-huei Liu 反对这个决定。Tsu-huei Liu 辞去 DCG 主席职位, 而 Meyer 博士利用自己的私人时间, 开始在 BPA-EMTP 的公开版本的基础上编制一个新的程序——ATP。

ATP 是 EMTP 的免费版本, 也是目前世界上使用最广泛的一个电磁暂态分析程序, 其基本功能是进行电力系统仿真计算, 典型的应用是预测电力系统在某个扰动(如开关投切或故障)之后感兴趣的变量随时间变化的规律, 这对于继电保护新原理的研究而言是十分必要的。

目前 PC 机上流行的 ATP 版本有两种, 一种是 Salford ATP-EMTP, 另一种是 Watcom ATP-EMTP。Salford ATP-EMTP 可以在 MS-DOS、Window 3.X、Win95/98 下运行, 但需要一个叫做 DBOS 的 DOS 扩展器被包含在程序盘中。该版本的优点是可以使用 TPLOT(也需要 DBOS)作为图形输出工具(用来看图、画图和存图)。Watcom ATP-EMTP 是一个真正的 32 位 Windows 应用程序, 可以在 Win95/NT 下运行, 不能在 Windows 3.X 下运行。它的图形输出工具是 PCPLOT。本文中采用的版本是 Salford ATP-EMTP。

应用 ATP 程序对系统进行仿真计算, 其基本步骤是先从 ATP 元件库中正确选取所需的数学模型, 并按希望计算的系统构造出对应的系统模型, 填写好相应的参数, 在完成以上步骤之后, 便可以根据所需加入扰动, 以便由 ATP 计算出扰动后的暂态过程。

目前, ATP-EMTP 的数学模型包括以下几种:

集中参数的电阻 R、电感 L 和电容 C

多相 PI 等值电路

多相分布参数输电线路

非线性电阻, 其中的  $v \sim i$  特性曲线是单值的

非线性电感, 既可模拟单值特性曲线, 也可包括剩磁和磁滞

时变电阻

开关, 用来模拟断路器、火花间隙及其它网络连接的改变, 二极管和晶闸管也包括在内。

电压和电流源, 除了标准的数学函数波形外, 用户还可以用 FORTRAN 或 TACS 来定义波形。

动态旋转电机, 除了模拟最常用的三相同步电机外, 还可以模拟单相、两相和三相感应电机和直流电机, 它与 TACS 控制系统模型相连接, 可模拟电压调节器和调速器等动态过程。

变压器, 提供了单相理想变压器, 单相饱和变压器, 三相饱和变压器(包括 D/D, Y/Y, Y/D, D/Y, Y/Y/D 各种接线形式)。

控制系统可以用 TACS(Transient Analysis of Control System)来实现, 允许不同种类的非线性和逻辑运算, 控制系统的输入和输出可以和 EMTP 的电网接口, 以模拟各种闭环控制, 如线路保护的重合闸过程。

提供了通用描述语言 MODELS, 允许用户自己构造 ATP 未提供的模型。

此外, ATP 为方便用户, 使之能快捷的生成所需的系统数学模型, 还提供了基于 Windows 的图形输入程序 ATPDraw, 作为 ATP 的前处理程序, 用户只需在其图形化的元件库中选取相应的元件, 并在其提供的表格中填写对应的模型参数, 就可快速生成 ATP 的数据输入文件, 而不需像以前那样需按固定的格式填写数据卡。其主界面如下图所示:

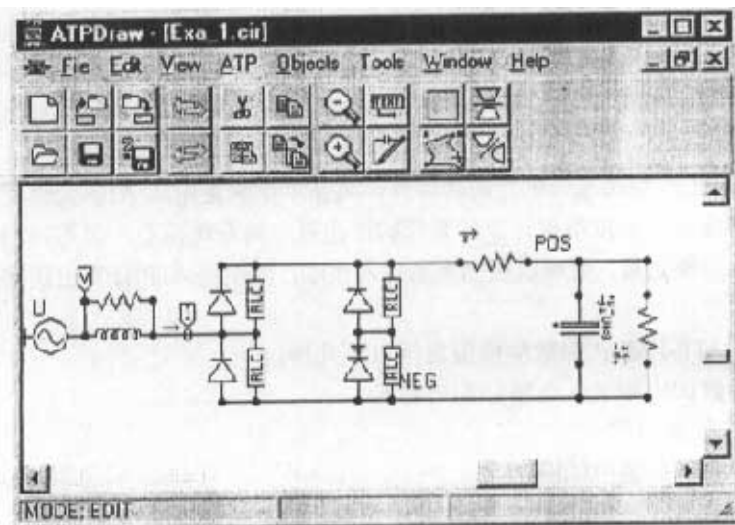


图 3.2 ATPDraw 主界面



## 3.3 ATP 模型搭建

在本章建立的仿真系统模型中，用到了分布参数输电线路元件、平行双回线元件、变压器元件、短路故障等元件，下面分别介绍这些元件在 ATP 中对应的模型，以及参数的构造方法。

### 3.3.1 分布参数输电线路模型

本章所建模型的环网部分采用分布参数的单回输电线路模型。线路结构为一条三相回路，其线路模型共有三相导线，假设线路连续换位，则其阻抗矩阵结构为：

$$\begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix}$$

其中： $Z_s$ ——线路的自阻抗；

$Z_m$ ——线路的互阻抗；

在 ATPDraw 中，这两个不同的相间耦合的参数  $Z_s$  和  $Z_m$  可以间接的用两个无耦合序量  $Z_1$ 、 $Z_0$  来指定，它们之间的关系是：

$$\text{正序阻抗} \quad Z_1 = Z_s - Z_m;$$

$$\text{零序阻抗} \quad Z_0 = Z_s + 2Z_m;$$

本文所建模型中环网输电线的参数为：

正（负）序电阻  $R_1 = R_2 = 0.027 \Omega/\text{km}$

零序电阻  $R_0 = 0.1948 \Omega/\text{km}$

正（负）序电感  $L_1 = L_2 = 0.86\text{mH}/\text{km}$

零序电感  $L_0 = 2.4\text{mH}/\text{km}$

正（负）序电容  $C_1 = C_2 = 0.0123 \mu\text{F}/\text{km}$

零序电容  $C_0 = 0.0071 \mu\text{F}/\text{km}$

每段线路长度： $l = 60 \text{ km}$ 。

在 ATPDraw 中的具体填写参见图 3.3。

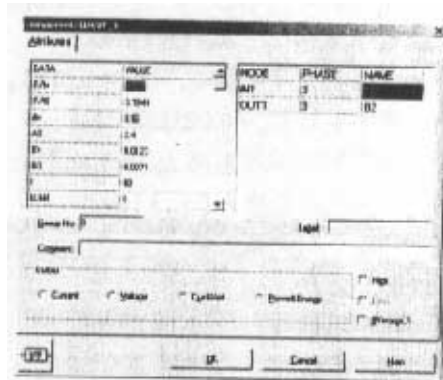


图 3.3 分布参数输电线路参数卡

### 3.3.2 分布参数平行双回线模型

平行双回线的线路结构为两条三相回路，其线路模型共有六相导线，假设每一回路本身是独立连续换位的，但在两个回路之间存在着零序耦合，则其阻抗矩阵结构为：

$$\begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_m & Z_s & Z_m & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_m & Z_m & Z_s & Z_p & Z_p & Z_p \\ \hline Z_p & Z_p & Z_p & Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix}$$

其中： $Z_s$ ——只与自身回路有关的自阻抗；

$Z_m$ ——只与自身回路有关的互阻抗；

$Z_p$ ——回路的任何一相导线对另一回路的任何一相导线之间的互阻抗；

在 ATPDraw 中，这三个不同的相间耦合的参数  $Z_s$ 、 $Z_m$  和  $Z_p$  可以间接的用三个模量耦合参数  $Z_G$ 、 $Z_L$ 、 $Z_{IL}$  来指定，它们之间的关系是：

地模量  $Z_G = Z_s + 2Z_m + 3Z_p$ ；

线模量  $Z_L = Z_s - Z_m$ ；

线间模量  $Z_{IL} = Z_s + 2Z_m - 3Z_p$ 。

本文所建模型中平行双回线的参数为：

正（负）序电阻  $R_1 = R_2 = 0.027 \Omega / \text{km}$

零序电阻  $R_0 = 0.1948 \Omega / \text{km}$

正（负）序电感  $L_1 = L_2 = 0.86 \text{mH} / \text{km}$

零序电感  $L_0 = 3.6 \text{mH} / \text{km}$

正（负）序电容  $C_1 = C_2 = 0.0123 \mu \text{F} / \text{km}$

零序电容  $C_0 = 0.0051 \mu \text{F} / \text{km}$

线路间的零序电感  $L_{m0} = 1.8 \text{mH} / \text{km}$

每段线路长度： $l = 15 \text{km}$ ；

利用下列关系式将  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_{m0}$  换算

成  $Z_G$ 、 $Z_L$ 、 $Z_{IL}$ ：

正序阻抗  $Z_1 = Z_s - Z_m$

负序阻抗  $Z_2 = Z_s + 2Z_m$

零序耦合阻抗  $Z_{m0} = 3Z_p$ 。

在 ATPDraw 中的具体填写参见图 3.4。

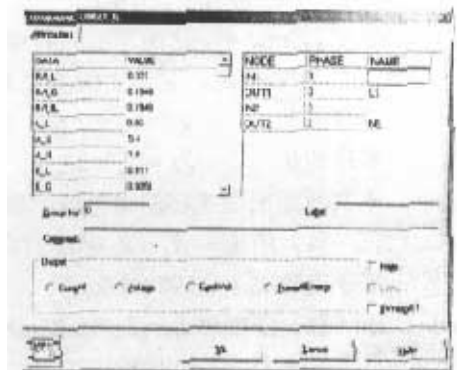


图 3.4 分布参数平行双回线参数卡

### 3.3.3 饱和变压器模型

本章所建模型的环网部分加了一台空载变压器，选用三相两绕组芯式变压器，其

高压绕组为星型接法且中性点接地，低压绕组为三角型接法。其目的主要是考察变压器支路在短路故障时产生的零序电流对保护的影响。在 ATP 中，用三个单相饱和和变压器来模拟三相变压器。 $\Delta-Y_0$  接法的变压器模型可用图 3.5 表示基本元件的连接：

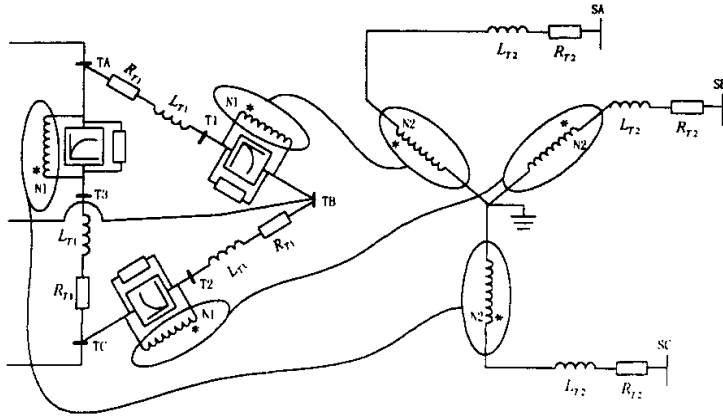


图 3.5 变压器模型

其中， $R_{T1}$  和  $L_{T1}$  是原边漏抗参数（假设对三个变压器都是一样的）， $R_{T2}$  和  $L_{T2}$  是副边漏抗参数，第一台单相变压器的内部结点的名字是“T1”，其原边的两个端点名为“TA”和“TB”，副边的两个端点名为“SA”和大地，对应的其它两台变压器的数值相同。

在仿真系统图 3.1 中，假设使用的变压器是线性的，并且激磁阻抗无穷大。因为在本章中建立变压器模型的目的是不是分析变压器的故障，而只为计及变压器接地支路在故障时对零序网络电流分布的影响，所以不需要考虑变压器的饱和特性，只考虑原边和副边的漏抗参数以及变比就足够了。

该变压器具体参数如下：

$$S_N = 750\text{MVA} \text{ (额定功率)} \quad U_{1N} = 23\text{kV} \quad U_{2N} = 550 \pm 2 * 2.5\% \text{kV} \text{ (额定电压)}$$

$$U_S\% = 0.14 \text{ (短路阻抗)} \quad \Delta P_S = 1510\text{kW} \text{ (短路损耗)}$$

$$I_0\% = 0.15\% \text{ (空载电流)} \quad \Delta P_0 = 370\text{kW} \text{ (空载损耗)}$$

下面确定变压器原、副边的漏抗参数（ $R_{T1}$ 、 $L_{T1}$ 、 $R_{T2}$  和  $L_{T2}$ ）以及变比。

1. 计算原、副边阻抗基准值：

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}^2}{S_N} = \frac{(23 * 10^3)^2}{750 * 10^6} = 0.7053\Omega$$

$$Z_{2N} = \frac{U_{2N}^2}{S_N} = \frac{(550 \cdot 10^3)^2}{750 \cdot 10^6} = 403.33 \Omega$$

2. 计算原、副边短路电阻 ( $R_{T1}$ 、 $L_{T1}$ 、 $R_{T2}$ 和 $L_{T2}$ ):

折算到高压侧的短路电阻

$$R_T = \frac{\Delta P_S \cdot U_{2N}^2}{S_N^2} = \frac{1510 \cdot 10^3 \cdot (550 \cdot 10^3)^2}{(750 \cdot 10^6)^2} = 0.81204 \Omega$$

在高压侧分配一半  $R_{T2} = \frac{R_T}{2} = \frac{0.81204}{2} = 0.40602 \Omega$

另一半折算到低压侧  $R_{T1} = \frac{R_T}{2 \cdot Z_{2N}} \cdot Z_{1N} = \frac{0.81204}{2 \cdot 403.33} \cdot 0.7053 = 0.00071 \Omega$

又原、副边短路电抗标么值  $X_{T1}^* = X_{T2}^* = \frac{U_S \%}{2} = 0.07$

折算到低压侧  $X_{T1} = X_{T1}^* \cdot Z_{1N} = 0.07 \cdot 0.7053 = 0.0494 \Omega$

$$L_{T1} = \frac{X_{T1}}{\omega} = \frac{0.0494}{100\pi} = 0.1572 \text{mH}$$

折算到高压侧  $X_{T2} = X_{T2}^* \cdot Z_{2N} = 0.07 \cdot 403.33 = 28.2331 \Omega$

$$L_{T2} = \frac{X_{T2}}{\omega} = \frac{28.2331}{100\pi} = 89.91 \text{mH}$$

3. 计算变比:

在 ATP 中, 变比是通过给定变压器原、副边的绕组电压有效值来确定的。

由于原边为三角形接法, 原边的额定电压就是绕组电压:

$$U_p = U_{1N} = 23 \text{kV}$$

副边为星形接法, 将副边额定电压换算成绕组电压:

$$U_s = \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{550}{\sqrt{3}} = 318 \text{kV}$$

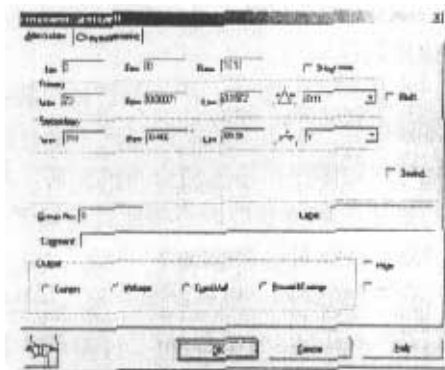


图 3.6 两绕组变压器参数卡

以上参数在 ATPDraw 中的具体填写参见图 3.6, 需要说明的是由于假设使用的变压器是线性的, 并且激磁阻抗无穷大, 因此图中的  $I_0 = 0$ ,  $F_0 = 0$ ,  $R_m = 10^{12} \Omega$ 。



## 3.3.4 短路故障模型

当发生电阻性短路故障时,故障模型如图 3.7 所示。

图中用到一个叉分元件将故障点的三相分别引出,每相支路都接了一个纯电阻和一个时控开关,三相支路并起来之后接了一个接地支路,接地支路同样是由一个纯电阻和一个时控开关组成。

没有发生故障的时候,图 3.7 中的所有开关都是断开的;如果发生故障,通过在  $(0, \infty)$  区间上改变图中各个电阻的数值和开关的状态,可以等效各种电阻性短路故障。

例如,要仿真 A 相接地短路故障,可将[节点 NRA, 节点 SW1]和[节点 SW0, 地]之间的开关闭合,而将其它的开关断开;再将[节点 N0A, 节点 NRA]、[节点 N0B, 节点 NRB]和[节点 N0C, 节点 NRC]之间的电阻设置为一个非常小的值,比如  $10^{-12} \Omega$ , 而将[节点 SW1, 节点 SW0]之间的电阻设置成需要的接地短路电阻值。

如果仿真 AB 两相接地短路故障,可将[节点 NRA, 节点 SW1]、[节点 NRB, 节点 SW1]和[节点 SW0, 地]之间的开关闭合,而将其它的开关断开;再将[节点 N0A, 节点 NRA]、[节点 N0B, 节点 NRB]和[节点 N0C, 节点 NRC]之间的电阻设置为一个非常小的值,比如  $10^{-12} \Omega$ , 而将[节点 SW1, 节点 SW0]之间的电阻设置成需要的接地短路电阻值。

仿真 AB 相间短路故障,可将[节点 NRA, 节点 SW1]和[节点 NRB, 节点 SW1]之间的开关闭合,而将其它的开关断开;再将[节点 N0C, 节点 NRC]和[节点 SW1, 节点 SW0]之间的电阻设置为一个非常小的值,比如  $10^{-12} \Omega$ , 而将[节点 N0A, 节点 NRA]和[节点 N0B, 节点 NRB]之间的电阻设置成需要的接地短路电阻值。

如果仿真 ABC 三相接地短路故障,则将图中所有的开关闭合,再将[节点 N0A, 节点 NRA]、[节点 N0B, 节点 NRB]和[节点 N0C, 节点 NRC]之间的电阻设置为一个非常小的值,比如  $10^{-12} \Omega$ , 而将[节点 SW1, 节点 SW0]之间的电阻设置成需要的接地短路电阻值。

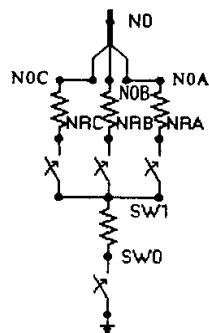


图 3.7 短路故障模型

### 3.3.5 总体模型

整个仿真系统用 ATPDraw 绘出的总体模型如图 3.8。

在图 3.8 中，300km 长的平行双回线等分成 20 段，每段长 15km。环网结构由三条长度均为 180km 的单回线组成，每条线路等分成 3 段，每段长 60km。三个等值系统都由恒定电势源和用三相耦合 RL 支路模型来等效的系统阻抗组成。恒定电势源幅值为 500kV，电势角可以按实际需要进行修改。系统阻抗的幅值和阻抗角也都可以按实际需要进行修改，这样就能够模拟不同的运行工况。

### 3.4 本章小结

本章在介绍 ATP 程序的基础上，利用 ATPDraw 建立了更符合实际情况的 500kV 系统模型。网络结构为考虑分布参数的平行双回线接环网，共有三个等值系统并加了一台空载变压器，并且详细的说明了各种模型的参数计算方法以及对各种短路故障进行仿真的方法。

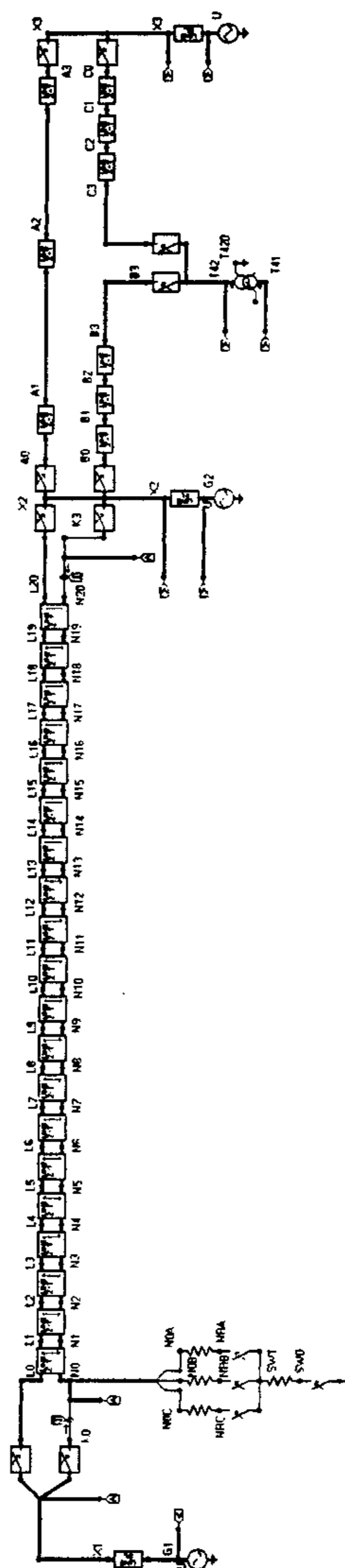


图 3.8 ATP-EMTP 总体仿真系统模型

## 4 距离继电器静态特性仿真分析软件介绍

本章介绍了利用面向对象技术和多线程技术开发的距离继电器静态动作特性仿真分析软件 TRCP。程序运行在 Windows 操作系统下，具有灵活直观的界面，可以方便地分析各种距离继电器的特性，比较、研究继电器在不同条件下的动作情况。

### 4.1 引言

距离继电器支接电阻动作特性的计算机辅助分析方法直接利用计算机进行迭代计算，计算结果可以在平面图上以线路距离——耐受过渡电阻的形式直观地表示出来，十分方便简单。为了分析各种距离继电器的特性，比较、研究继电器在不同条件下的动作情况，作者编写了全新的距离继电器静态动作特性仿真分析软件 TRCP —— Tape-Resistance Operating Characteristics Program。

TRCP 充分利用面向对象技术和多线程技术，采用微软公司的 MFC (Microsoft Foundation Class Library) 和可视化开发工具 Microsoft Visual C++ 6.0(以下简称 VC6) 作为开发环境。程序运行在 Windows 操作系统下，具有灵活直观的界面，大大方便了继电器性能的分析，也为产品开发中的方案比较和选择提供了良好的支持。本章主要介绍 TRCP 的一些情况。

### 4.2 开发环境

简单地说，MFC 是一个编程框架 (Application Framework)。MFC 中的各种类结合起来构成了一个应用程序框架，它的目的就是让程序员在此基础上来建立 Windows 下的应用程序，这是一种相对 SDK(Software Development Kit)来说更为简单的方法。因为总体上，MFC 框架定义了应用程序的轮廓，并提供了用户接口的标准实现方法，程序员所要做的就是通过预定义的接口把具体应用程序特有的东西填入这个轮廓<sup>[51]</sup>。

Microsoft Visual C++ 提供了相应的工具来完成这个工作：App(Application) Wizard 可以用来生成初步的框架文件（代码和资源等）；资源编辑器用于帮助直观地设计用户接口；Class Wizard 用来协助添加代码到框架文件；最后进行程序的编译，通过类库实现了应用程序特定的逻辑。利用 VC6 开发的程序具有模块化的特点，拥有良好的出错管理机制；尤其重要的是：通过调用 WINDOWS 的 API (Application Programming Interface) 函数库和 DLL(Dynamic Link Library)动态链接库，可以极大

地扩展所开发的应用程序的功能<sup>[52]</sup>。

## 4.3 TRCP 设计思想

TRCP 是一个多文档程序，这意味着 TRCP 可以同时打开多个保存的数据文件进行比较分析。TRCP 包含两个线程（如图 4.1 所示）：主线程和仿真计算子线程。主线程主要完成人机交互的功能，包括系统设置模块、结果显示模块和保存模块三部分。仿真计算子线程由主线程产生，主要完成仿真计算的功能，包括 ATP 计算模块、继电器模块和支接电阻模块三部分。

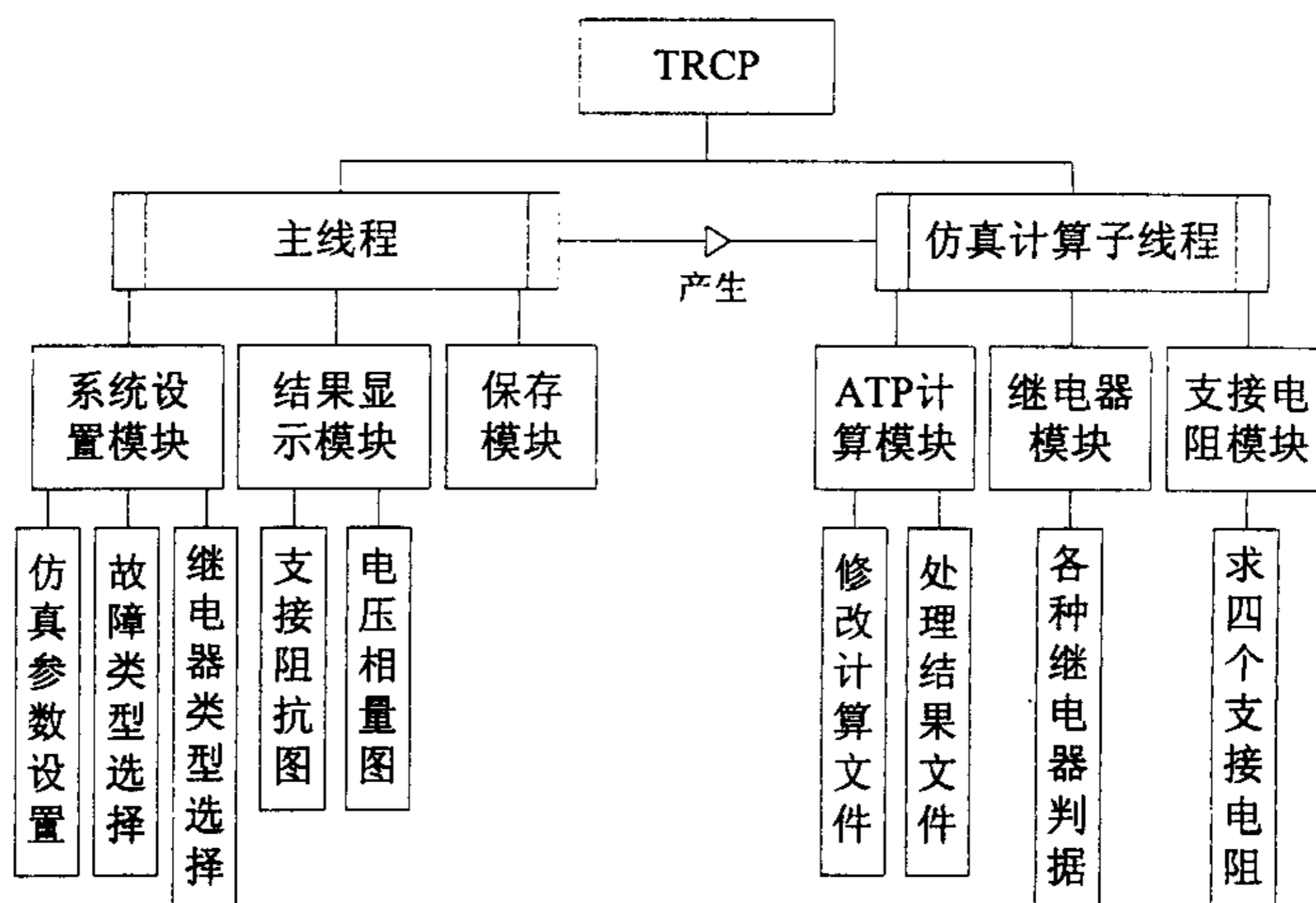


图 4.1 TRCP 的总体结构图

当使用者在主线程的人机交互界面中设定了初始条件（故障类型、继电器类型及必要的整定值、保护安装处、系统电势角和阻抗值、过渡电阻的最大值、步长和计算精度）后，主线程产生一个子线程来完成仿真计算的工作。这样设计的目的是：由于仿真计算的时间相当长，让主线程和子线程分开，可以避免程序主界面长时间没有反应，以免被误认为死机<sup>[53]</sup>。

下面对仿真计算子线程作进一步的说明：

ATP 在进行电磁暂态计算之前，需要先对系统网络模型的初始值和稳态值进行计



算,以便形成必要的输入数据文件,因此 ATP 包括了稳态相量计算。由于我们只是对距离继电器的静态动作特性进行分析,所以利用 ATP 的稳态计算就足够了。需要特别指出的是,在 ATP 时间卡中,参数  $T_{max}$  表示暂态计算的最长时间,令  $T_{max} \leq 0$ ,则在稳态解的计算结束后,计算就停止,即不再进行暂态计算,这样可以节省很多仿真计算的时间。

在第三章描述的整个网络模型中(图 3.1 和图 3.8),一共选取了 39 个故障点来表示故障发生的不同位置。平行双回线 I 线的每个分段处作为一个故障点,由于它分成 20 段,则包括首末两个端点一共有 21 个故障点,编号为  $N_0 \sim N_{20}$ 。环网的每条单回线都被等分成 3 段,包括首末两个端点每条可取 4 个故障点,故环网部分一共取了 12 个故障点,编号为  $N_{21} \sim N_{32}$ 。在平行双回线 II 线的每 4 个分段处取一个故障点,它也被分成 20 段,则包括首末两个端点一共可取 6 个故障点,编号为  $N_{33} \sim N_{38}$ 。

仿真计算子线程首先调用 ATP 进行一次指定系统参数下的无故障计算。ATP 计算完毕后,程序读取继电器安装处即平行双回线 I 线上的电流  $I_M$ 、 $I_N$ ,电压  $U_M$ 、 $U_N$ ,以及各个系统的端电压,这些数据主要用来作为某些继电器要用到的记忆量和画系统初始的相量图。然后,进行第一次故障计算。此时,故障点定在  $N_0$  点,过渡电阻等于零。ATP 计算完毕后,程序读取平行双回线 I 线上的电流  $I_M$ 、 $I_N$ ,电压  $U_M$ 、 $U_N$ ,各个系统的端电压,以及短路开关上流过的电流。以上读取的三相电流、电压皆为 ATP 算出的稳态相量值。

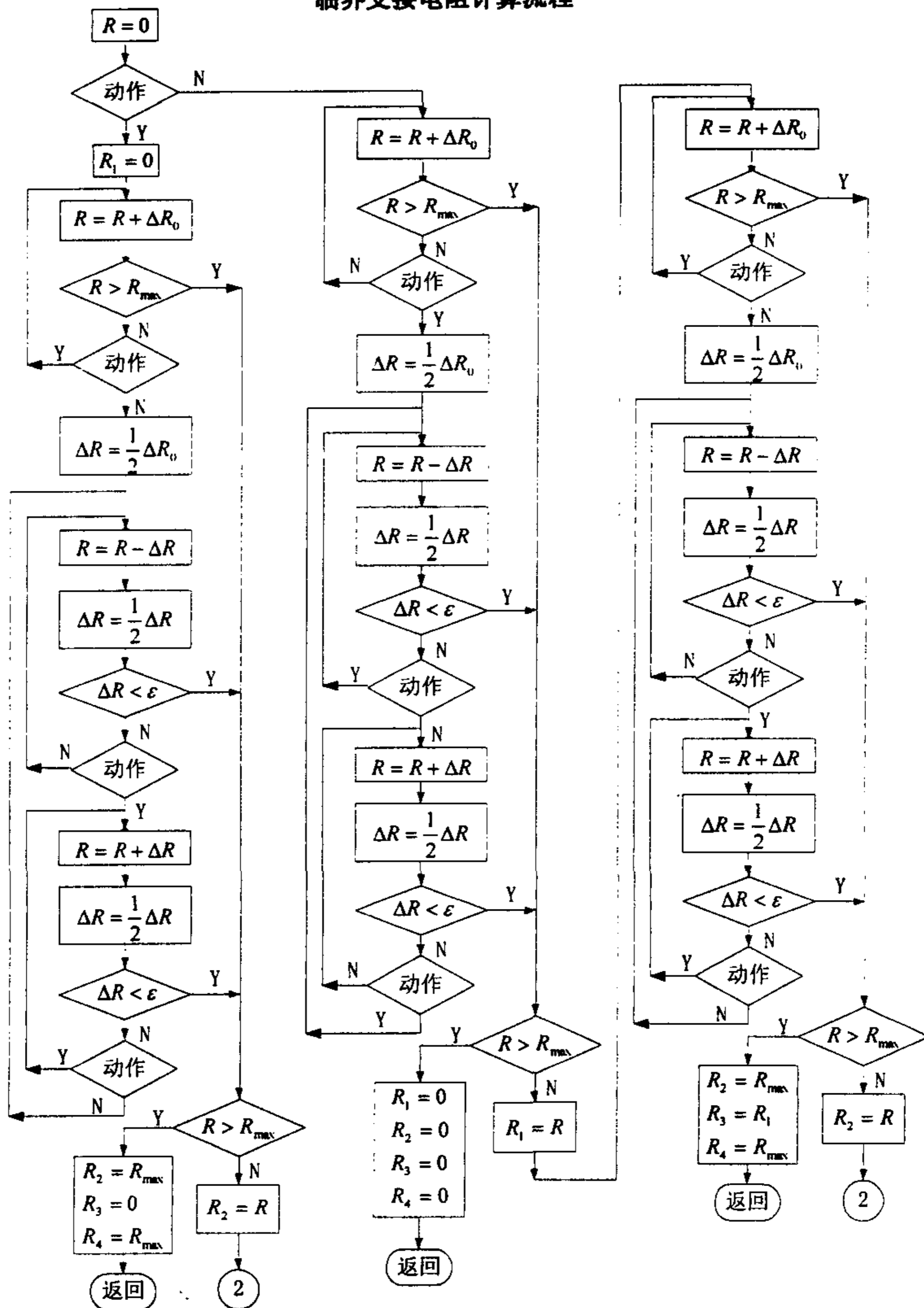
接着,按照选定的继电器和安装处,将相应的电流、电压稳态相量代入该继电器动作判别式进行计算,判断该继电器的动作情况。然后按照第二章介绍的“改进直接法”的原理修改过渡电阻进行下一步计算,直到找到该继电器在  $N_0$  点发生故障时的四个临界支接电阻。

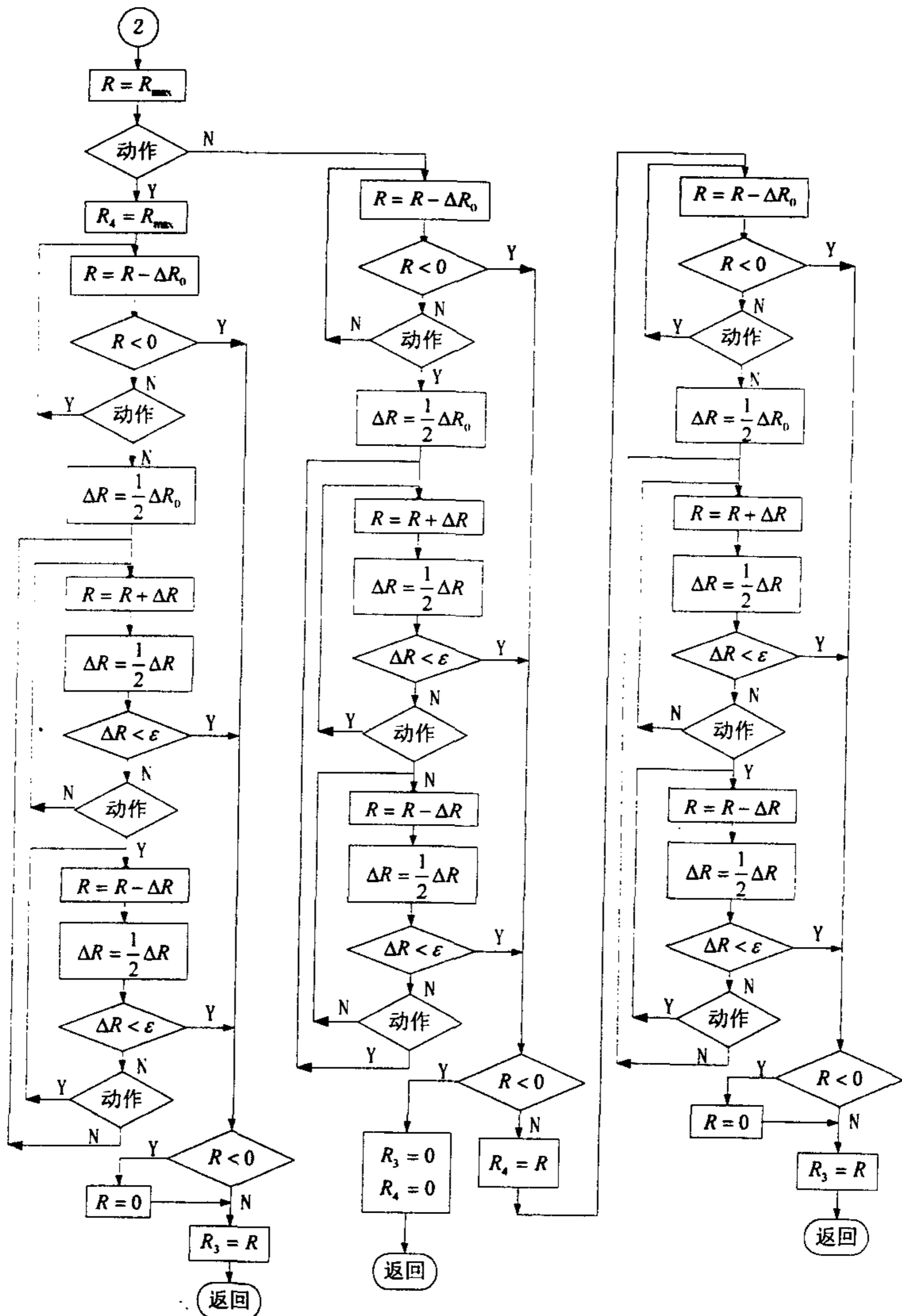
在找到该继电器在  $N_0$  点发生故障时的四个临界支接电阻之后,修改 ATP 数据卡,将短路故障模型中(图 3.7)的节点  $N_0$  改为  $N_1$ ,则故障点移到  $N_1$ ,按照同样的方法找到该继电器在故障点  $N_1$  处的四个临界支接电阻。如此这般,依次搜索全网络 39 个故障点,得到该继电器在每个故障点的临界支接电阻。

将子线程的计算结果综合起来,主线程绘出某种距离继电器在本仿真网络中的静态动作特性(支接电阻特性)。由于记录了每一次调用 ATP 的计算结果,所以对仿真过程中的每一次故障,都能画出相应的电压相量图,并显示具体的相量数值,以便对单次故障情况进行分析。

下面给出的是求临界支接电阻模块的详细流程。

## 临界支接电阻计算流程





## 4.4 TRCP 使用说明

TRCP 采用 VC6 编写, 必须在 Windows 环境中使用。在 Windows 系统中运行 TRCP 程序, 就会弹出如图 4.2 所示的主界面:

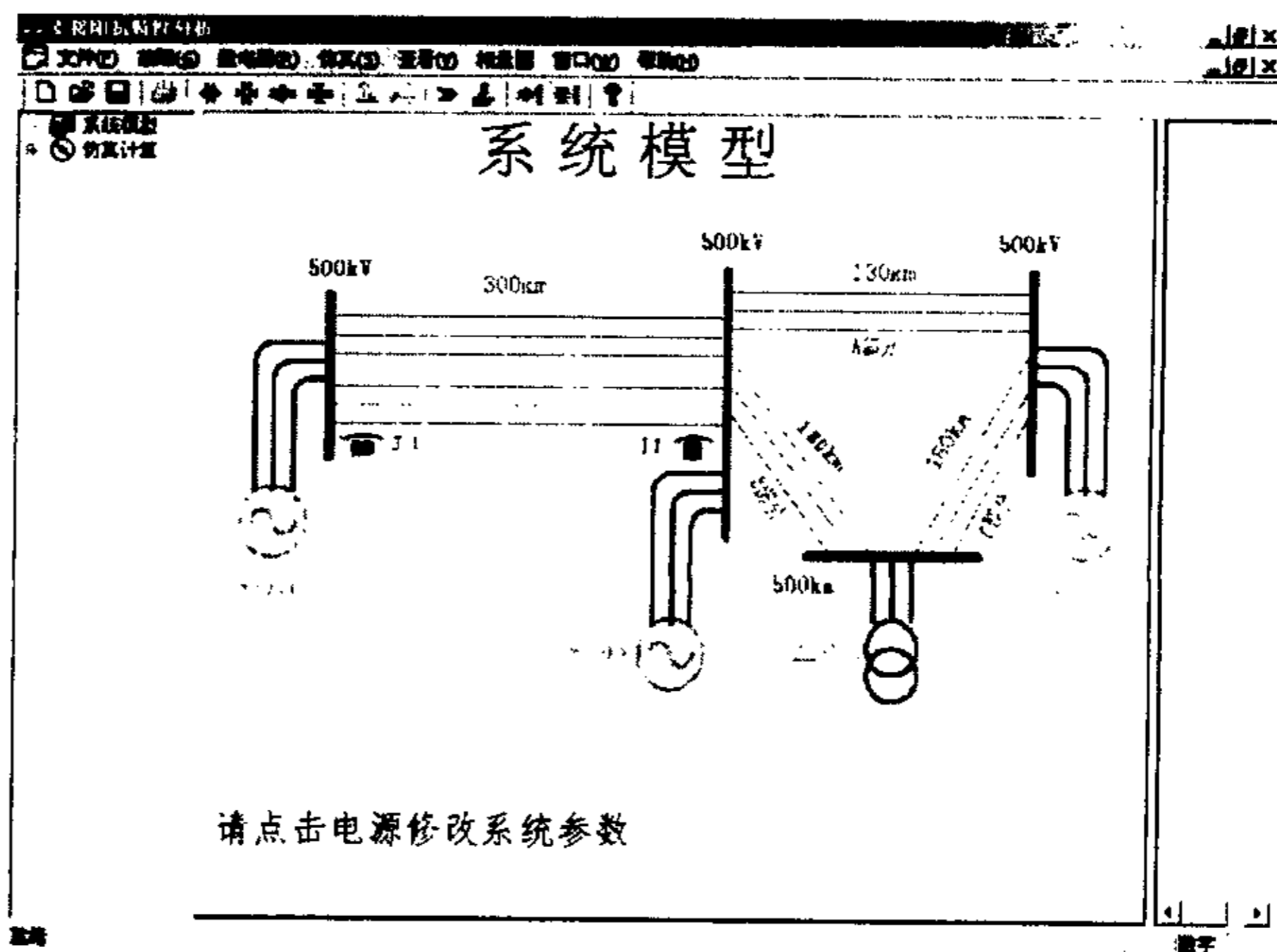


图 4.2 TRCP 主界面

### 1. TRCP 窗口

该部分为标准 Windows 窗口的界面规范。显示了程序的中文名称和英文名称, 最右面是“最小化窗口”、“还原窗口”、“关闭窗口”。主界面的窗口被拆分成三个子窗口, 左边是类似 Windows 资源管理器的目录索引窗口, 中间是图形显示子窗口, 右边是相应的数据显示子窗口。

### 2. 改变系统参数

将鼠标移到主界面显示的系统模型图的发电机图形上, 鼠标的形状会变成手状, 并且发电机的四周出现一个虚线框表示该发电机被选中, 单击该发电机, 弹出一个对话框, 进行这个系统的电势角、正(负)序阻抗、零序阻抗的设置。

### 3. “文件”菜单

这是 Windows 程序的标准菜单, 包括“打开”、“关闭”、“保存”这些标准的子菜单, 可以在仿真结束后, 将仿真的结果保存为以.trc 为后缀名的文件, 下次可以直接打开保存的文件进行分析。由于 TRCP 是一个多文档的程序, 可以同时打开多个保存的



仿真结果文件进行比较分析。另外，添加了一个“结果打印至文件”子菜单，用来将整个仿真过程中调用 ATP 计算得到的所有相量值打印到一个文本文件中，作为辅助分析。

#### 4. “故障”菜单

单击这个菜单的子菜单可以选择不同的故障类型，包括 A 相接地短路、B 相接地短路、C 相接地短路、AB 相接地短路、BC 相接地短路、CA 相接地短路、AB 相间短路、BC 相间短路、CA 相间短路九种情况。

#### 5. “继电器”菜单

这个菜单用来选择不同的继电器，包括了继电器的安装位置、相别的选择。TRCP 目前已经包括了多种继电器判据，如带记忆的姆欧继电器、四边形特性距离继电器等等，使用时还可以不断的添增。

#### 6. “仿真”菜单

这个菜单主要用来指定与仿真计算有关的参数。例如：ATP 的安装路径、仿真计算的最大支接电阻值、步长以及精度。程序自己有一个默认的参考参数，只需进行必要的修改。最后，单击“开始仿真”子菜单，将弹出一个关于本次仿真所有参数的报告，确认无误后，开始仿真计算。

#### 7. “察看”菜单

这个菜单在 Windows 标准菜单的基础上，增添了一些子菜单用来调整结果图形在中间窗口显示的大小，以及在右边的数据子窗口显示每个故障点的四个支接阻抗值。考虑到这些菜单使用的比较频繁，为方便起见，在工具栏上都作了相应的按钮，直接点击按钮就可以了。

#### 8. “相量图”菜单

单击这个菜单中的选项，可以根据所选故障点位置，绘出每一次调用 ATP 计算得到的相量图和相应的数值。同样的，在工具栏上都作了相应的按钮。

## 4.5 TRCP 结果显示

当 TRCP 仿真结束后，双击主界面左边的目录窗口中的“仿真计算”，分别点击展开的目录，可以察看支接阻抗特性和电压相量图。

图 4.3 中的横坐标表示线路的百分比长度，横坐标轴上的刻度线标明了故障点的位置。横坐标轴的前面表示平行双回线 I 线，后面分别表示环网的三个部分。另一条较短的横坐标轴表示平行双回线 II 线。纵坐标表示支接电阻值，负方向表示平行双回线的 II 线的支接电阻情况。在中间窗口的顶部显示了本次仿真的故障类型、继电器类型、相别和安装处。右边窗口显示的是支接电阻的数值和对应标尺的位置（故障点编

号)。全网络的支接电阻分成本线故障和外线故障两部分显示，可以同时察看。随着标尺位置的移动，数值也相应的变化。

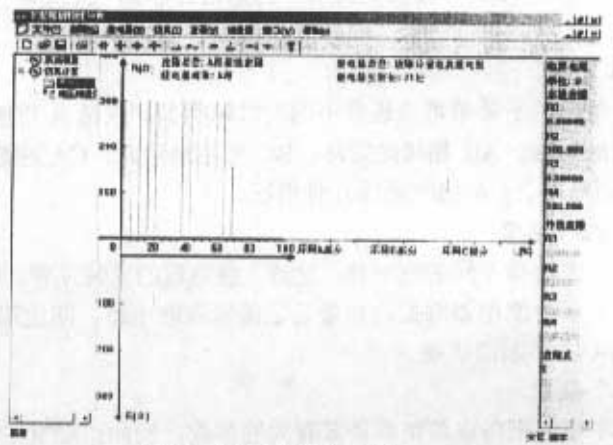


图 4.3 支接阻抗特性图

图 4.4 画出了平行双回线两端系统的电压相量图。图中绘出了正常状态时的平行双回线左侧发电机电势  $\overline{oEg1}$  (A 相) 和 M 侧母线电压相量  $\overline{oM}$  (A 相)，平行双回线右侧发电机电势  $\overline{oEg2}$  (A 相) 和 N 侧母线电压相量  $\overline{oN}$  (A 相)，还绘出了故障后的 M 侧、N 侧母线电压  $U_m$ 、 $U_n$  (A 相)、补偿电压  $U_y$  (A 相)、零序电流  $I_{0m}$ 、 $I_{0n}$  和入地电流  $I_f$ 。在右边的窗口中显示了相应的电压(三相)、电流(三相)、补偿电压、零序电流、入地电流的数值。

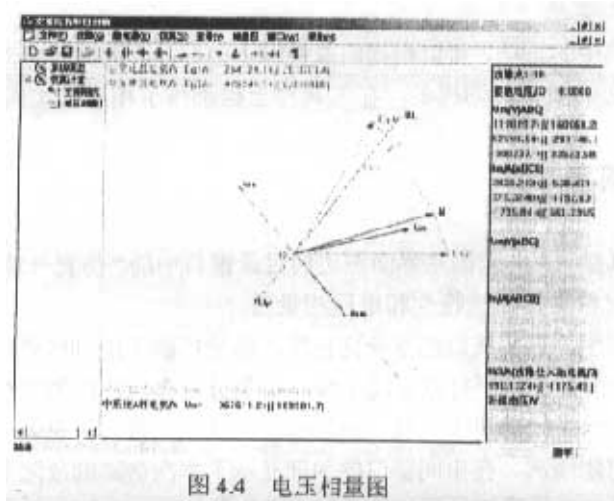


图 4.4 电压相量图

## 4.6 进一步改进思想

使用 TRCP 的情况表明：该分析软件在分析多种距离继电器的支接阻抗动作特性时，可以减轻大量的公式推导和绘制电压相量图的工作，使用简便。不过，仍然可以在原有的基础上适当进行一些改进或者增加一些功能以扩大它的应用范围，方便它的使用。

1. 在分析距离继电器静态动作特性时，步长  $\Delta R_0$  取值约为线路阻抗的 1%，这样，可以避免漏掉支接电阻动作特性中的小空穴和小孤岛区，但计算时间相对比较长。随着计算机硬件技术的发展，高性能计算机的使用可以缓解这一矛盾。如果已经确定某种继电器没有小空穴和小孤岛区，可以适当将步长增加，减少计算时间。

2. 在进行继电器判据的仿真计算时，往往要对同一个判据进行多种情况的仿真计算，例如不同的系统参数，不同的电势角，送电端、受电端等等，为了使使用者可以从 TRCP 长时间计算的等待时间中解脱出来，可以考虑在现有的界面控制方式之外，再设计一种命令行方式，可以一次定义多种仿真条件，由 TRCP 连续、依次地进行计算，仿真结果按顺序存储起来，全部仿真结束后，使用者再进行分析。

3. 如果能与现代计算机数据库技术结合起来，建立继电器元件库，则程序的扩充性和可维护性将大大加强。

4. 由于对同一种网络模型参数，每次调用 ATP 进行计算得到的电流、电压数值相同，仅仅是继电器的判据不同，所以，可以考虑将计算改成离线的，即事先用 ATP 将故障数据计算好，仿真的时候直接送到继电器判据中，这将节省大量的仿真时间。

5. 还可以增加邻线故障切除时继电器动作情况的仿真计算，包括邻线故障在本侧先切除，或者由对侧先切除两种情况。

## 4.7 本章小结

本章介绍了利用微软公司的 MFC (Microsoft Foundation Class Library) 和可视化开发工具 Microsoft Visual C++ 6.0 开发的距离继电器分析软件 TRCP。程序运行在 Windows 操作系统下，具有方便直观的界面，可以方便地分析各种距离继电器的特性，比较、研究继电器在不同条件下的动作情况，为产品开发中的方案比较和选择提供了良好的支持。

## 5 几种接地距离继电器的仿真分析

本章对几种接地距离继电器进行了静态特性的仿真研究, 根据仿真结果, 提出了距离保护的一种改进方案。

### 5.1 引言

在线路发生接地故障时, 平行双回线结构的特殊性以及零序互感等因数造成继电器耐受过渡电阻能力较弱, 并且在邻线短路和远处环网故障时可能误动, 严重影响继电器的性能。通过数字仿真分析和比较各种继电器运行特性对于正确应用这些继电器是十分必要的。作者对目前在市场上占主流地位的接地距离保护方案和近年来提出的一些新方案进行了仿真研究, 并结合仿真研究结果提出一种距离保护的改进方案。

仿真计算中, 分析网络为如图 3.1 所示的三端电源网络, 采用第四章介绍的距离继电器静态动作特性分析软件。数字仿真的工作主要集中在考察各种继电器在区内故障时有无拒动现象, 在区外故障时有无稳态超越现象以及在平行线另一回线故障时有无误动现象。为此, 考虑系统运行方式的变化, 共设计了十种系统运行情况。

编号	方式	系统运行参数 ( $\Omega$ )				不变参数
		左侧系统 S1		中间系统 S2		
		$Z_{S11}=Z_{S12}$	$Z_{S10}$	$Z_{S21}=Z_{S22}$	$Z_{S20}$	
1	大一大	$16.28 \angle 85^\circ$	$68.82 \angle 87^\circ$	$16.28 \angle 85^\circ$	$68.82 \angle 87^\circ$	平行双回线
2	大一中	$16.28 \angle 85^\circ$	$68.82 \angle 87^\circ$	$81.42 \angle 85^\circ$	$344.12 \angle 87^\circ$	$Z_{L1}=Z_{L2}=81.42 \angle 84.29^\circ$
3	大一小	$16.28 \angle 85^\circ$	$68.82 \angle 87^\circ$	$162.84 \angle 85^\circ$	$688.24 \angle 87^\circ$	$Z_{L0}=344.12 \angle 80.22^\circ$
4	中一大	$81.42 \angle 85^\circ$	$344.12 \angle 87^\circ$	$16.28 \angle 85^\circ$	$68.82 \angle 87^\circ$	$Z_{m0}=167.00 \angle 90^\circ$
5	中一中	$81.42 \angle 85^\circ$	$344.12 \angle 87^\circ$	$81.42 \angle 85^\circ$	$344.12 \angle 87^\circ$	环网输电线
6	中一小	$81.42 \angle 85^\circ$	$344.12 \angle 87^\circ$	$162.84 \angle 85^\circ$	$688.24 \angle 87^\circ$	$Z_1=Z_2=48.78 \angle 85.55^\circ$
7	小一大	$162.84 \angle 85^\circ$	$688.24 \angle 87^\circ$	$16.28 \angle 85^\circ$	$68.82 \angle 87^\circ$	$Z_0=140.11 \angle 75.51^\circ$
8	小一中	$162.84 \angle 85^\circ$	$688.24 \angle 87^\circ$	$81.42 \angle 85^\circ$	$344.12 \angle 87^\circ$	右侧系统 S3
9	小一小	$162.84 \angle 85^\circ$	$688.24 \angle 87^\circ$	$162.84 \angle 85^\circ$	$688.24 \angle 87^\circ$	$Z_{S31}=Z_{S32}=10.00 \angle 85^\circ$
10	特殊	$841.2 \angle 85^\circ$	$3441.2 \angle 87^\circ$	$841.2 \angle 85^\circ$	$3441.2 \angle 87^\circ$	$Z_{S30}=28.00 \angle 87^\circ$

表 5.1 系统运行参数

表 5.1 中, 为简化分析起见, 假定系统各元件的正序阻抗等于负序阻抗, 平行双回线阻抗、环网输电线阻抗以及右侧系统阻抗 S3 不变 (取大运行方式), 通过改变左侧 S1 和中间系统 S2 的阻抗幅值来反映系统运行方式的变化。选取平行双回线阻抗幅值的 0.2 倍、1 倍、2 倍三种情况共九种组合方式作为平行双回线两侧系统(S1、S2)的阻抗幅值。计算中还增加了一种系统阻抗值特大 (10 倍平行双回线阻抗幅值) 的情况。为了分析负荷的影响, 系统电势角的取值分别为  $-60^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ , 随着系统电势角的变化, 保护分别处于送电端和受电端。需要说明的是, 在本仿真研究中, 为简便起见, 右侧系统的电势角一般定为  $30^\circ$ 。仿真计算中, 故障类型选为单相(A 相)短路, 继电器类型也是单相(A 相)继电器。过渡电阻的取值范围为  $0\sim 800\ \Omega$  (约为 10 倍平行双回线正序阻抗幅值); 过渡电阻的步长一般取  $20\ \Omega$ , 如果发现有空穴, 再改为  $10\ \Omega$  重新计算; 临界支接电阻的精度取  $1\ \Omega$ 。距离保护的阻抗整定值为平行双回线全长的 80%。下面是针对不同距离继电器的分析结果。

## 5.2 $i_0$ 极化接地距离继电器 (零序电抗继电器)

在单相故障时,  $i_0$ 、 $i_2$  和  $\Delta i_0$  都与  $i_F$  基本同相, 由于过渡电阻在单相故障时可能达到较大的数值, 其影响不可忽视, 故  $i_0$  极化接地距离继电器 (又叫零序电抗继电器) 的应用最为广泛。 $i_0$  极化接地距离继电器的动作判据为:

$$180^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_0}{i_0 \angle -\delta} < 360^\circ \quad (\text{式 5.1})$$

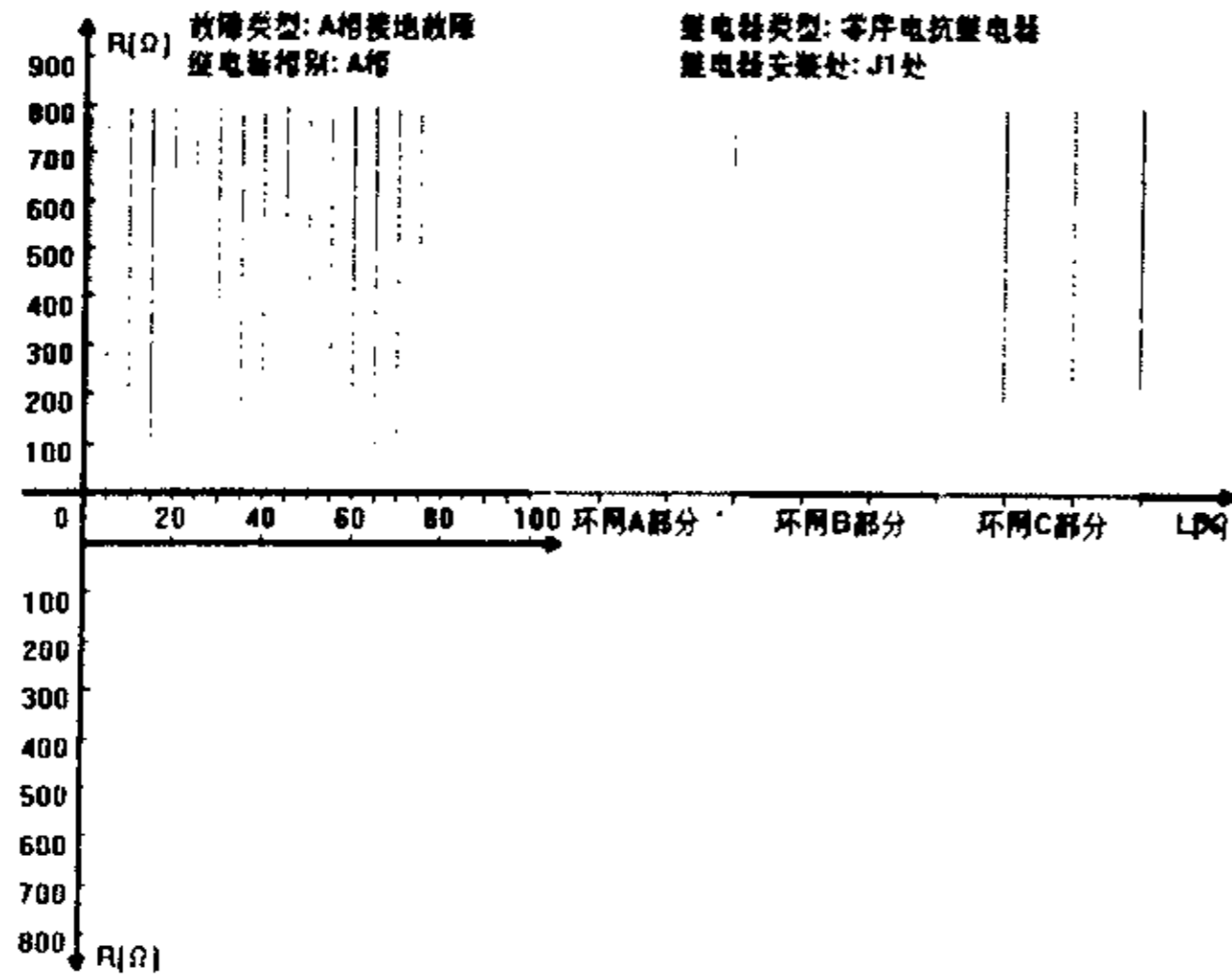
式中, 补偿电压  $\dot{U}'_0 = \dot{U}_0 - Z_{set}(i_0 + ki_0)$ 。实际上  $i_0$  和  $i_F$  有相位差, 尤其在线路末端故障时由于线路和变压器的零序阻抗角不等,  $i_0$  超前  $i_F$ 。式中的  $\delta$  就是考虑此相位差及可能的测量误差后, 对  $i_0$  的相位进行补偿的角度。

图 5.1 是在大一大一大,  $60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  运行方式下,  $i_0$  极化接地距离继电器安装在送电端得到的支接电阻特性和相应的电压相量图。从图 5.1(a) 中看出, 在这种运行方式下,  $i_0$  极化接地距离继电器具有很高的耐受过渡电阻的能力, 在保护区内发生故障时, 耐受过渡电阻能力达到仿真设定的最大过渡电阻值  $800\ \Omega$ 。在整定点——平行线全长的 80% 处, 保护不动。在环网部分故障时尤其是在电气距离较远的环网 C 部分发生故障时, 出现比较严重的稳态超越现象, 而在双回线的另一回线故障时, 也存在着误动现象。

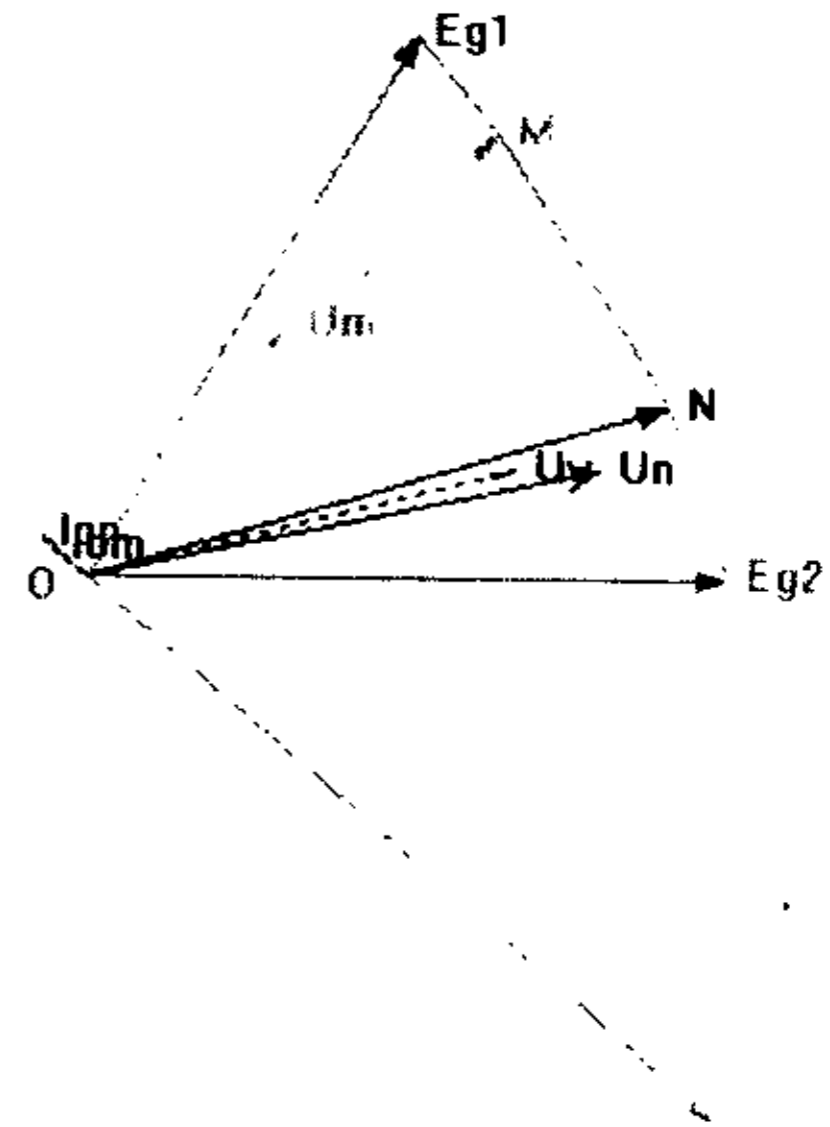
从程序绘出的平行线另一回线 20% 处发生金属性短路的电压相量图 5.1 (b), 可以方便的分析  $i_0$  极化接地距离继电器在双回线的另一回线发生故障时会误动的问题。



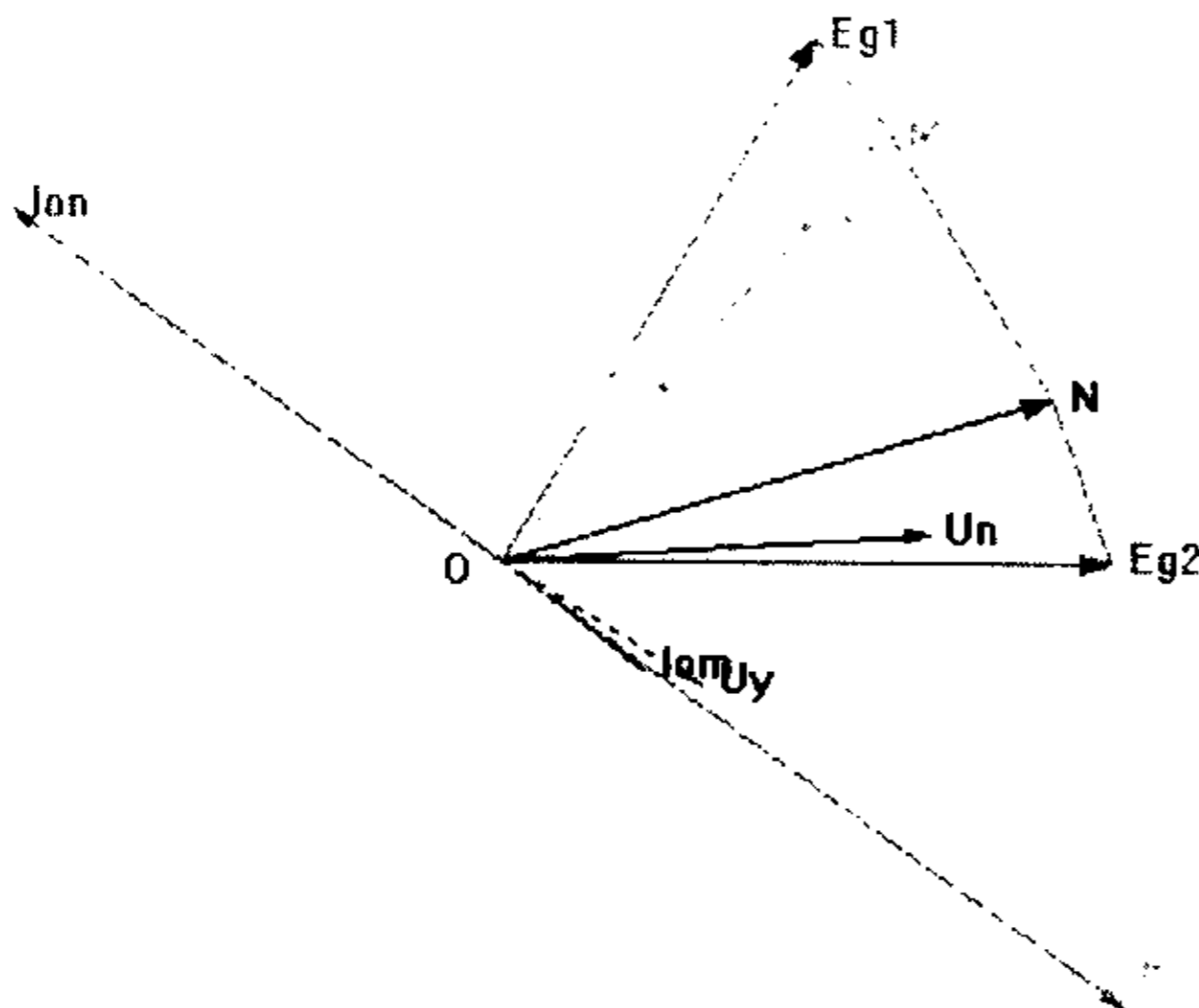
此时，继电器安装处测量到的零序电流（图中的  $I_{0m}$ ）与实际的故障处入地电流（图中的  $I_f$ ）几乎反相，这显然会误动。这是由于零序电流极化的继电器没有方向性引起的。随着过渡电阻的增大，这种相位差逐渐减小，继电器的动作情况得到改善。



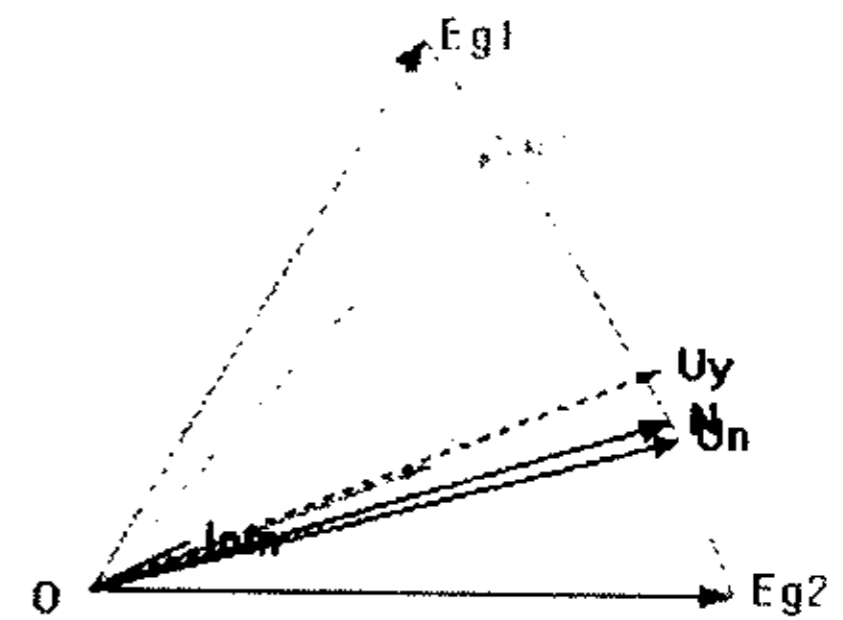
(a) 支接电阻特性



(b) 平行线另一回线 20%处金属性短路，保护误动



(c) 被保护线路整定点(80%)处以  $20\ \Omega$  接地短路，保护不动



(d) 环网 C 部分起始处以  $116\ \Omega$  接地短路，保护误动

注：为清楚表示相位关系，图 (d) 中的  $I_{0m}$  放大了 40 倍。

图 5.1 运行方式为大—大—大、 $60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时，下偏角  $\delta = 0^\circ$

$I_0$  极化接地距离继电器的支接电阻特性和电压相量图

而在图 5.1(c)中, 被保护线路整定点发生短路时, 由于是分布参数模型, 从保护安装处计算得到的补偿电压  $U_y$  与实际的  $U_F$  有偏差, 致使  $U_y$  超前  $I_f$  (理想情况下, 由于此时是纯电阻性短路, 相位应该一致)。  $U_y$  也超前了  $I_{0m}$ , 继电器不动。察看在被保护线路整定点以  $0\sim 800\ \Omega$  过渡电阻接地短路时的所有电压相量图, 这种相位关系保持不变, 所以保护一直不动。

在图 5.1(d)中, 环网 C 部分起始处接地短路, 这个位置离保护安装处的电气距离较远, 并且是在变压器的后面, 由于线路和变压器的零序阻抗角不等,  $I_{0m}$  超前  $I_f$ ,  $I_{0m}$  超前  $U_y$ , 保护误动。

下面来看看保护处于受电端的情况。

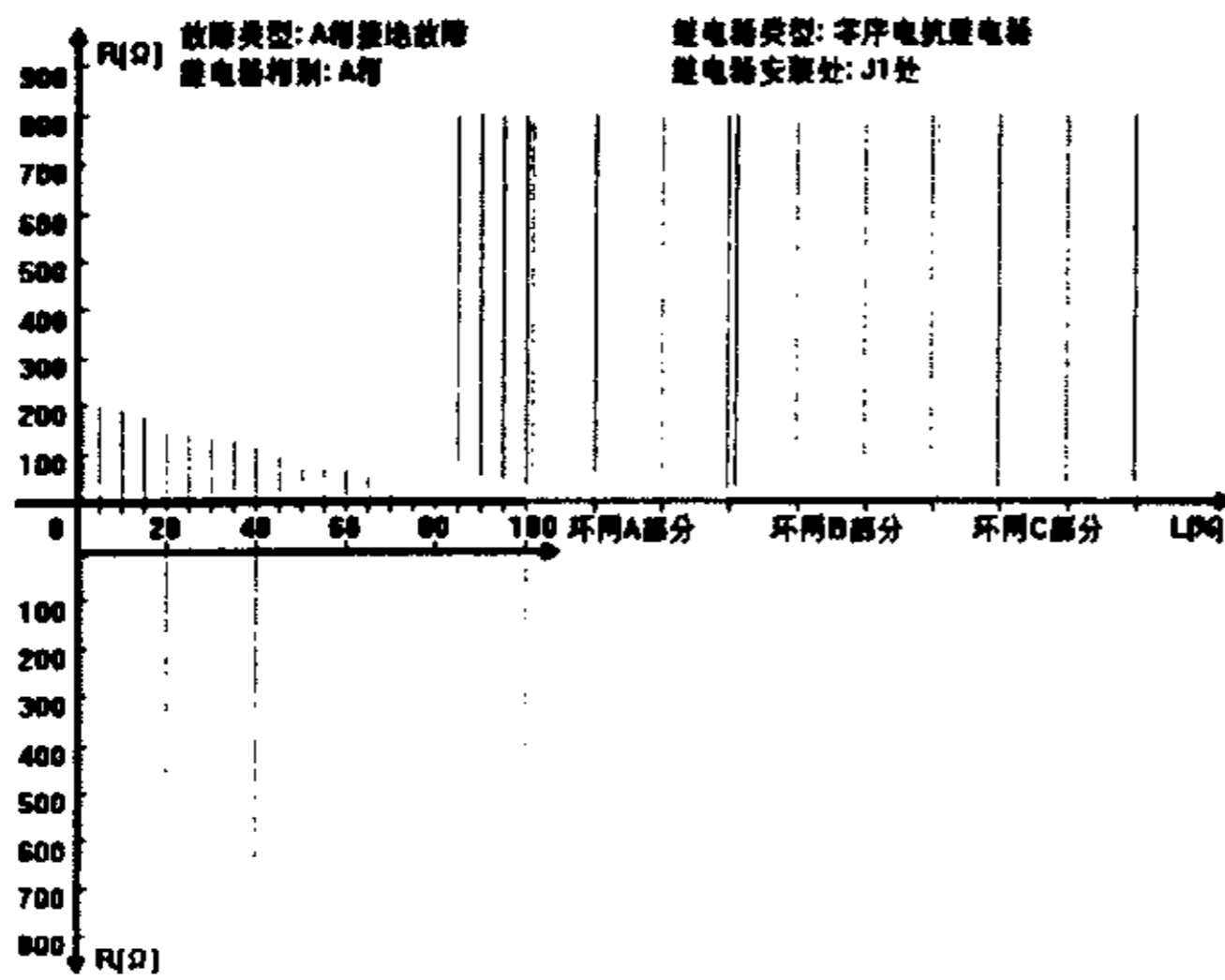
图 5.2 是在大一大一大,  $-60^\circ\sim 0^\circ\sim 30^\circ$  运行方式下, 继电器安装在受电端得到的支接电阻特性和相应的电压相量图。从图 5.2(a)中看出, 在这种运行方式下,  $I_0$  极化接地距离继电器的耐受过渡电阻的能力大大降低, 在近区发生故障时, 耐受过渡电阻能力接近  $200\ \Omega$ 。在整定点——平行线全长的 80%处, 保护不动。在被保护线路末端 (85%~100%) 发生故障时, 继电器出现严重的稳态超越现象。在环网任意部分故障时, 均出现严重的稳态超越现象。在双回线的另一回线故障时, 也存在着误动现象。按照继电器处于送电端的电压相量图分析, 可以得出合理的解释, 如图 5.2(b~f)。总之,  $I_0$  极化接地距离继电器安装在受端时, 静态特性变得很差。

当以下偏角  $\delta = 2^\circ$  对  $I_0$  的相位进行补偿时, 情况有所改善, 但并没有彻底解决问题。为了改善  $I_0$  极化接地距离继电器抗干扰的能力, 加上方向元件和零序电流门槛作

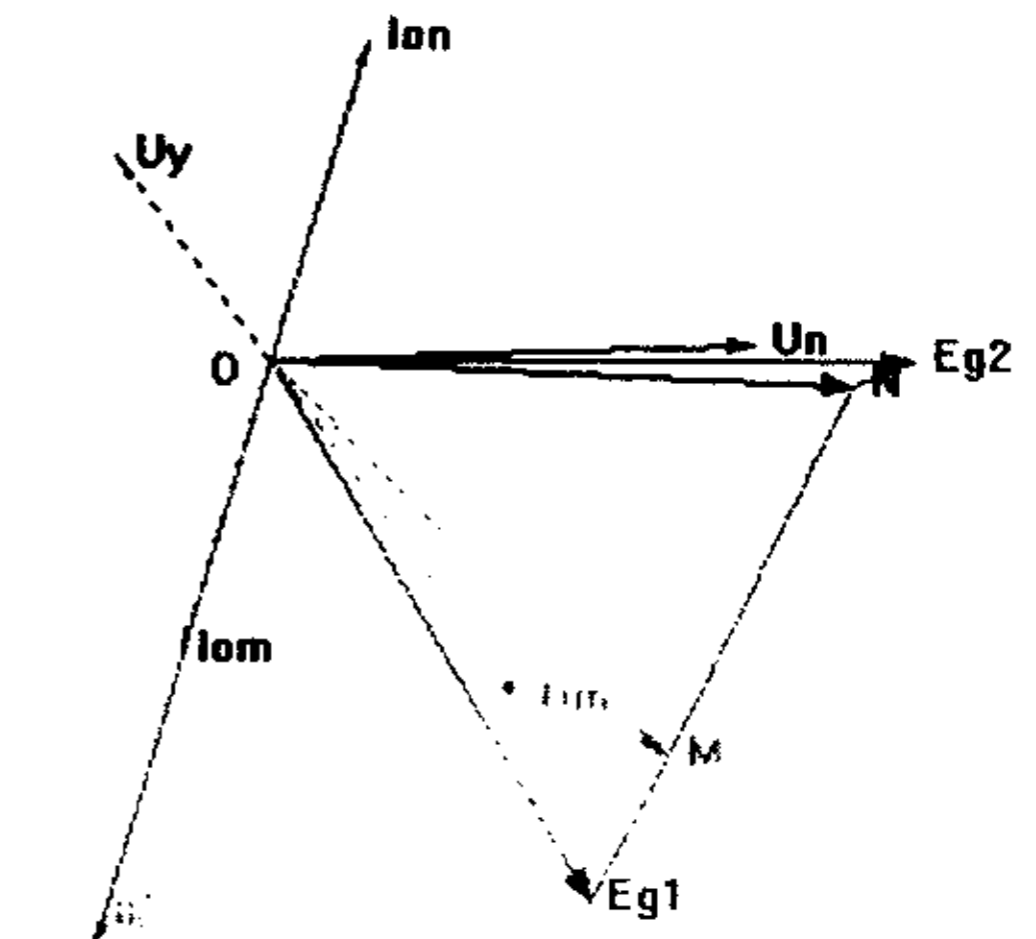
了仿真分析。在同样系统条件下, 加上零序方向元件 (当  $0^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}_{|0|}}{I_0} < 180^\circ$  成立,

判为正方向故障) 时, 从图 5.3(a)与图 5.1(a)比较可知: 当平行双回线另一回线故障时, 本线继电器处于送端时的误动情况基本解决; 但是, 处于受端时的误动情况没有完全解决, 本线末端故障和环网故障时的稳态超越现象基本消失, 如图 5.3(b)与图 5.2(a)。当设置零序电流门槛时, 并且门槛值提高到  $300\text{A}$  (约为额定电流的 10%左右) 时, 上述继电器的误动情况才完全没有出现, 然而这是以牺牲  $I_0$  极化接地距离继电器的耐受过渡电阻能力为代价的。如图 5.3(c~d)所示。

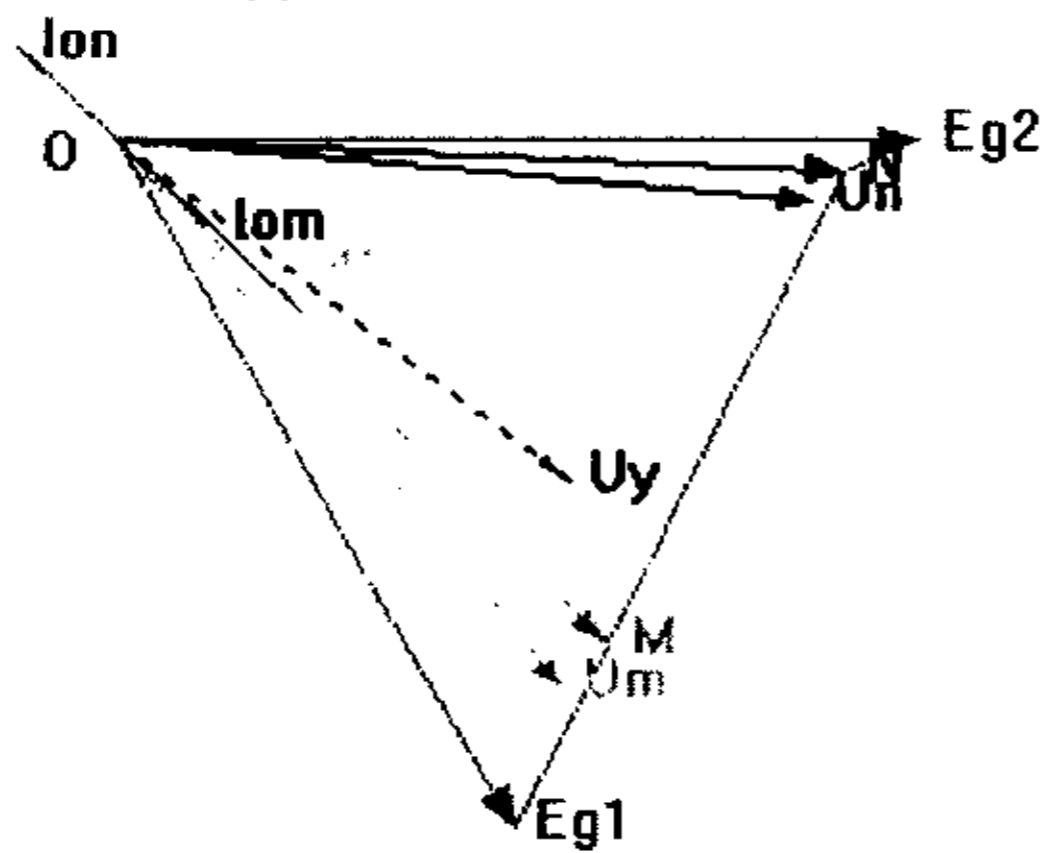
综上所述,  $I_0$  极化接地距离继电器反映接地故障具有极高的灵敏度, 也正是因为它太敏感了, 使用的时候必须和选相元件、方向元件、躲负荷元件和零序门槛共同使用。



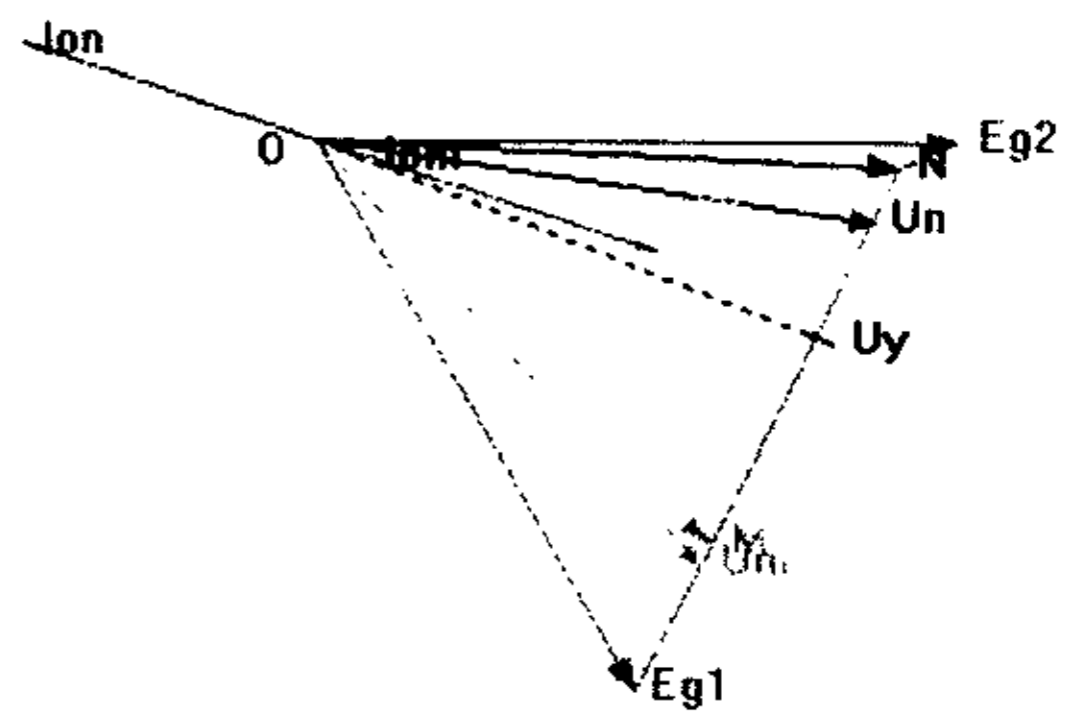
(a) 支撑电阻特性



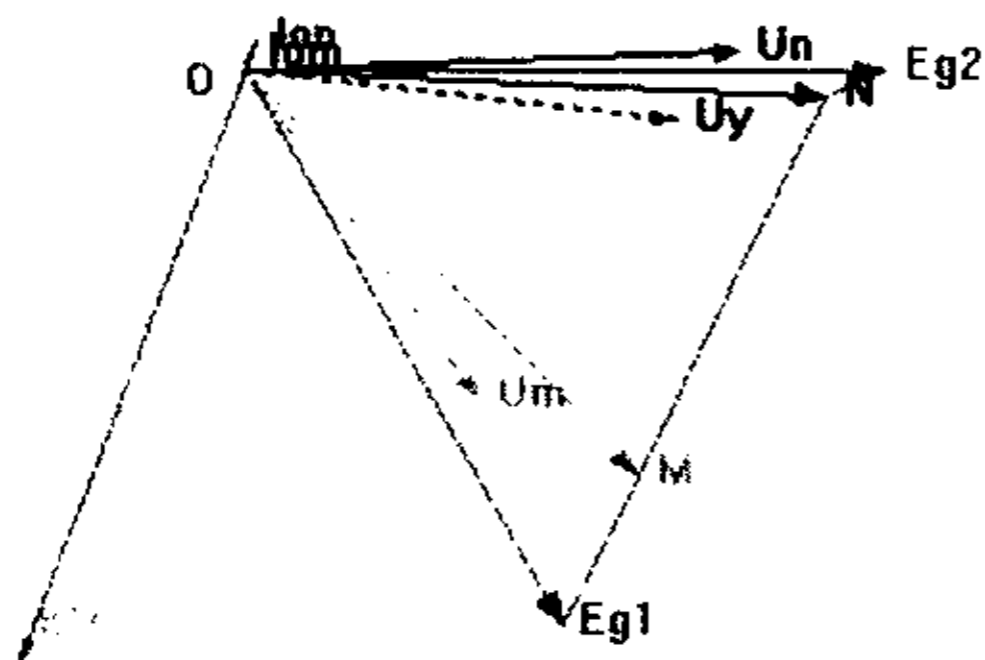
(b) 被保护线路 50%处金属性接地短路, 保护正确动作



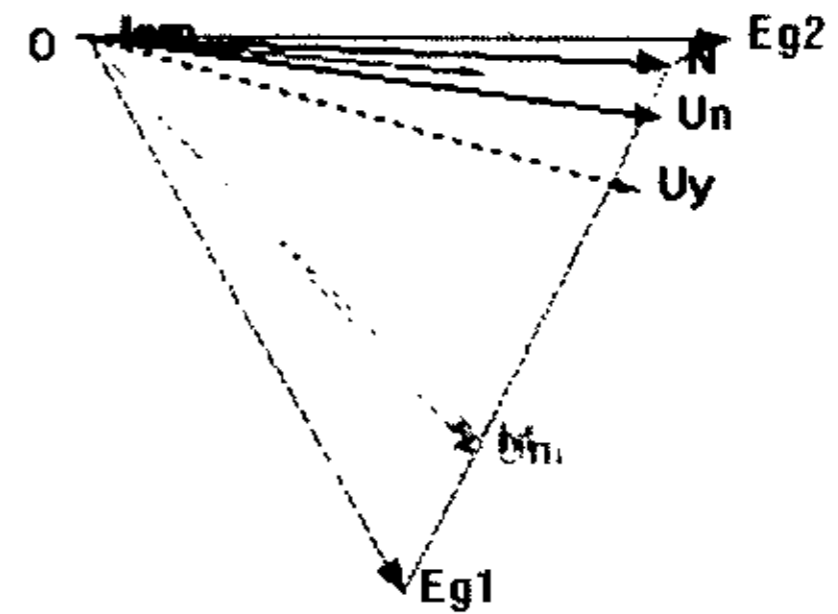
(c) 被保护线路 50%处以 160 Ω 接地短路, 保护拒动



(d) 被保护线路 90%处以 150 Ω 接地短路, 保护误动



(e) 平行线另一回线 40%处金属性短路, 保护误动



(f) 环网 A 部分 1/3 处以 140 Ω 接地短路, 保护误动

图 5.2 运行方式为大一大一大、 $-60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时, 下偏角  $\delta = 0^\circ$

$I_0$  极化接地距离继电器的支撑电阻特性和电压相量图

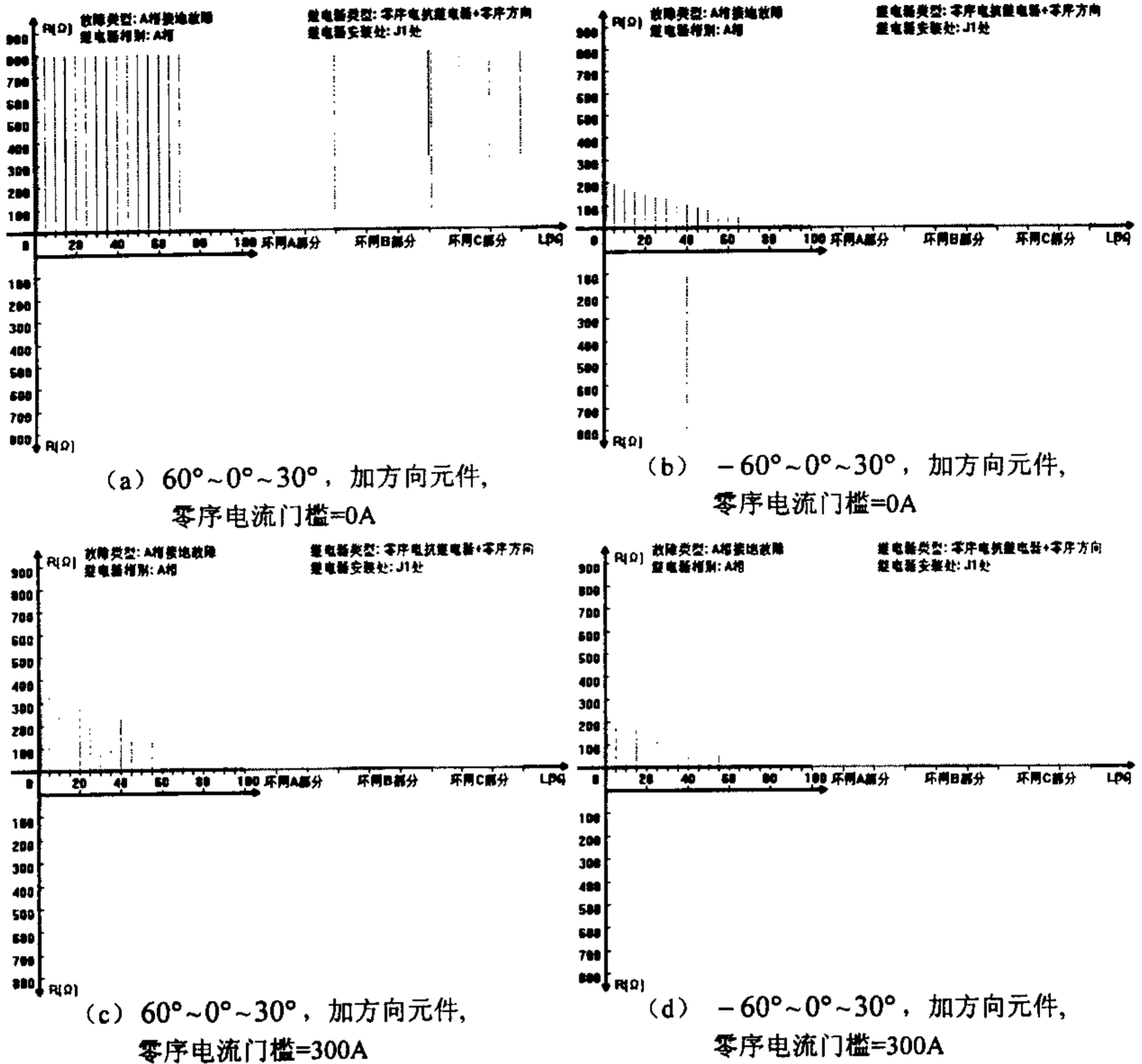


图 5.3 运行方式为大一大一大，下偏角  $\delta = 2^\circ$ ，加方向元件或零序电流门槛，

$i_0$  极化接地距离继电器分处送端和受端的支接电阻特性

### 5.3 双下偏 $i_0$ 极化接地距离继电器

文献[25]针对  $i_0$  极化接地距离继电器中存在的稳态超越的问题，提出了双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器。该方案对  $i_0$  极化接地距离继电器进行了两点改进，希望可以做到：

1. 根据系统运行工况的变化选择两个不同的下偏角来分别对零序电流的相位进行补偿, 以保证区外故障时保护不超范围动作。

2. 继电器在受端时, 采取保护动作判据切换的措施。并且分析受端继电器在动作判据切换时以及切换前后各相量间的相位关系, 对动作条件判别时切换的判据进行修正, 保证双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器在消除继电器区外稳态超越现象的同时尽可能的提高保护耐受过渡电阻的能力。

具体保护方案如下:

当  $180^\circ \geq \text{Arg}\left(\frac{\dot{U}_L}{i_0}\right) \geq -\beta_2 + \xi$  时,  $180^\circ \leq \text{Arg}\left(\frac{\dot{U}'_\phi}{i_0 e^{-j\beta_1}}\right) \leq 360^\circ$  时, 保护动作;

当  $-180^\circ \leq \text{Arg}\left(\frac{\dot{U}_L}{i_0}\right) \leq -\beta_1 - \xi$  时,  $0^\circ \leq \text{Arg}\left(\frac{\dot{U}'_\phi}{i_0 e^{-j\beta_2}}\right) \leq 180^\circ$  时, 保护动作;

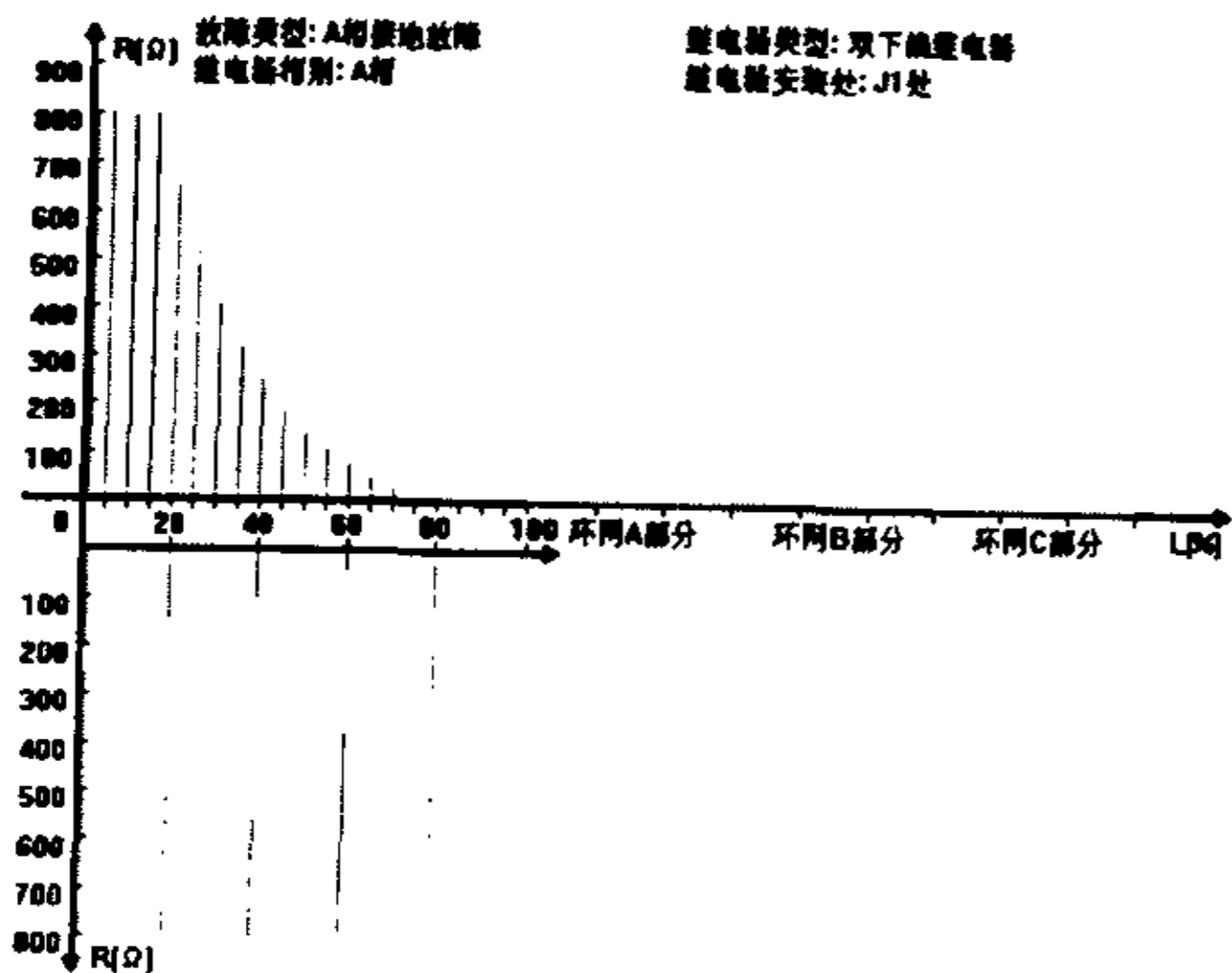
当  $-\beta_1 - \xi < \text{Arg}\left(\frac{\dot{U}_L}{i_0}\right) < -\beta_2 + \xi$  时, 保护闭锁。

式中,  $\dot{U}_L = Z_{set}(i_\phi + ki_0)$ , 补偿电压  $\dot{U}'_\phi = \dot{U}_\phi - Z_{set}(i_\phi + ki_0)$ ,  $\xi$  为裕度角, 考虑到微机高压输电线路保护装置的二次传变、采样的误差等因素,  $\xi$  取一个小的正角度。

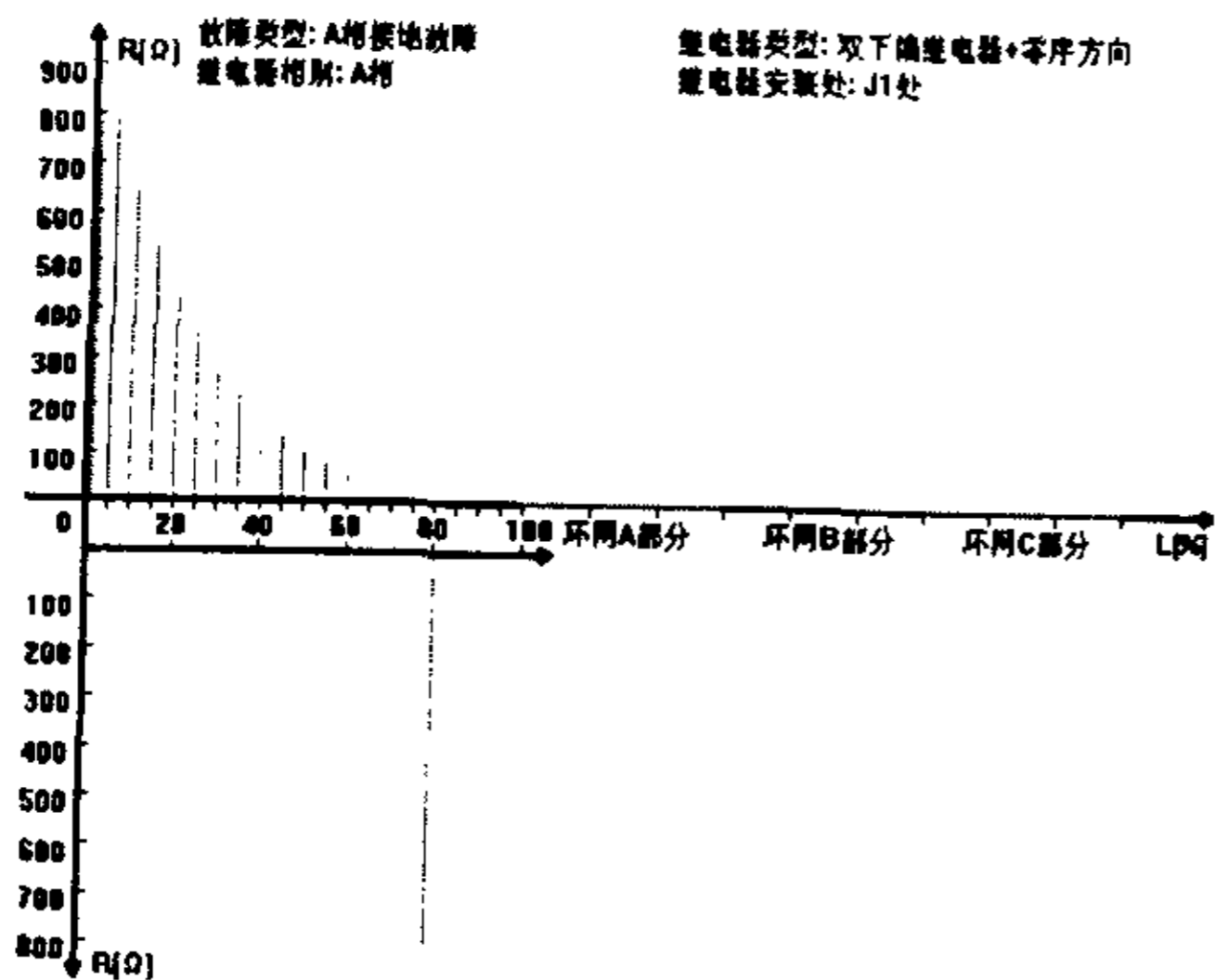
图 5.4 是在中—中—大,  $60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  运行方式下, 取  $\beta_1 = 10.73^\circ$ 、 $\beta_2 = 3.23^\circ$ 、 $\xi = 0.5^\circ$ , 继电器安装在送电端得到的支接电阻特性图和相应的电压相量图。从图 5.4(a) 中看出, 在这种运行方式下, 双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器具有较高的耐受过渡电阻的能力, 在被保护线路近区发生故障时, 保护的耐受过渡电阻能力达到仿真设定的最大过渡电阻值  $800 \Omega$ 。随着故障位置远离保护安装处, 保护的耐受过渡电阻能力逐渐降低, 在整定点——平行线全长的 80% 处, 保护不动。在环网部分故障没有出现稳态超越现象 (在某些系统运行参数时偶尔会出现超越, 但总的来说不是很明显)。在双回线的另一回线故障时, 存在着较严重的误动现象。由此看出, 双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器没有方向性。为此, 在同样的条件下, 加上零序方向继电器再作了一次仿真, 结果如图 5.4(b)。不难看出, 此时动作特性得到很大的改善, 但在平行双回线另一回线 80% 处发生故障时, 继电器还是误动, 这是因为此时方向元件判为正方向而双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器错判为区内故障引起的。

而在图 5.4(c) 中, 在被保护线路 60% 处以  $60 \Omega$  过渡电阻接地短路时, 双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器正确动作; 当过渡电阻增加到  $80 \Omega$  时, 如图 5.4(d),  $I_{0m}$  依然超前  $U_y$ , 但是由于受到下偏角  $\beta_1 = 10.73^\circ$  的限制, 继电器拒动。随着过渡电阻的继续增加,  $I_{0m}$  将落后  $U_y$ , 因而继电器一直拒动。

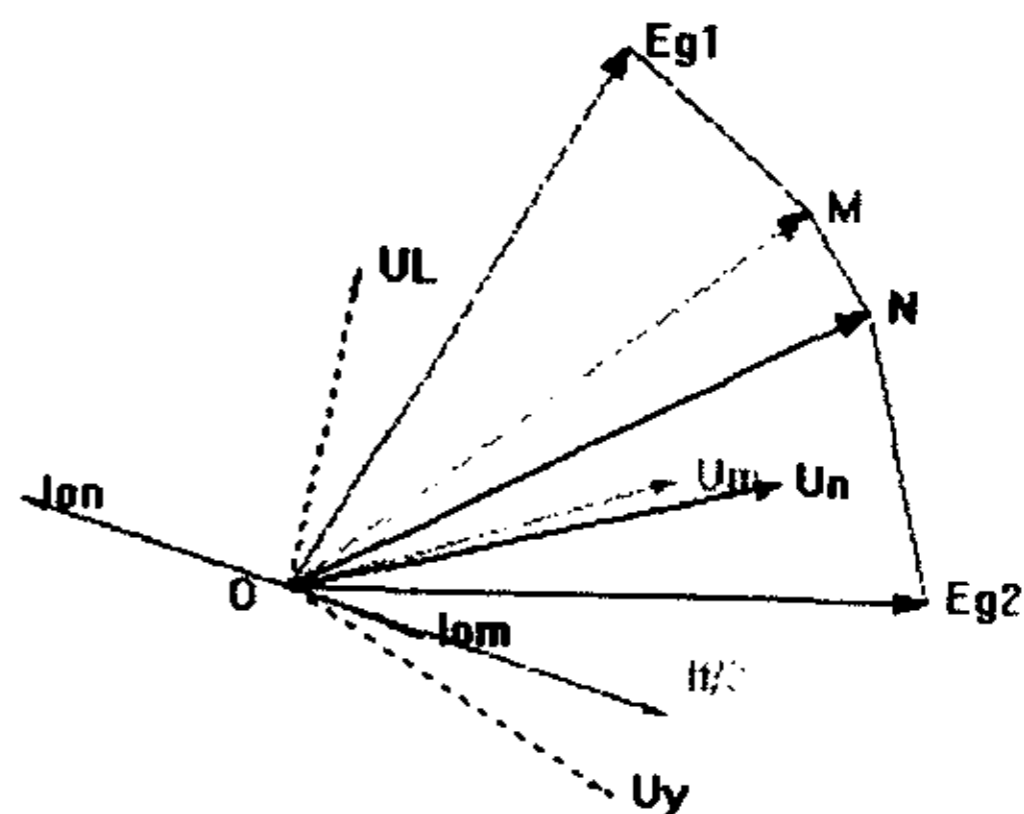




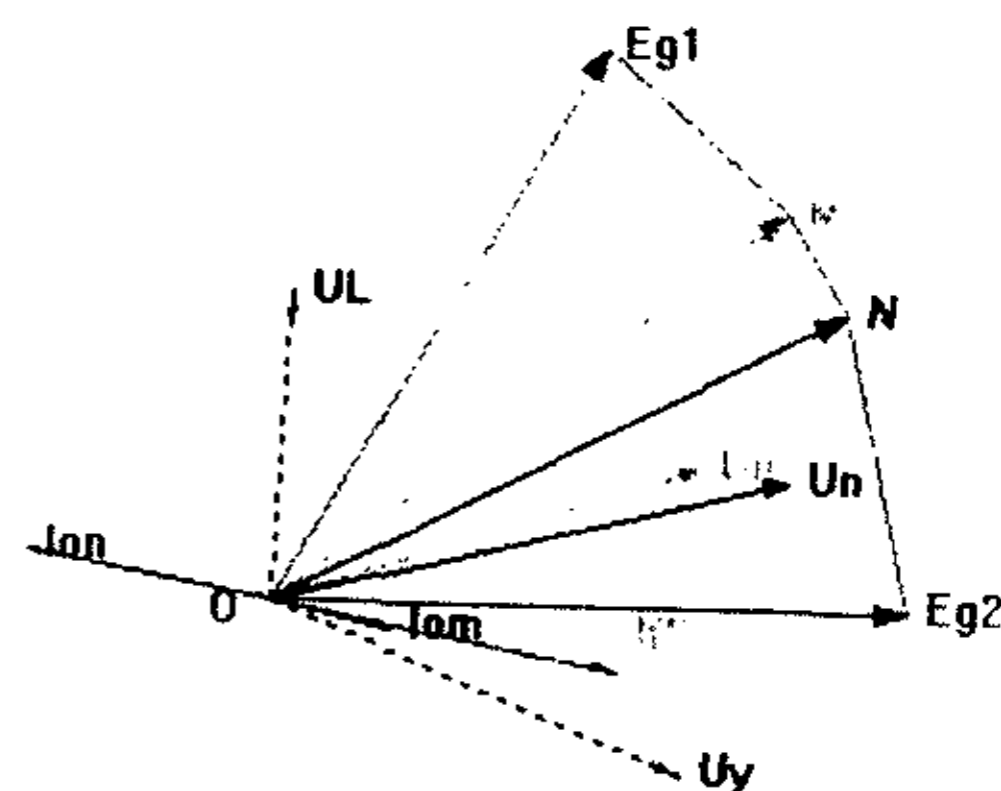
(a) 支接电阻特性



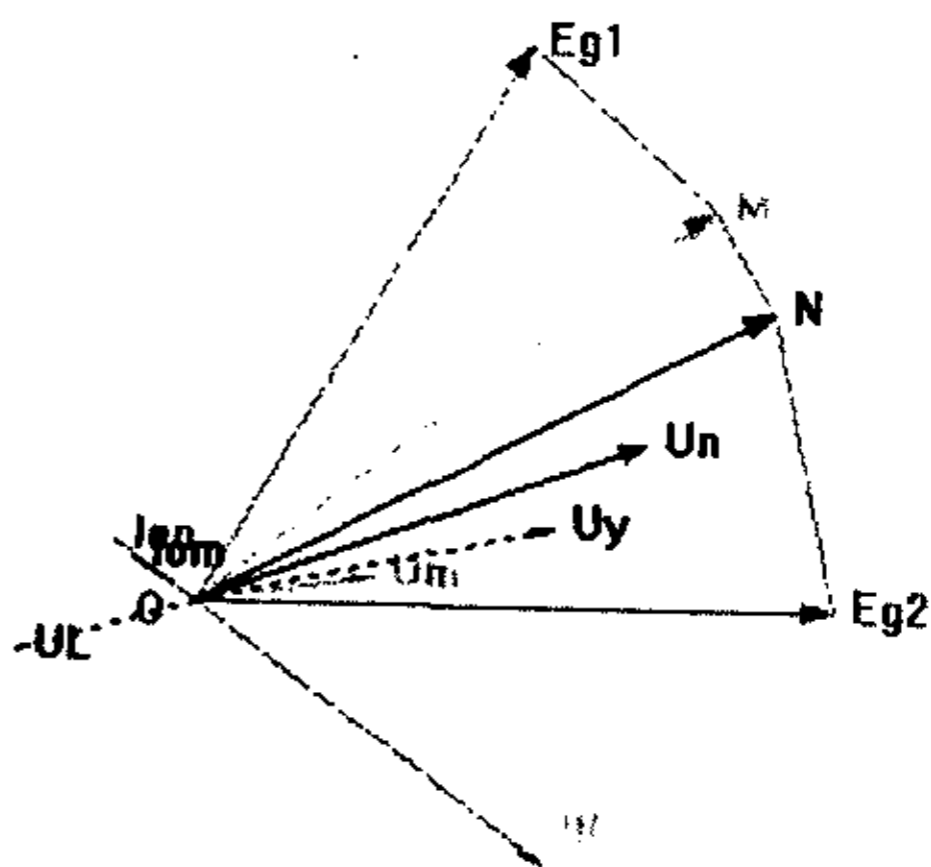
(b) 加方向元件的支接电阻特性



(c) 被保护线路 60%处以 60Ω 接地短路, 保护正确动作



(d) 被保护线路 60%处以 80Ω 接地短路, 保护拒动



(e) 平行线另一回线 20%处以 20Ω 接地短路, 保护误动; 加零序方向元件后, 保护不动作

图 5.4 运行方式为中—中—大、 $60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时, 双下偏  $I_0$  极化接地距离继电器的支接电阻特性和电压相量图

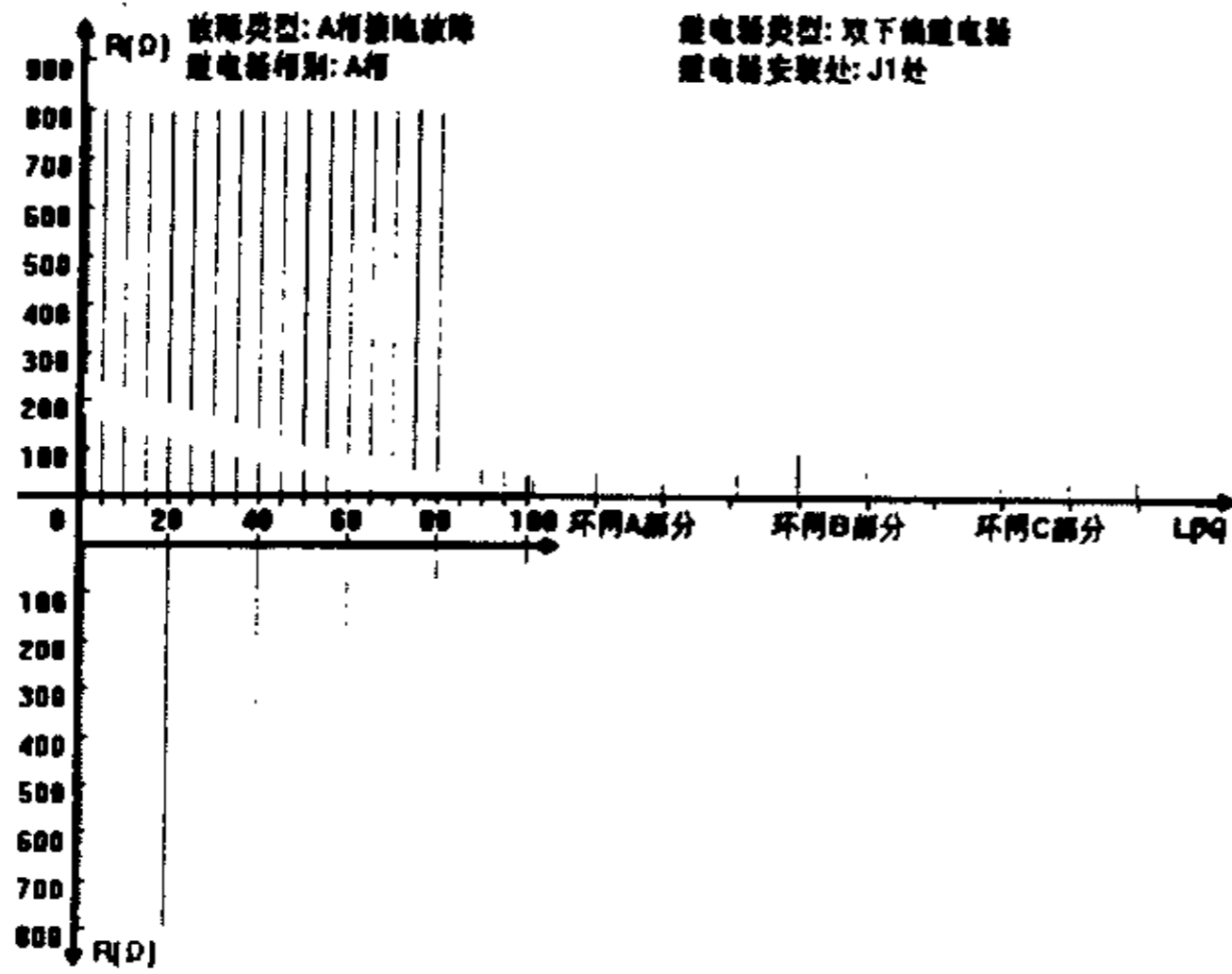
从程序绘出的平行线另一回线 20%处以  $20\ \Omega$  接地电阻短路的电压相量图 5.4(e), 可以方便的分析继电器在双回线的另一回线发生故障时会误动的问题。此时, 继电器安装处测量到的零序电流 (图中的  $I_{0m}$ ) 与实际的故障处入地电流 (图中的  $I_f$ ) 几乎反相, 这显然会误动。当过渡电阻增加到一定之后, 由于有闭锁角的存在, 继电器不动。

如果说双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器处于送端时, 存在稳态超越和平行线另一回线发生故障会误动的问题, 则当它处于受端时, 问题就更加严重了。

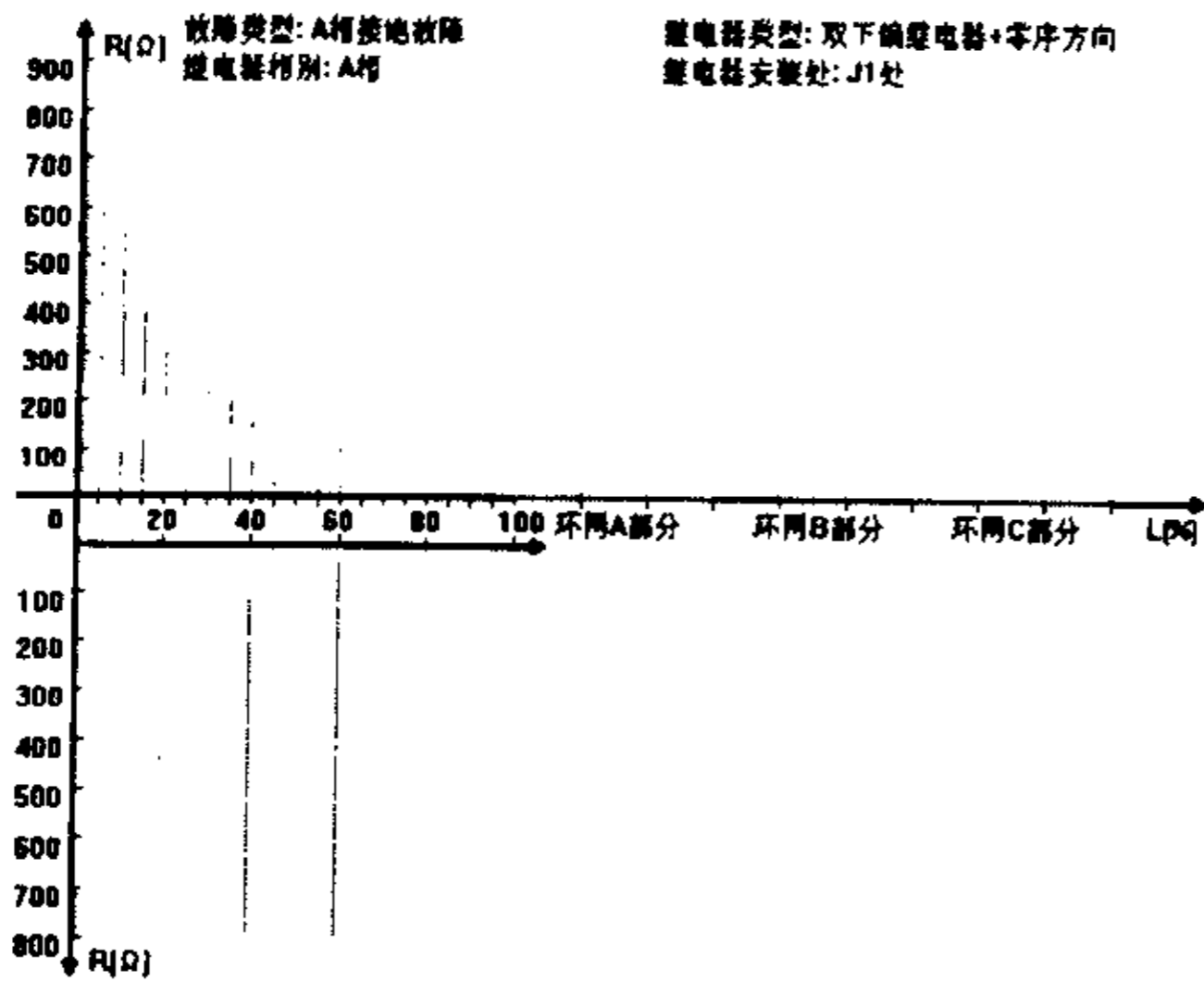
图 5.5 是在大一大一大,  $-60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  运行方式下, 取  $\beta_1 = 13.41^\circ$ 、 $\beta_2 = 1.85^\circ$ 、 $\xi = 0.5^\circ$ , 继电器安装在受电端得到的支接电阻特性图和相应的电压相量图。从图 5.5(a) 中看出, 由于处于受端, 继电器判据经过了切换, 使双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器的支接电阻特性在经过一个不动区——空穴 (由切换判据的闭锁区引起) 之后, 又增加了很大一部分的动作区, 使得该继电器在受端具有极高的耐受过渡电阻的能力, 达到仿真设定的最大过渡电阻值  $800\ \Omega$ 。但是, 在环网部分故障时出现了明显的稳态超越现象。在双回线的另一回线故障时, 也存在着很严重的误动现象。为了检查引起这种误动的原因究竟是双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器没有方向性还是继电器判据本身有缺陷所造成的, 在同样的系统条件下, 加上零序方向元件做了一次仿真, 结果如图 5.5(b)

所示。零序方向元件 (当  $0^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}_{|0|}}{\dot{I}_0} < 180^\circ$  成立, 判为正方向故障) 对这种误动有一定的改善, 特别是对发生在靠近保护安装处的故障情况起到判断作用, 如图 5.5(e), 但随着过渡电阻的增大和故障位置的远离, 继电器还是误动。并且, 图 5.5(b) 中本线发生故障时继电器的动作区大大减小, 根据电压相量图 5.5(c) 分析, 这是由于零序方向继电器处于受端时不能完全正确工作引起的。

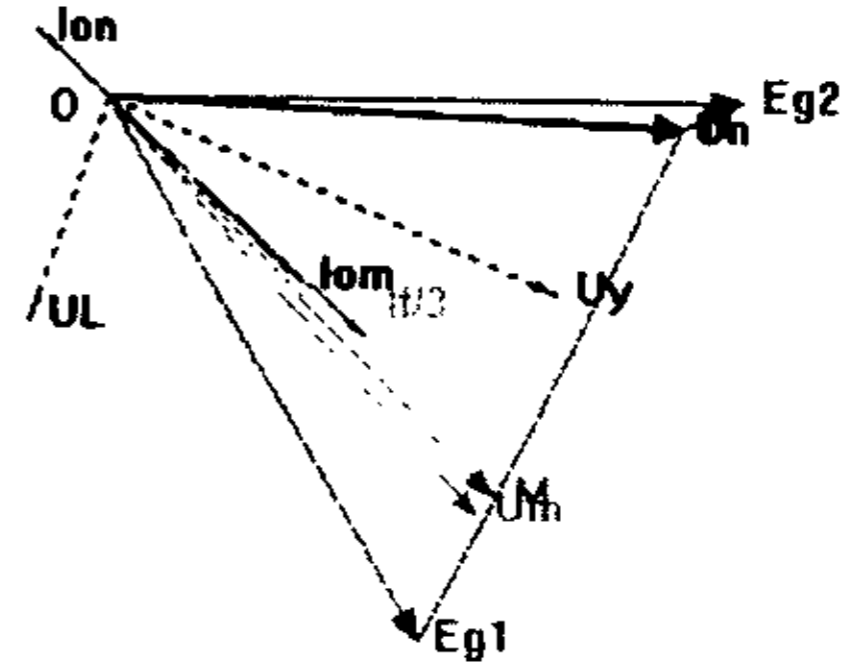
按照图 5.4、图 5.5 的系统条件和双下偏  $i_0$  极化接地距离参数设置, 同时加上方向元件和 300A 的零序电流门槛作了一次仿真, 结果如图 5.6 所示。在这种系统条件下, 无论继电器处于送端还是受端, 区外稳态超越现象基本消失, 平行双回线另一回线故障时本线保护误动的情况也得到解决。但是, 继电器的耐受过渡电阻的能力大大降低, 双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器与  $i_0$  极化接地距离继电器相比具有极高的耐受过渡电阻能力的优点——特别是采用受端切换判据后继电器的动作区大幅扩大的优势——将荡然无存。



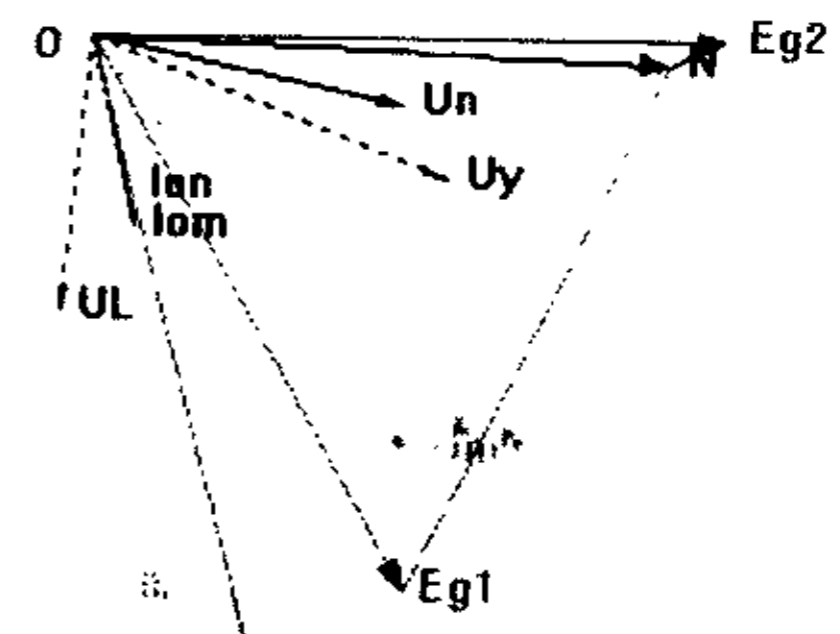
(a) 支接电阻特性



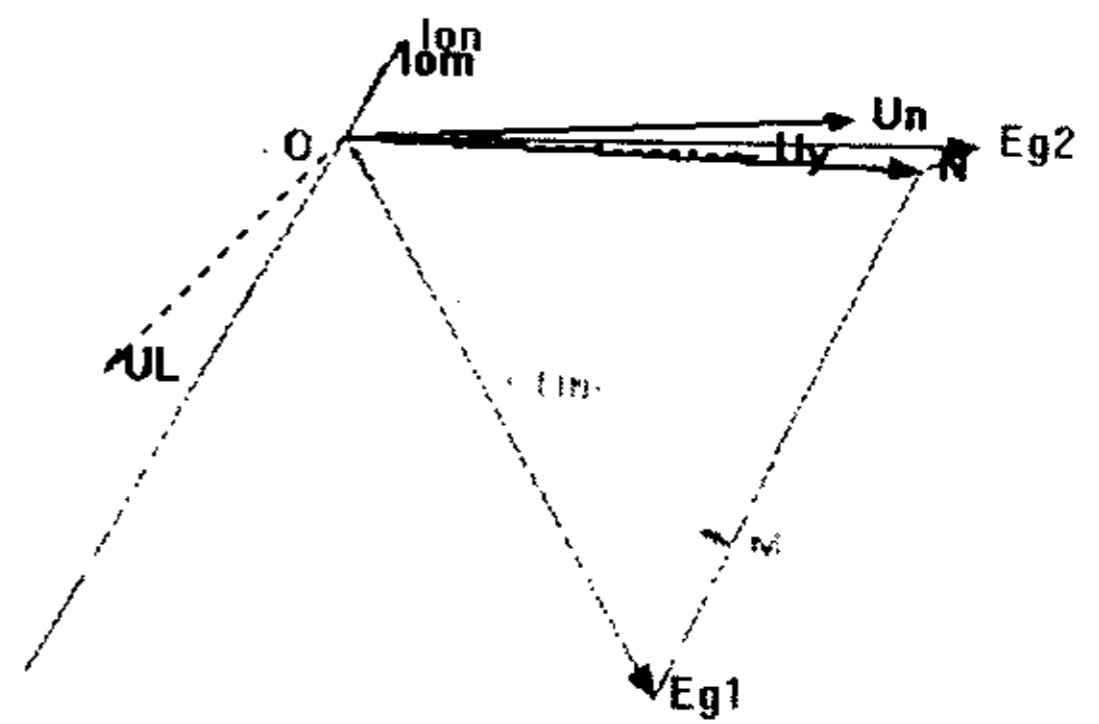
(b) 加方向元件的支接电阻特性



(c) 被保护线路 20%处以  $500\ \Omega$  接地短, 判据进行了切换, 保护正确动作; 但不满足零序功率方向的条件



(d) 环网 A 部分 1/3 处金属性接地短路, 保护误动



(e) 平行线另一回线 20%处金属性接地短路, 保护误动; 加零序功率方向后, 保护不动作

图 5.5 运行方式为大一大一大、 $-60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时, 双下偏  $I_0$  极化接地距离继电器的支接电阻特性和电压相量图

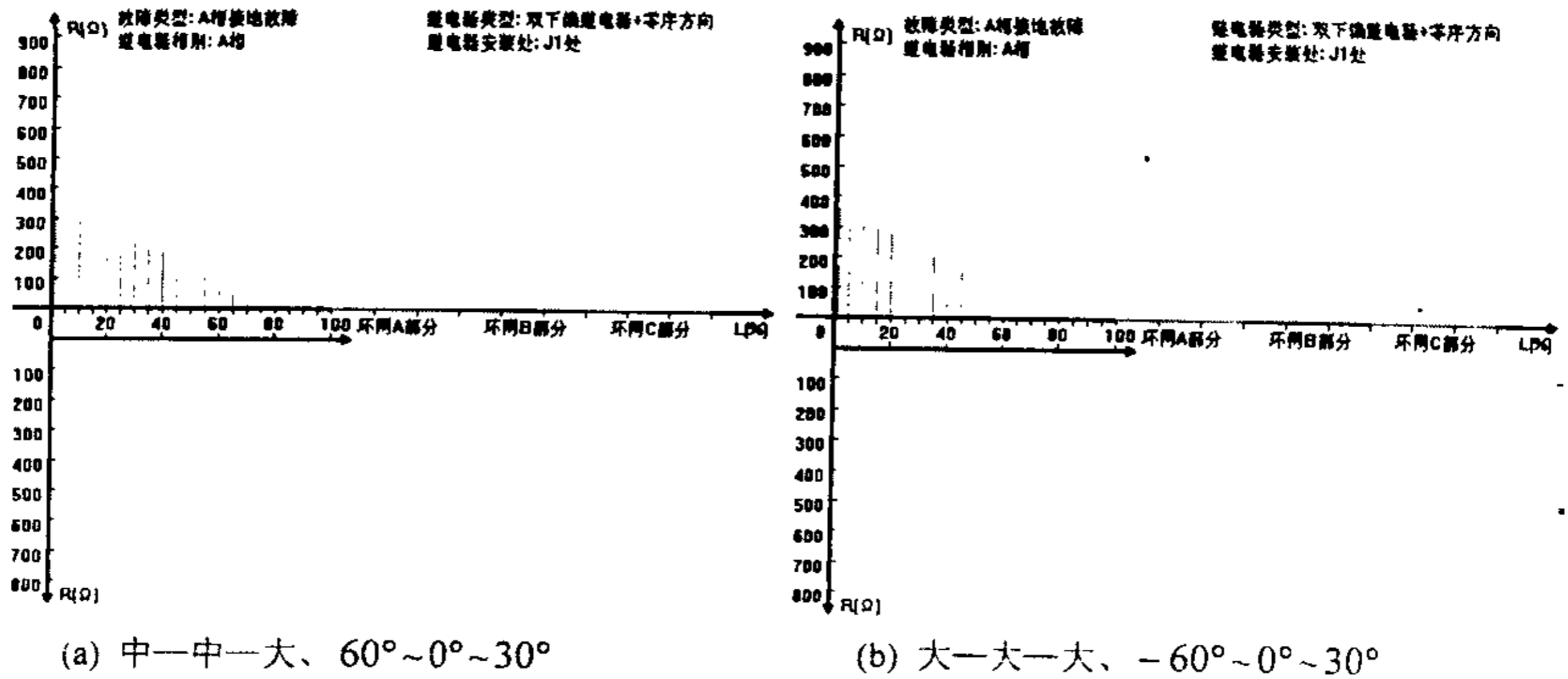


图 5.6 加方向元件，零序电流门槛=300A，

双下偏  $I_0$  极化接地距离继电器的支援电阻特性图

综上所述，由于文献[25]的理论分析和仿真工作是针对简单的双端电源、集中参数的单回线路进行的，而平行双回线的拓扑结构使得  $I_0$  与  $\dot{U}'_0$  的相位关系已经不能像单回线中那样反映区内故障和区外故障，尤其是难以区分是本回线故障还是另一回线故障。这使得双下偏  $I_0$  极化接地距离继电器不能单独用于平行双回线的保护，可以加上方向元件、提高零序电流门槛或者不做判据切换等辅助判据一起使用，然而这是以牺牲保护的耐受过渡电阻的能力为代价的。

## 5.4 多相补偿接地距离继电器

多相补偿接地距离继电器是在相补偿电压  $\dot{U}'_{Ay}$ 、 $\dot{U}'_{By}$ 、 $\dot{U}'_{Cy}$  和零序电流  $I_0$  之间进行比相。在正常运行、振荡、三相短路及两相短路时没有零序分量出现，因而有

$$\dot{U}'_{Ay} + \dot{U}'_{By} + \dot{U}'_{Cy} = 0 \quad (\text{式 5.2})$$

上式对每一瞬间都成立，也就是说，在每一瞬间若其中某一电压为正，则必有另一电压为负，因而不可能出现同极性，继电器不会动作。只有系统中出现零序分量，也就是发生接地短路时才有动作的可能。所以，认为三个补偿电压在同一侧时为接地故障，即  $\dot{U}'_{Ay}$ 、 $\dot{U}'_{By}$ 、 $\dot{U}'_{Cy}$  两两夹角不大于  $180^\circ$ 。

$$\text{判据为 } T = K_{12} \bar{K}_{31} + K_{23} \bar{K}_{12} + K_{31} \bar{K}_{23} \quad (\text{式 5.3})$$

其中：若  $0^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{Ay}}{\dot{U}'_{By}} < 180^\circ$  成立记为  $K_{12}$ ，不成立记为  $\bar{K}_{12}$ ；

若  $0^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{By}}{\dot{U}'_{Cy}} < 180^\circ$  成立记为  $K_{23}$ ，不成立记为  $\bar{K}_{23}$ ；

若  $0^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{Cy}}{\dot{U}'_{Ay}} < 180^\circ$  成立记为  $K_{31}$ ，不成立记为  $\bar{K}_{31}$ 。

对多相补偿接地距离继电器 T 判据进行仿真分析，图 5.7 是在大一大一大， $60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  运行方式下，继电器安装在送电端得到的支接电阻特性和相应的电压相量图。从图 5.7(a)中看出，在这种运行方式下，该继电器耐受过渡电阻的能力一般，在被保护线路近区发生故障时，保护的耐受过渡电阻能力不到  $200 \Omega$ 。随着故障位置远离保护安装处，保护的耐受过渡电阻能力逐渐降低，在平行线全长的 85%处，保护出现一点稳态超越的现象。图 5.7(b)的电压相量图对此做出了解释，当被保护线路 85%处以较小的电阻接地短路时，三个补偿电压  $U_y$ (A 相)、 $U_{by}$ (B 相)、 $U_{cy}$ (C 相)出现在同一侧，保护误动。

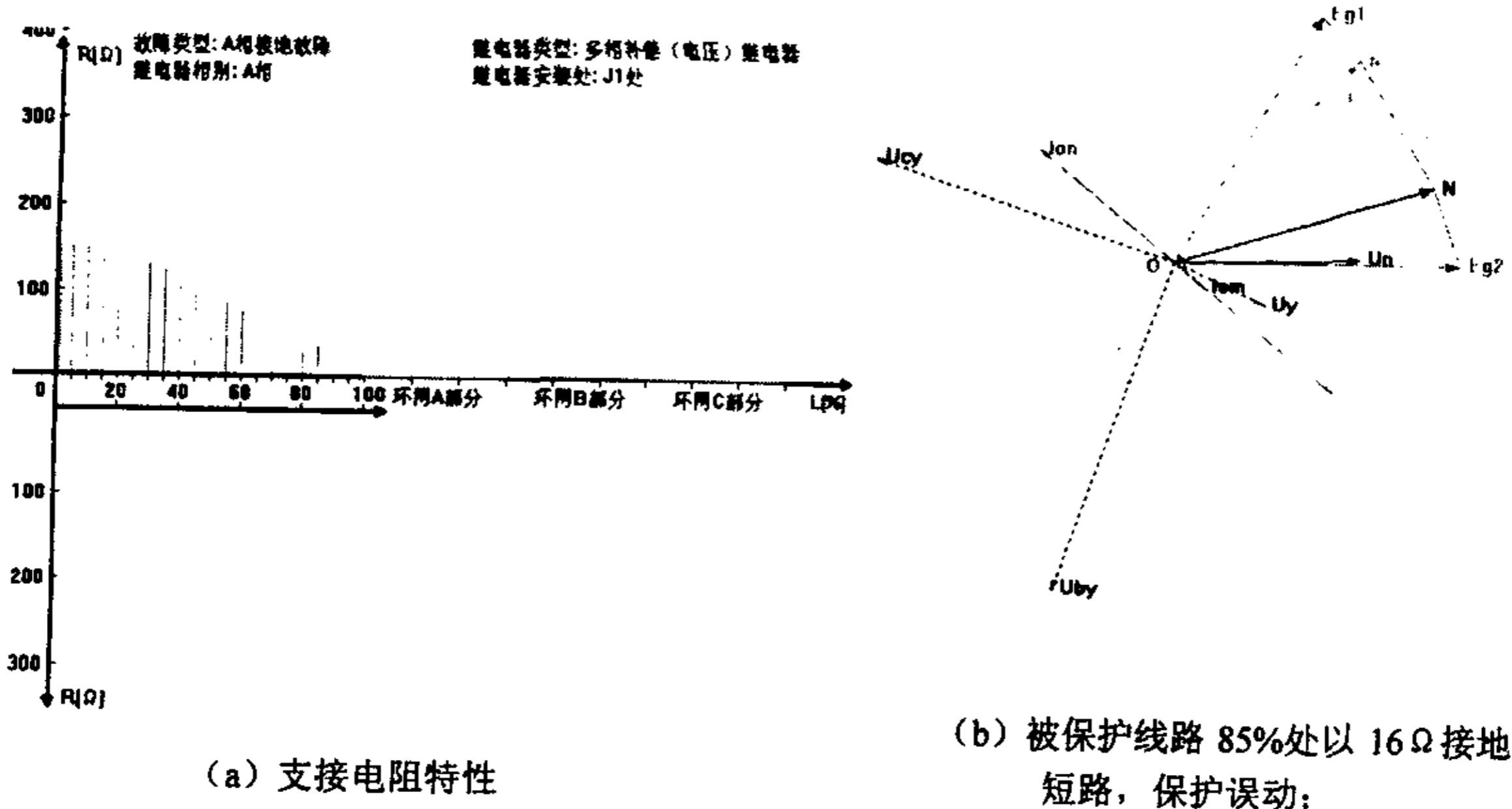


图 5.7 运行方式为大一大一大、 $60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时，多相补偿 T 判据接地距离继电器的支接电阻特性和电压相量图

图 5.8 是在大一大一大， $-60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  运行方式下，继电器安装在受电端得到的支接电阻特性图和相应的电压相量图。从图 5.8(a)中看出，在受端，该继电器耐受过

渡电阻的能力较好,在被保护线路近区发生故障时,保护的耐受过渡电阻能力超过 200  $\Omega$ 。随着故障位置远离保护安装处,保护的耐受过渡电阻能力逐渐降低,在被保护线路末端,继电器有稳态超越的现象。图 5.8(b)的电压相量图说明了误动的原因。

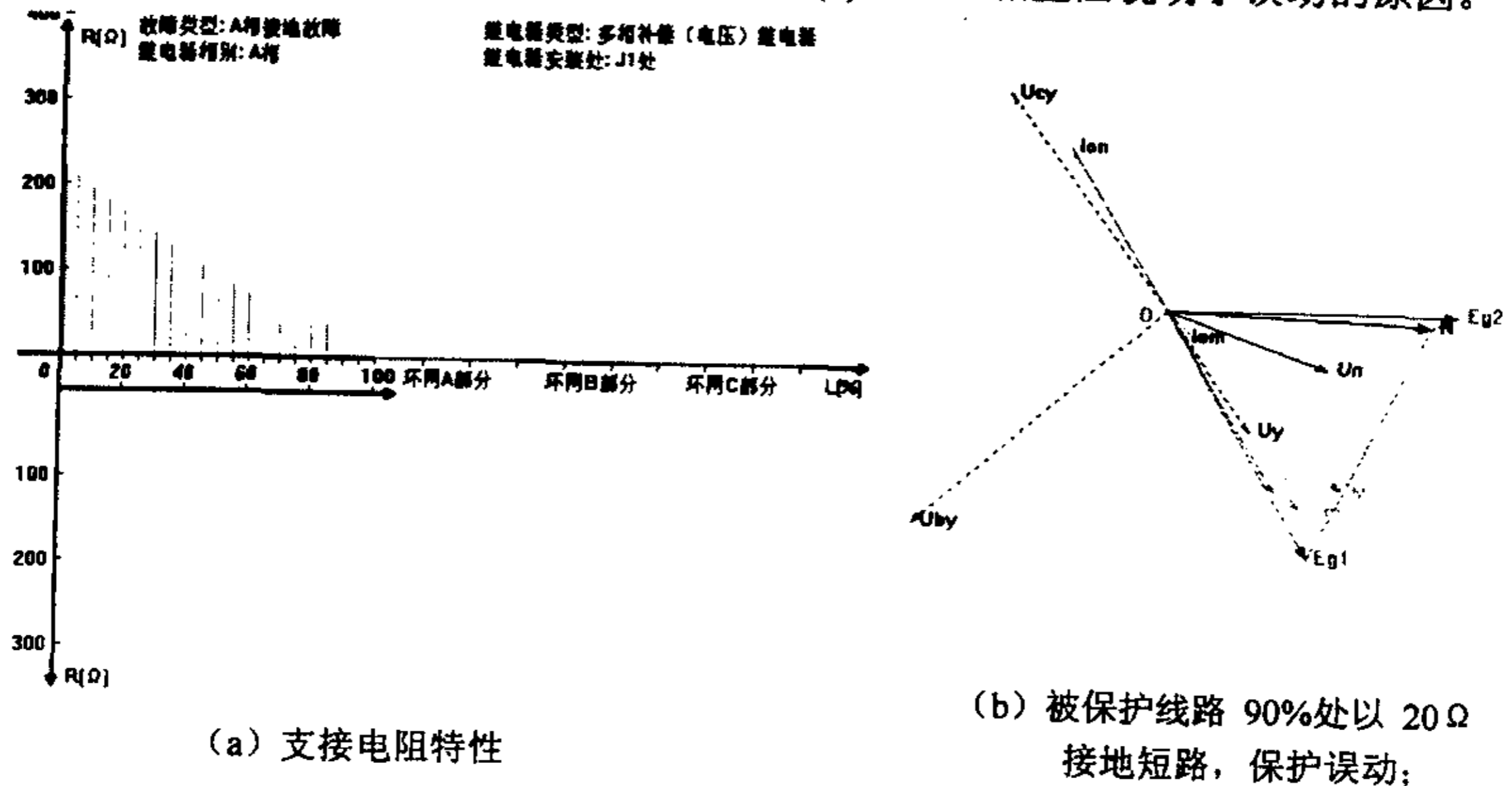


图 5.8 运行方式为大一大一大、 $-60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时, 多相补偿 T 判据接地距离继电器的支撑电阻特性和电压相量图

从上面的分析可以看到,多相补偿接地距离继电器的 T 判据的最大的优点是在环网部分发生故障时没有出现稳态超越现象;在双回线的另一回线故障时没有出现误动现象,而且继电器在受端时的耐受过渡电阻的能力高于送端。但是,这个继电器在送端的耐受过渡电阻能力不强,在被保护线路末端故障时存在着稳态超越的现象。

下面,将零序电流参与比相,以提高继电器的克服稳态超越的能力。

$$\text{将 } 180^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{Ay}}{I_0} < 360^\circ \text{ 成立记为 } C_1;$$

$$180^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{By}}{I_0} < 360^\circ \text{ 成立记为 } C_2;$$

$$180^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{Cy}}{I_0} < 360^\circ \text{ 成立记为 } C_3,$$

则多相补偿接地距离继电器的总判据为:  $\sum T = T \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$ 。 (式 5.4)

仿真的结果表明加了三个零序电抗继电器之后,稳态超越问题得到较好的解决。虽然耐受过渡电阻的能力有所较低,图 5.9(a)和图 5.7(a)比较,下降了近一半;但是多



相补偿接地距离继电器的受端特性并没有受到很大的影响，图 5.9(b)和图 5.8(a)比较，大致一样。多相补偿距离继电器的受端特性在很不利的系统运行方式下，出现了一定程度的稳态超越现象，如图 5.9(c~d)。

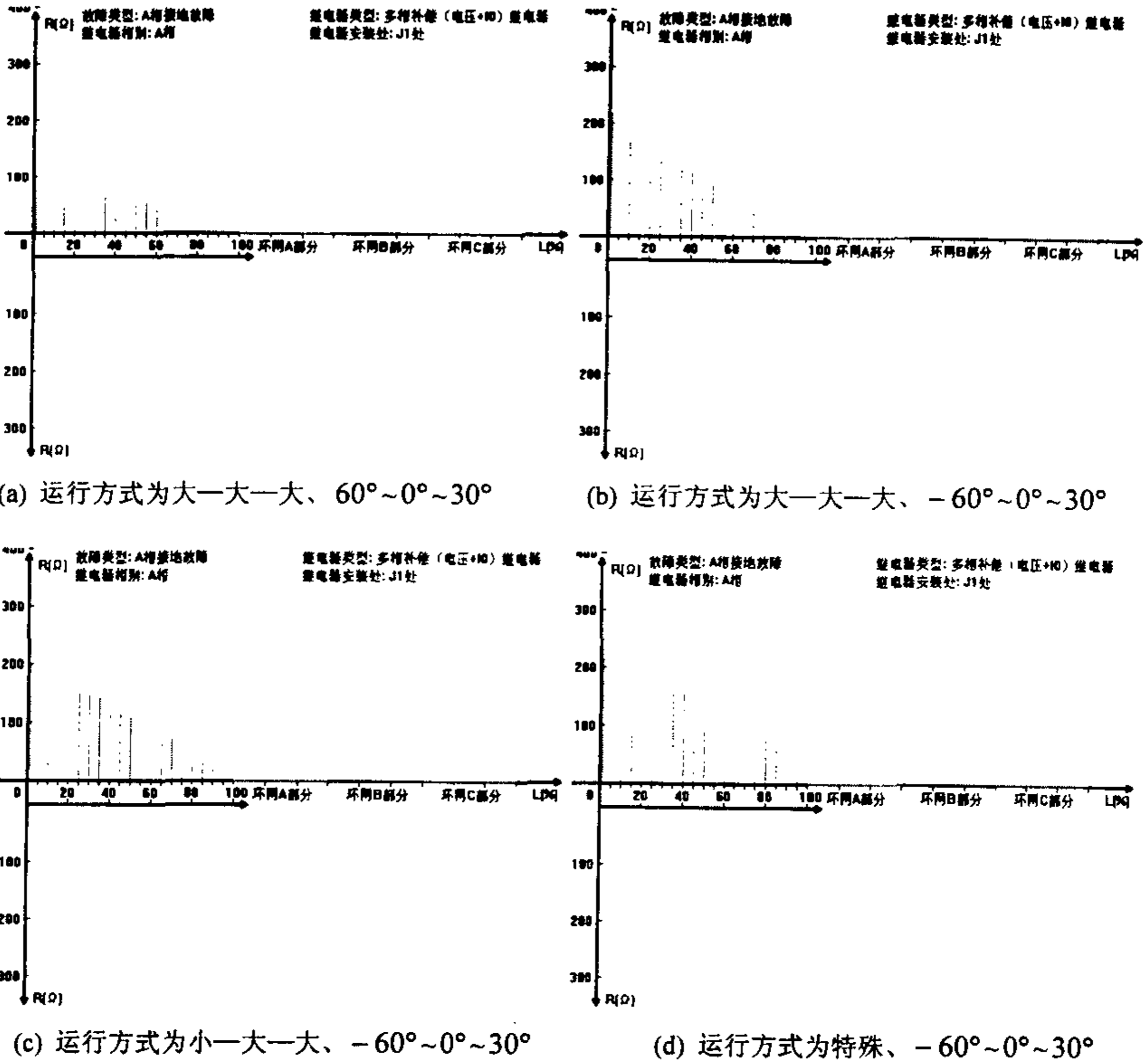


图 5.9 多相补偿接地距离继电器在各种运行方式下的支接电阻特性

总之，多相补偿接地距离继电器在本仿真系统中性能比较稳定，尽管保护处于送端时的耐受过渡电阻能力不强；在某些运行方式下，会出现一定程度的稳态超越现象，只要将保护距离的整定值缩小一些，保护处于受端时的静态特性还算是比较理想。

### 5.5 四边形特性接地距离继电器

实用的四边形特性距离继电器为了便于调节一般都由若干直线和折线特性的元件组成,如图 5.10 所示。图中 X 特性(电抗特性)的作用是测量距离, R 特性(电阻元件)用来躲负荷,两者均为直线。D 特性(方向元件)则是判别方向,一般是折线。显然,采用四边形特性的目的就是为了提高对过渡电阻的反应能力。

当以下三式同时成立的时候,四边形特性接地距离继电器判为接地故障,保护动作。

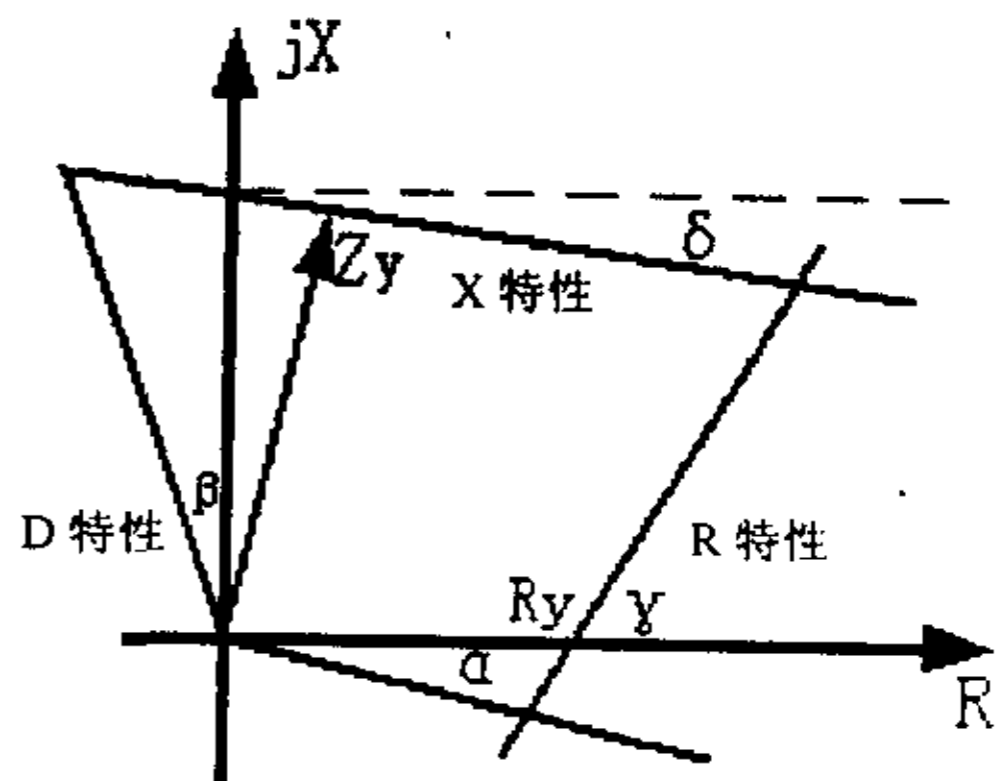


图 5.10 四边形特性接地距离继电器

$$\text{X 元件:} \quad 180^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_\phi}{\dot{I}_0 \angle -\delta} < 360^\circ \quad (\text{式 5.5})$$

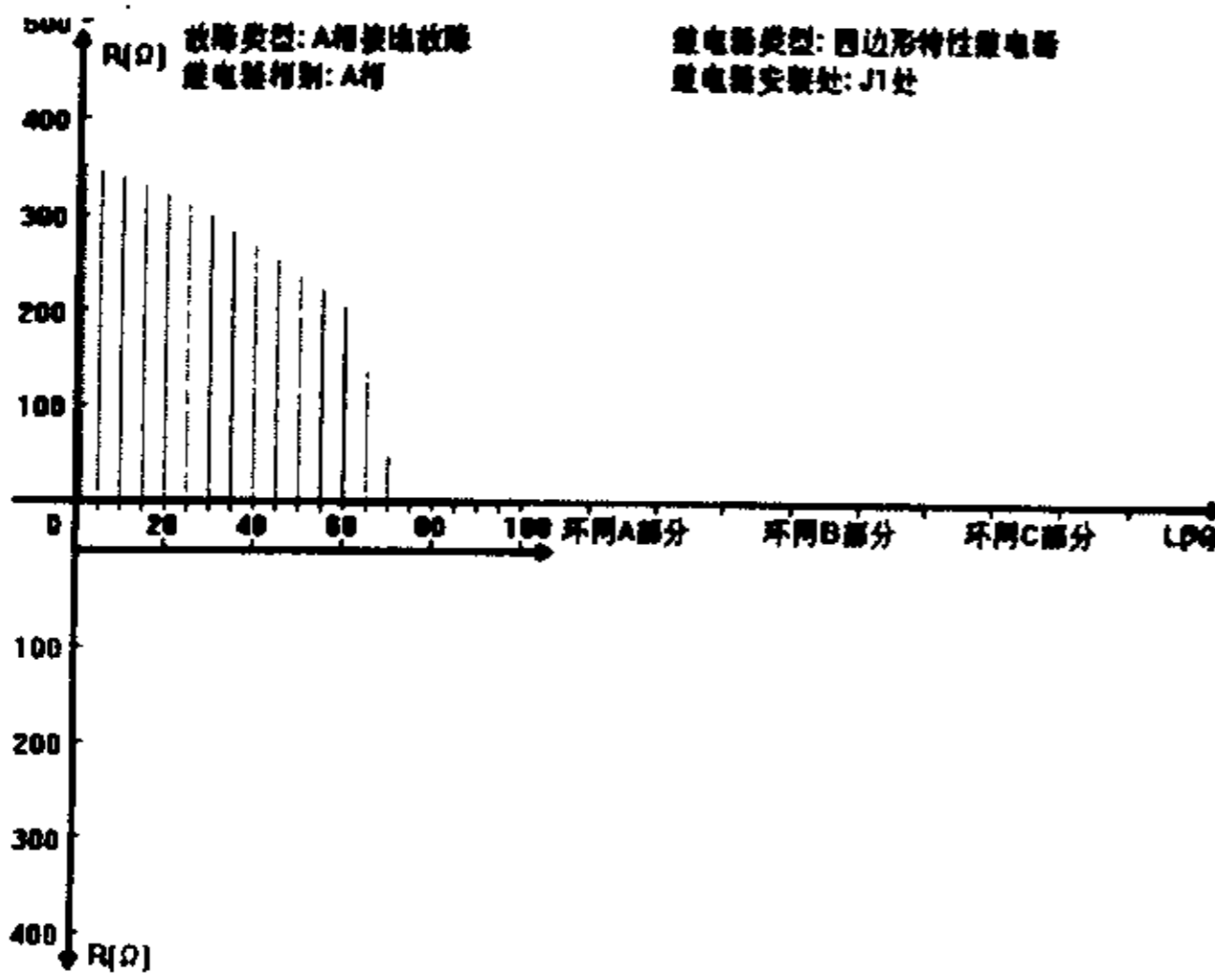
$$\text{D 元件:} \quad -\alpha < \text{Arg} \frac{\dot{U}_{|\phi|}}{\dot{I}} < 90^\circ + \beta \quad (\text{式 5.6})$$

$$\text{R 元件:} \quad \gamma < \text{Arg} \frac{\dot{U}_\phi - R_y(\dot{I}_\phi + k\dot{I}_0)}{\dot{I}_\phi} < \gamma + 180^\circ \quad (\text{式 5.7})$$

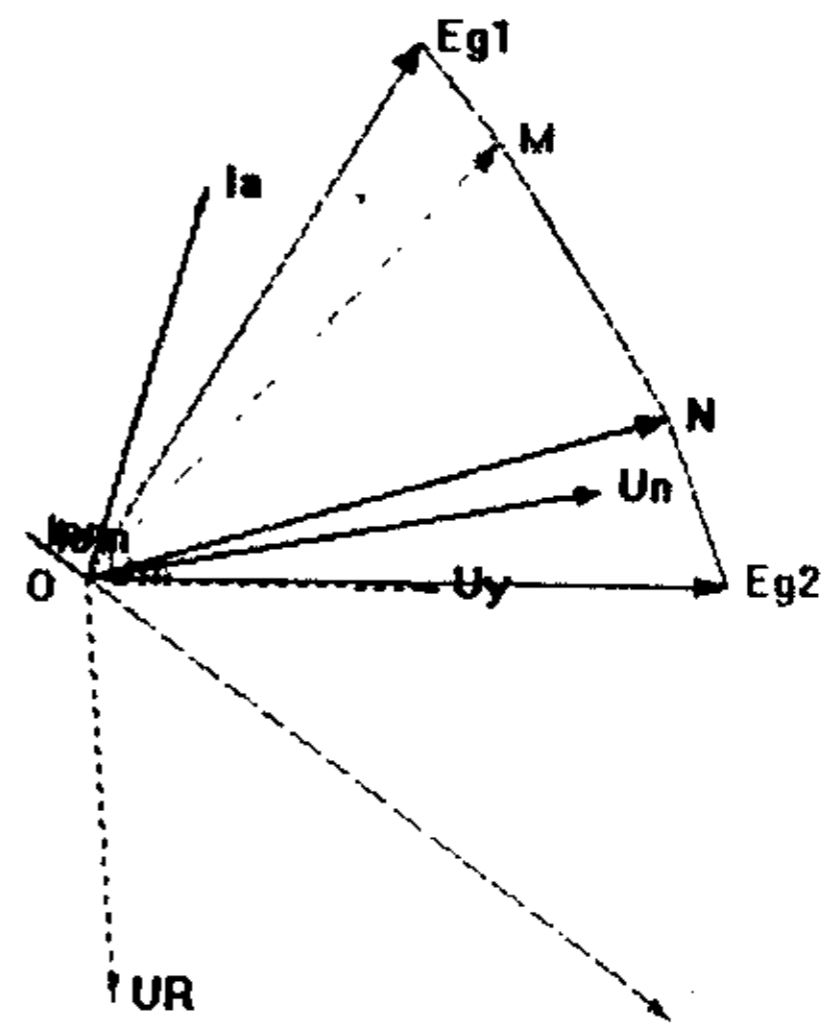
需要说明的是,在式 5.7 中,引入  $k\dot{I}_0$  有利于提高对接地电阻的反应能力。

对四边形特性接地距离继电器进行仿真分析,整定值  $\alpha = 15^\circ$ 、 $\beta = 15^\circ$ 、 $\gamma = 60^\circ$ 、 $\delta = 7^\circ$ 、 $R_y = 10R_{L1}$  ( $R_{L1}$  表示被保护线路正序阻抗的实部值)。

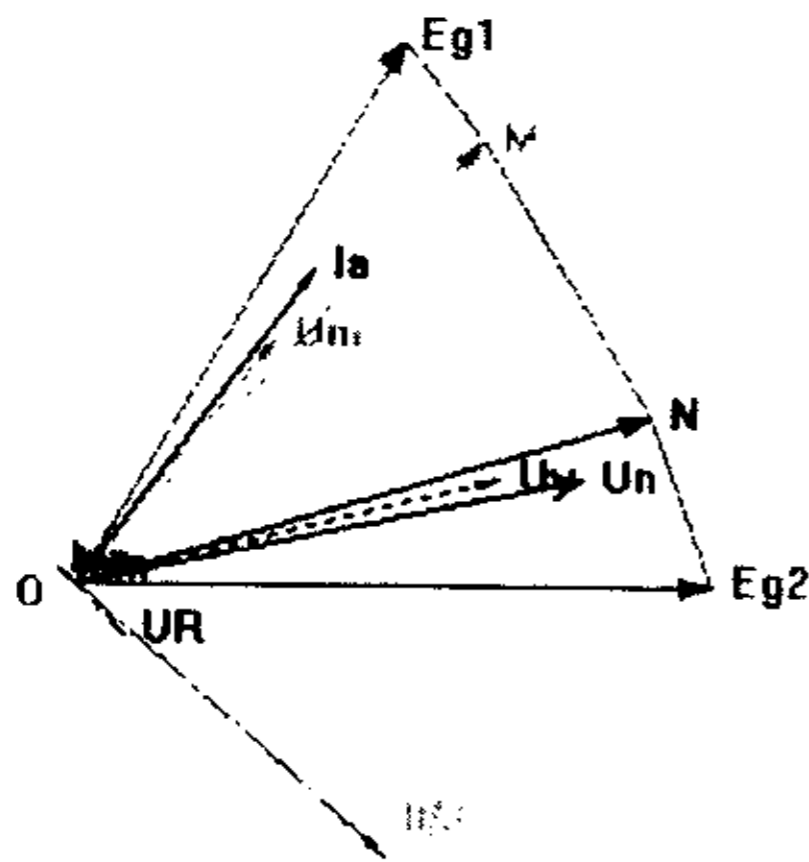
图 5.11 是在大一大一大,  $60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  运行方式下,继电器安装在送电端得到的支接电阻特性图和相应的电压相量图。从图 5.11(a)中看出,在这种运行方式下,该继电器具有比较好的耐受过渡电阻的能力,在被保护线路近区发生故障时,保护的耐受过渡电阻能力在  $300 \Omega$  左右。随着故障位置远离保护安装处,保护的耐受过渡电阻能力逐渐降低,在整定点——平行线全长的 80% 处发生故障,保护不动。在环网发生故障和平行线的另一回线发生故障的时候,四边形特性接地距离继电器没有误动。由此可见,该继电器具有良好的方向性和克服稳态超越的能力。



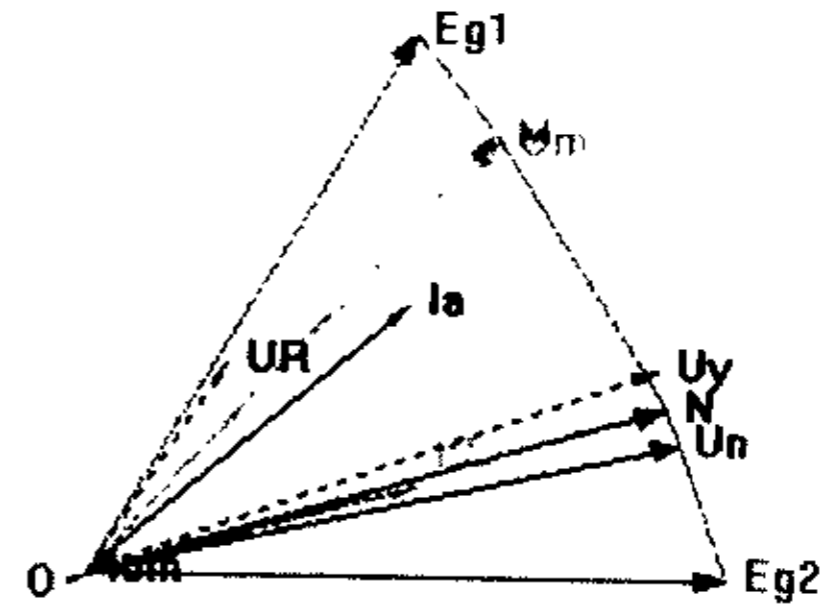
(a) 支撑电阻特性



(b) 平行线另一回线起始处金属性短路, X元件动作、D元件不动、R元件动作、保护没有误动



(c) 平行线另一回线 20%处金属性短路, X元件动作、D元件动作、R元件拒动, 保护没有误动



(d) 环网 A 部分末尾处以 60Ω 接地短路, X元件动作、D元件动作、R元件拒动, 保护没有误动

图 5.11 运行方式为大—大—大、 $60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时, 四边形特性接地距离继电器的支撑电阻特性和电压相量图

将四边形特性接地距离继电器和  $i_0$  极化接地距离继电器进行表较分析, 两者都在整定点故障时不动, 其原因相同, 参见图 5.1(c)。而在平行双回线的另一回线起始处发生金属性接地故障时, 如图 5.11(b)所示,  $\dot{U}_{|0|}$  (图中相量  $\overline{OM}$ ) 落后  $i$  (图中  $I_a$ ) 的角度超过整定的  $\alpha$ , 不满足 D 元件的动作条件; 同时, 图中相量 UR

( $U_R = \dot{U}_\phi - R_y(\dot{I}_\phi + k\dot{I}_0)$ ) 和  $\dot{I}$  (图中  $I_a$ ) 的角度满足条件, R 元件动作; 综合起来, 继电器不动作。在平行双回线的另一回线 20% 处发生金属性接地故障时, 如图 5.11(c), 满足 D 元件的动作条件, 但不满足 R 元件的动作条件, 继电器也能正确动作。而在环网部分发生短路故障时, R 元件的动作条件显然不能满足, 如图 5.11(d), 继电器正确动作。由此可见, 由于四边形特性接地距离继电器中 D 元件和 R 元件的存在, 特别是 R 元件所起的作用, 使得四边形特性接地距离继电器基本上没有区外误动的情况, 但是, 它在区内故障时耐受过渡电阻的能力和  $\dot{I}_0$  极化接地距离继电器比起来, 就要差很多了。

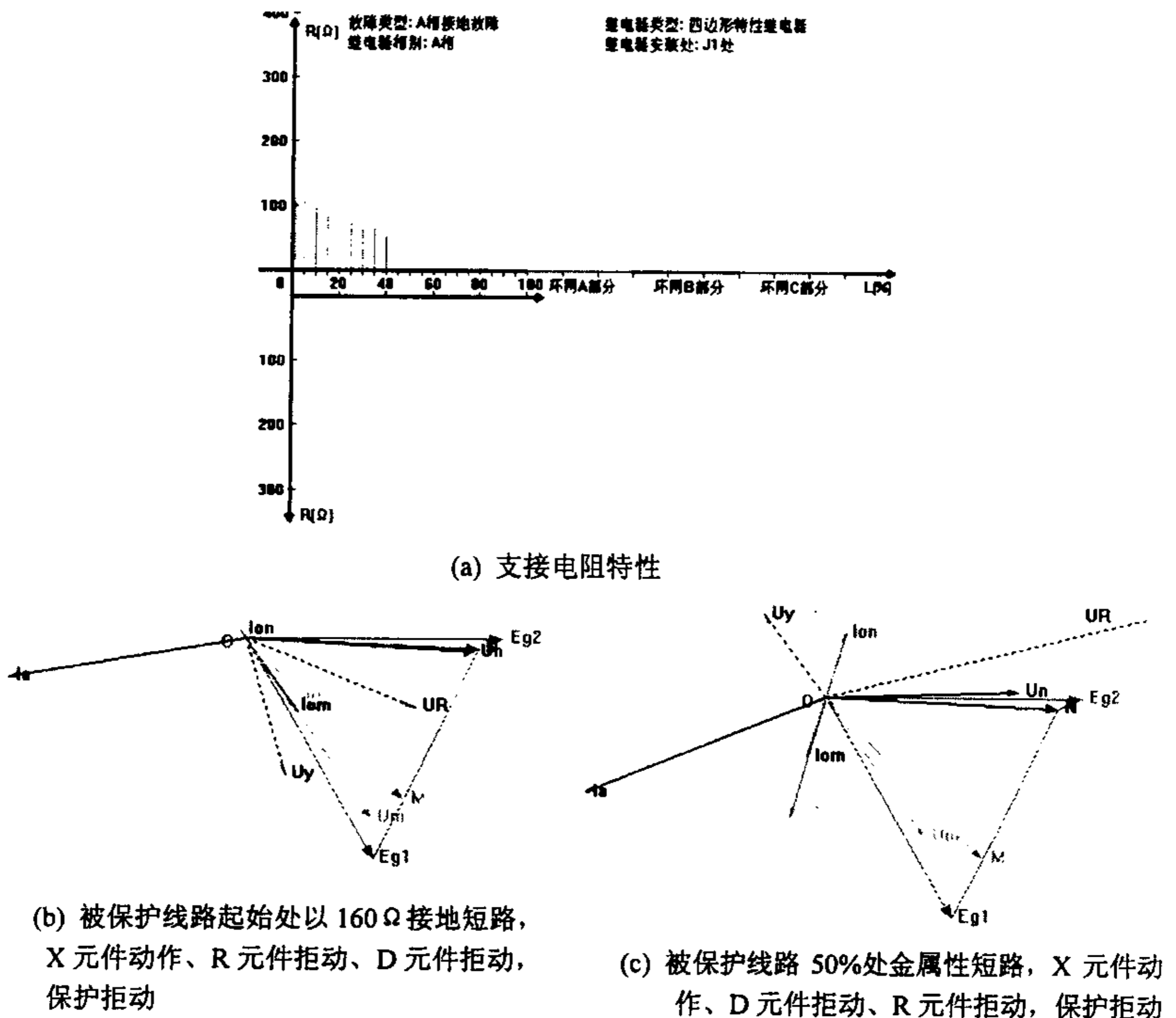


图 5.12 运行方式为大一大一大、 $-60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时, 四边形特性接地距离继电器的支接电阻特性和电压相量图

图 5.12 是在大一大一， $-60^{\circ}\sim 0^{\circ}\sim 30^{\circ}$  运行方式下，四边形特性接地距离继电器安装在受电端得到的支接电阻特性图和相应的电压相量图。从图 5.12(a) 中看出，在这种运行方式下，该继电器耐受过渡电阻能力不强，随着故障位置远离保护安装处，保护的耐受过渡电阻能力逐渐降低，并出现了严重的区内故障保护拒动的现象。在环网发生故障和平行线的另一回线发生故障的时候，继电器没有误动。分析电压相量图 5.12(b) 和 5.12(c)，该继电器在区内故障拒动的原因是 D 元件在受端未能正确区分故障的方向；R 元件未能正确区分负荷和故障，D 元件、R 元件拒动而使得继电器拒动。

## 5.6 故障分量接地距离继电器

故障分量有两大特点：1 故障分量仅在故障时出现，正常时为零；2 故障分量仅由施加于故障点的一个电动势产生。由于第一个特点，反应故障分量的保护在正常时不会启动，因而灵敏度高。由于第二个特点，如果保护原理是比较两个故障分量的相位或幅值，则其动作行为不受过渡电阻的影响。由于微机有良好的记忆力，微机保护中得到的突变量不会衰减，而模拟式保护则不能。因此，模拟式突变量保护仅能精确的实现相位比较，而微机保护则可以精确的实现相位和幅值比较。目前，故障分量应用于距离保护中有故障分量阻抗继电器和故障分量电抗继电器两种。

### 5.6.1 故障分量阻抗继电器

最先提出的故障分量阻抗继电器直接测量故障前后补偿电压的相位变化，后来提出并获得广泛应用的故障分量阻抗继电器直接反应补偿电压的幅值变化。它对过渡电阻有更强的反应能力，在微机保护中实现起来更简单。其动作条件为：

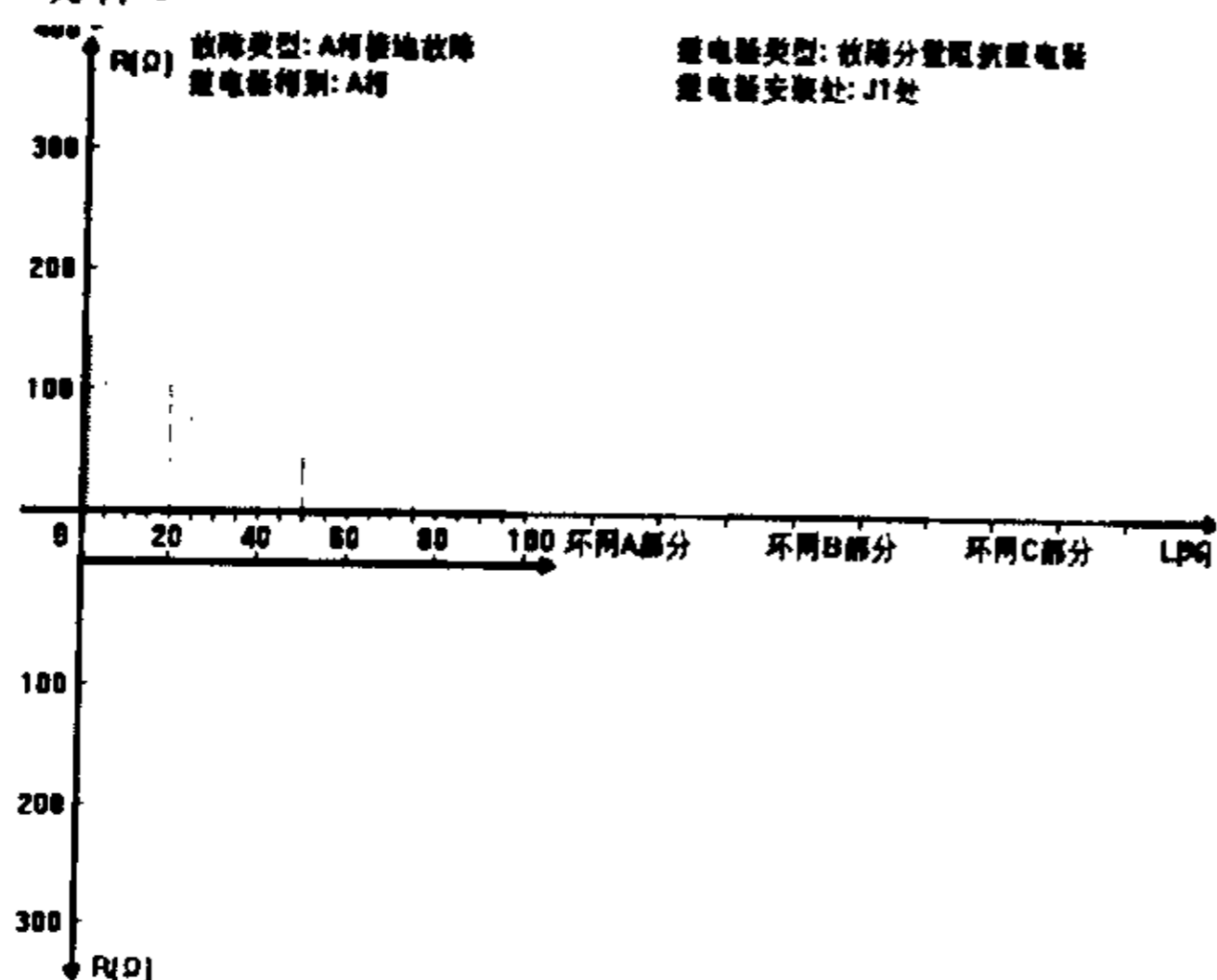
$$|\Delta \dot{U}'| \geq |\dot{U}'_{|0}| \quad (\text{式 5.8})$$

式中， $\Delta \dot{U}'$  表示补偿电压  $\dot{U}'$  的故障分量， $\dot{U}'_{|0}$  表示故障前的补偿电压， $\Delta \dot{U}' = \dot{U}' - \dot{U}'_{|0}$ 。

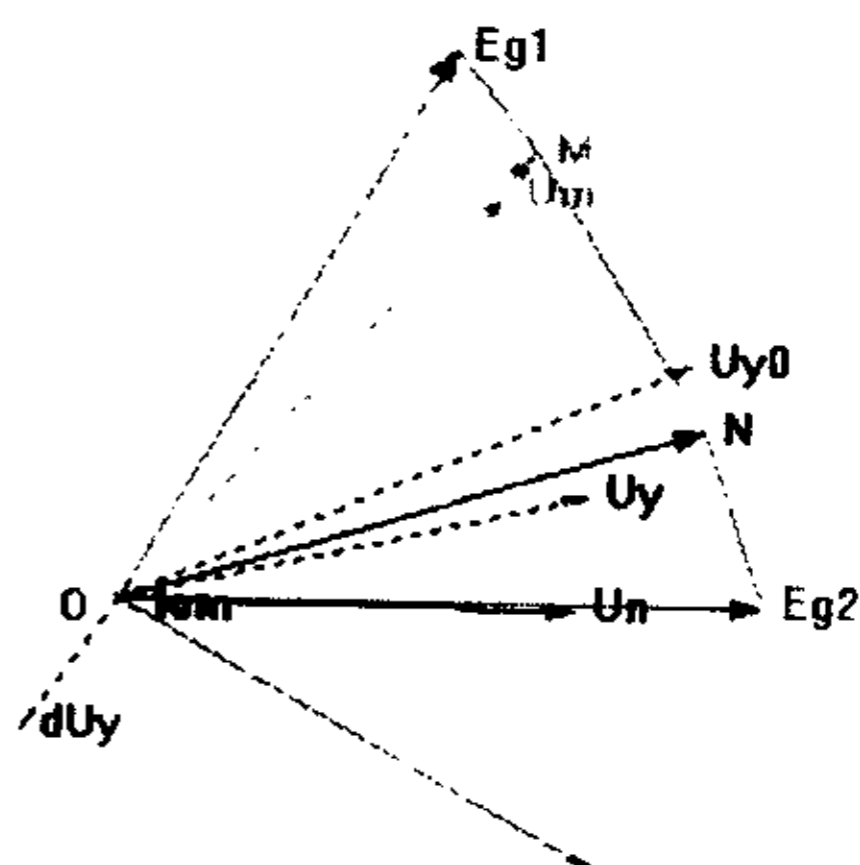
图 5.13 是在大一大一， $60^{\circ}\sim 0^{\circ}\sim 30^{\circ}$  运行方式下，故障分量阻抗继电器安装在送电端得到的支接电阻特性图和相应的电压相量图。从图 5.13(a) 中看出，在这种运行方式下，该继电器耐受过渡电阻的能力一般，在被保护线路近区发生故障时，保护的耐受过渡电阻能力在  $150\ \Omega$  左右。随着故障位置远离保护安装处，保护的耐受过渡电阻能力逐渐降低，在整定点——平行线全长的 80% 处发生故障，保护不动。在环网发生故障和平行线的另一回线发生故障的时候，该继电器没有误动。由此可见，该继电

器具有良好的方向性和克服稳态超越的能力。

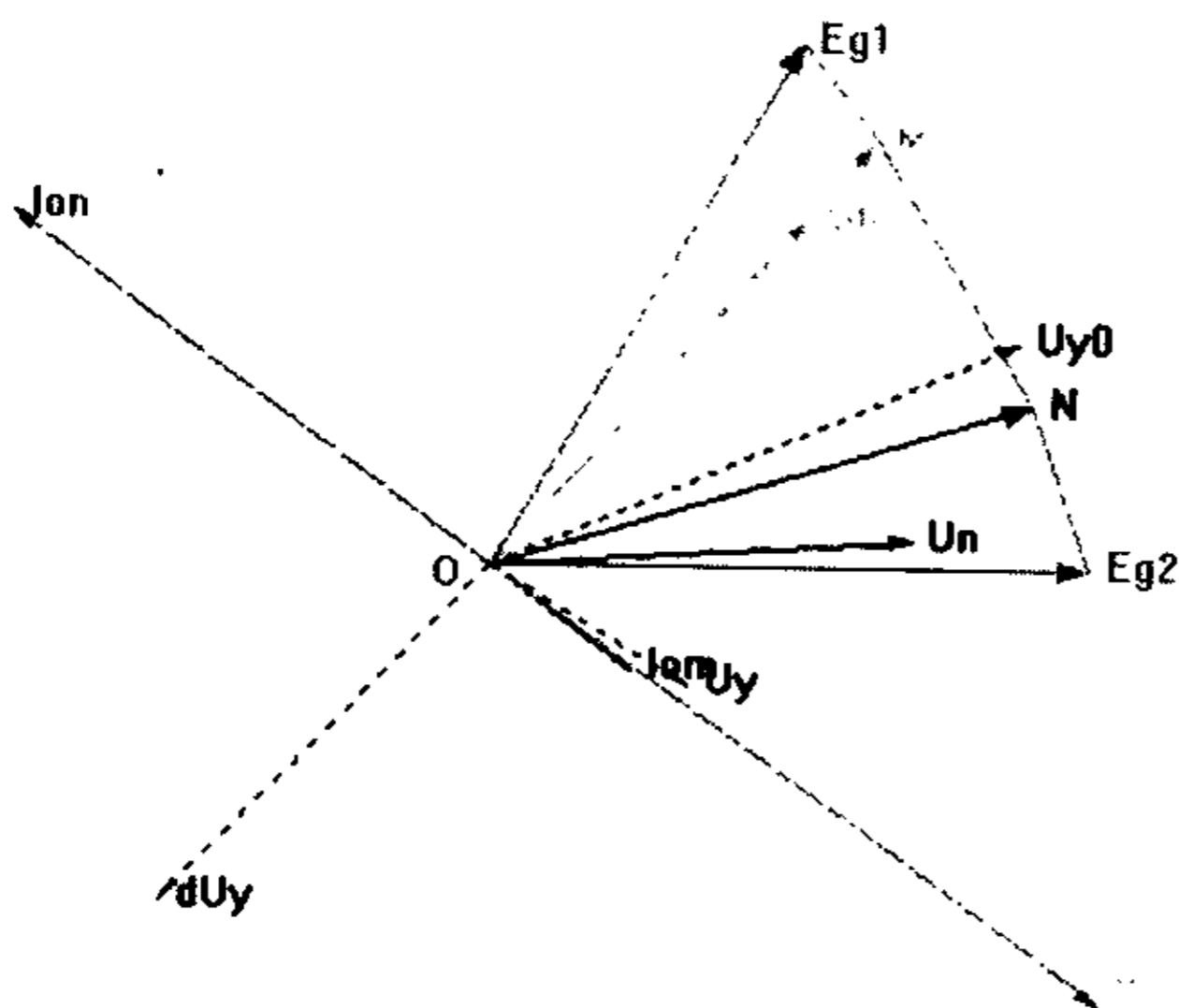
图 5.13 还绘出了相应的电压相量图，图中的相量  $U_{y0}$ 、 $U_y$  分别表示故障前、后的补偿电压， $dU_y$  表示补偿电压的故障分量，由于在图 5.13 的三个电压相量图中，相量  $dU_y$  的长度都比相量  $U_{y0}$  短，所以故障分量阻抗继电器在图示的三种情况下都不会动作。



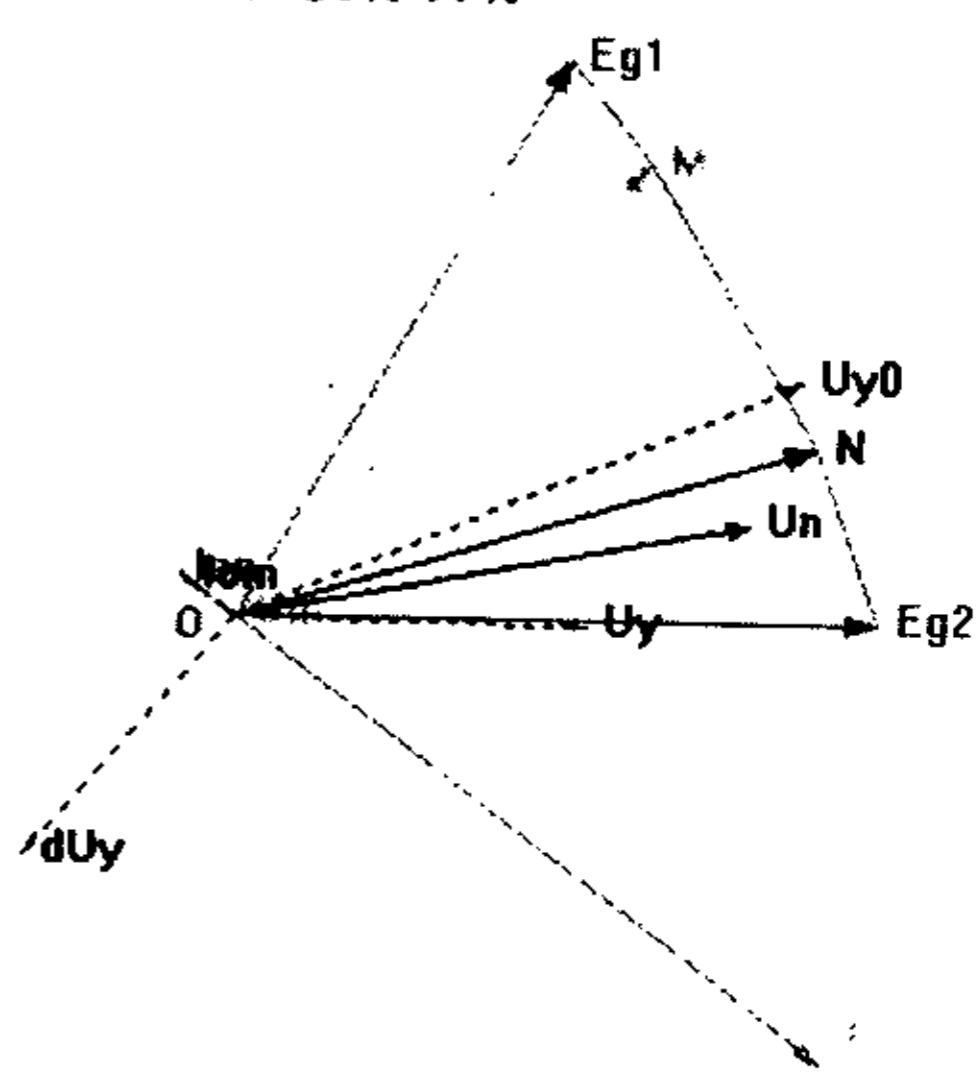
(a) 支援电阻特性



(b) 环网 A 部分 1/3 处以  $20\Omega$  接地短路，保护没有误动



(c) 被保护线路整定点(80%)处以  $20\Omega$  接地短路，保护拒动



(d) 平行线另一回线起始处金属性短路，保护没有误动

图 5.13 运行方式为大—大—大、 $60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时，故障分量阻抗继电器的支援电阻特性和电压相量图



故障分量阻抗继电器安装在受端时的耐受过渡电阻能力和在送端时不相上下。图 5.14 是在大一大一大， $-60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  运行方式下，故障分量阻抗继电器安装在送电端得到的支接电阻特性图。从图 5.14 中看出，在受端该继电器耐受过渡电阻的能力和送端差不多，在整定点——平行线全长的 80% 处发生故障，保护不动。在环网发生故障和平行线的另一回线发生故障的时候，该继电器没有误动。由此可见，该继电器在受端也具有良好的方向性和克服稳态超越的能力。

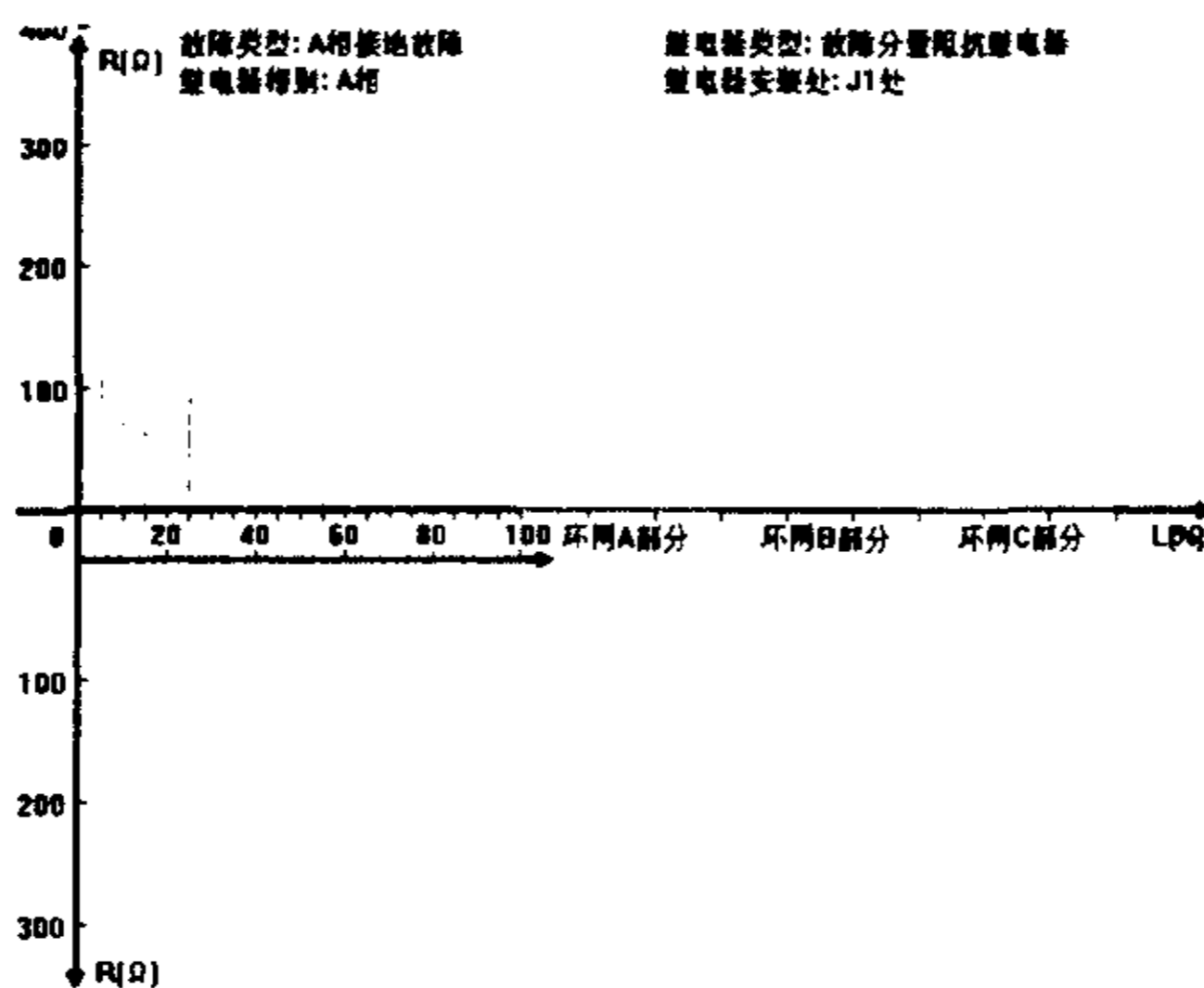


图 5.14 运行方式为大一大一大、 $-60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时，  
故障分量阻抗继电器的支接电阻特性

## 5.6.2 故障分量电抗继电器

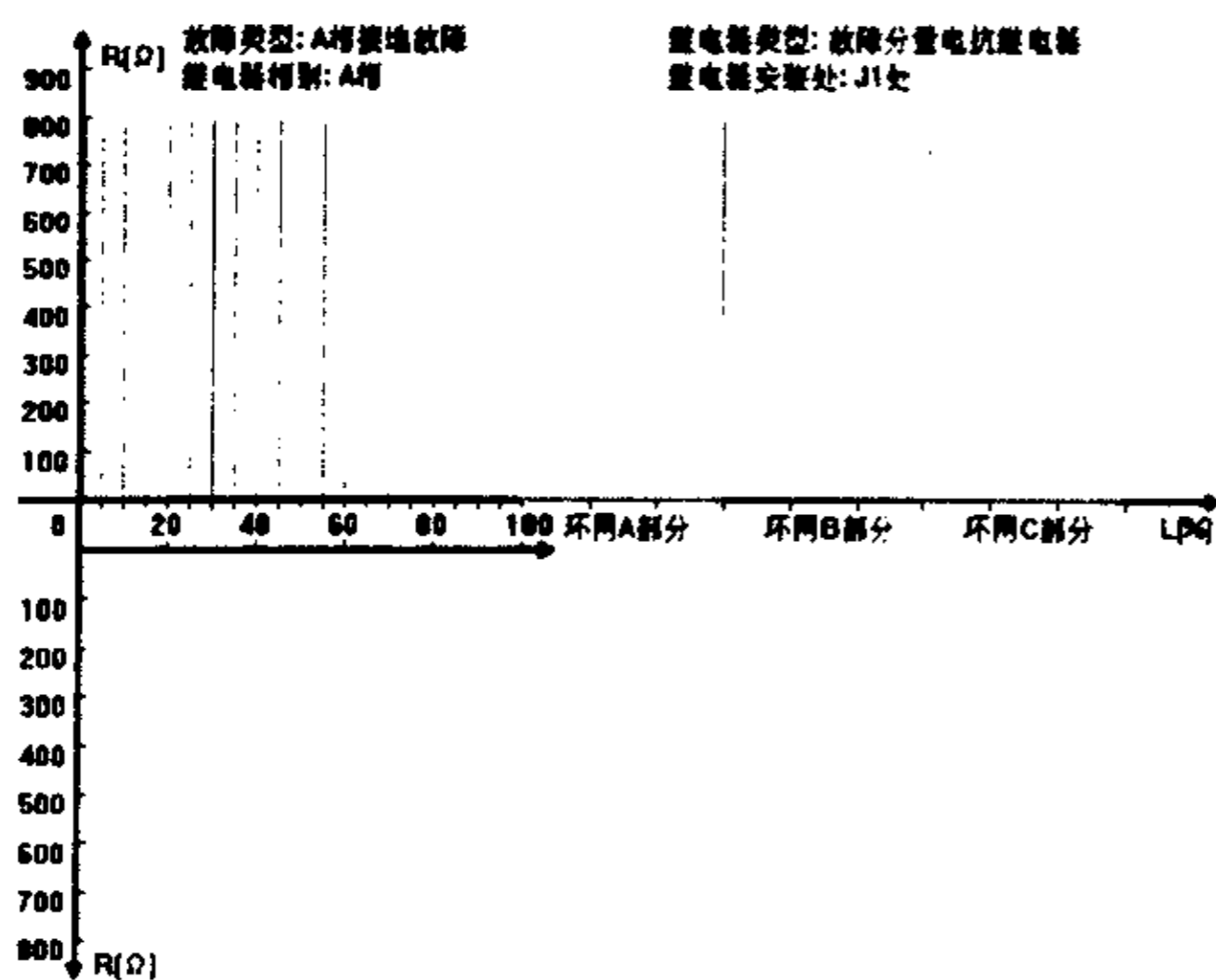
从上一节可以看到，故障分量阻抗继电器的动作特性受过渡电阻的影响明显，文献[54]提出了具有电抗特性的故障分量电抗继电器。其动作方程式为：

$$|\dot{U}' + \Delta\dot{U}'| \geq |\dot{U}'_{|0|}| \quad (\text{式 5.9})$$

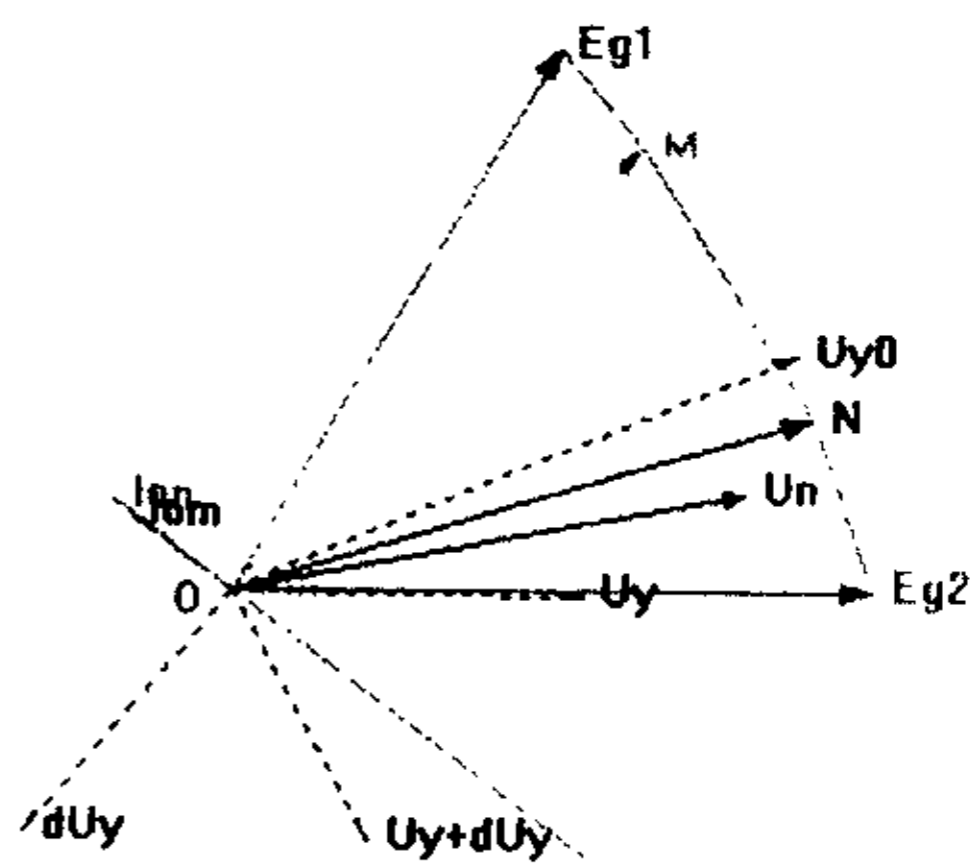
式中， $\Delta\dot{U}'$  表示补偿电压  $\dot{U}'$  的故障分量， $\dot{U}'_{|0|}$  表示故障前的补偿电压， $\Delta\dot{U}' = \dot{U}' - \dot{U}'_{|0|}$ 。

图 5.15 是在大一大一大， $60^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  运行方式下，故障分量电抗继电器安装在送电端得到的支接电阻特性图和相应的电压相量图。从图 5.15(a)中看出，在这种运行方式下，该继电器耐受过渡电阻的能力很强，在被保护线路近区发生故障时，保护的耐受过渡电阻能力达到仿真设定的最大过渡电阻值  $800 \Omega$ ，随着故障位置远离保

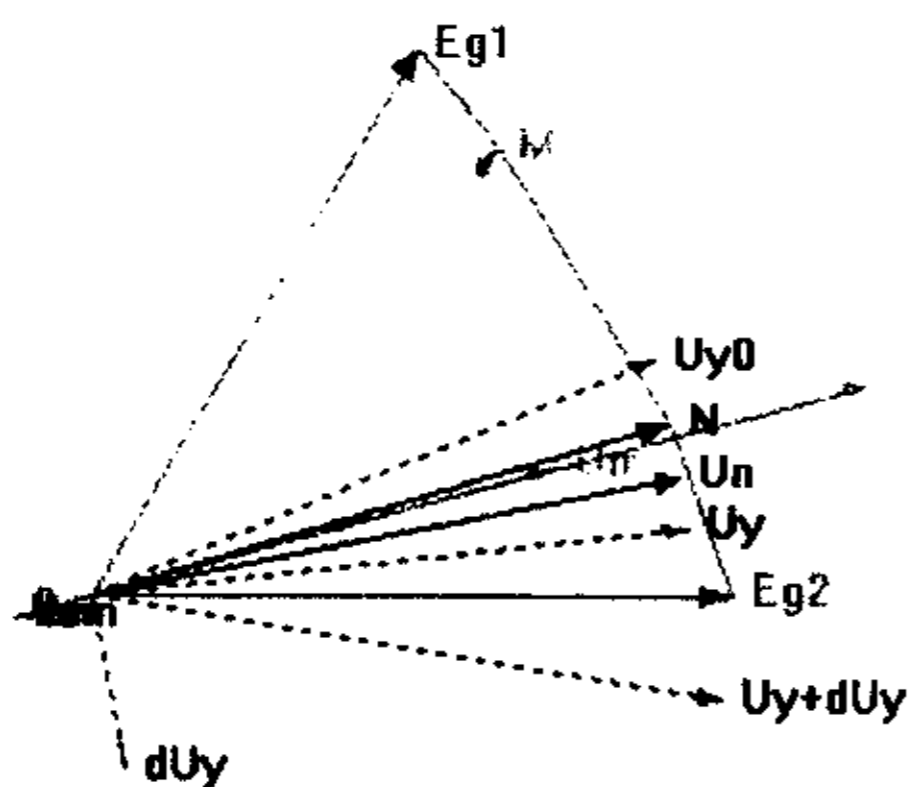
护安装处，保护的耐受过渡电阻能力逐渐降低，在整定点——平行线全长的 80%处发生故障，保护不动。在环网和平行线的另一回线发生故障的时候，该继电器有误动现象。



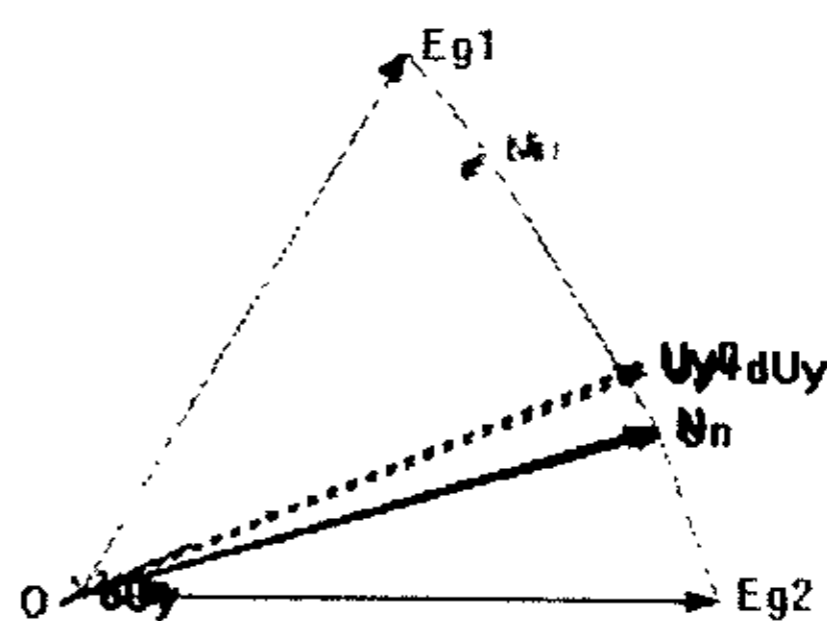
(a) 支接电阻特性



(b) 平行线另一回线起始处金属性短路，保护没有误动



(c) 平行双回线另一回线起始处以 40 Ω 接地短路，保护误动



(d) 环网 A 部分末端以 340 Ω 接地短路，保护误动

图 5.15 运行方式为大—大—大、60°~0°~30°时，故障分量电抗继电器的支接电阻特性和电压相量图

图 5.15 中的相量  $U_{y0}$ 、 $U_y$  分别表示故障前、后的补偿电压， $dU_y$  表示补偿电压的故障分量。在平行双回线另一回线起始处发生金属性接地短路时，如图 5.15(b) 所

示, 相量  $U_{y+dU_y}$  的长度比相量  $U_{y0}$  小, 继电器不动作; 但当过渡电阻增大到  $40\ \Omega$  时, 相量  $U_{y+dU_y}$  的长度也增加到比相量  $U_{y0}$  大, 继电器误动, 如图 5.15(c)。图 5.15(d) 表示在环网的远端故障时, 由于受到另一个送电系统的影响, 继电器也发生了误动。

图 5.16 是在大一大一大,  $-30^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  运行方式下, 故障分量阻抗继电器安装在受电端得到的支接电阻特性图和相应的电压相量图。从图 5.16(a) 中看出, 在受端, 该继电器耐受过渡电阻的能力有所下降, 但在被保护线路近区发生故障时, 保护的耐受过渡电阻能力仍达到  $300\ \Omega$  左右。在环网发生故障的时候, 该继电器会出现严重的误动现象。电压相量图 5.16(b) 说明了误动的原因。

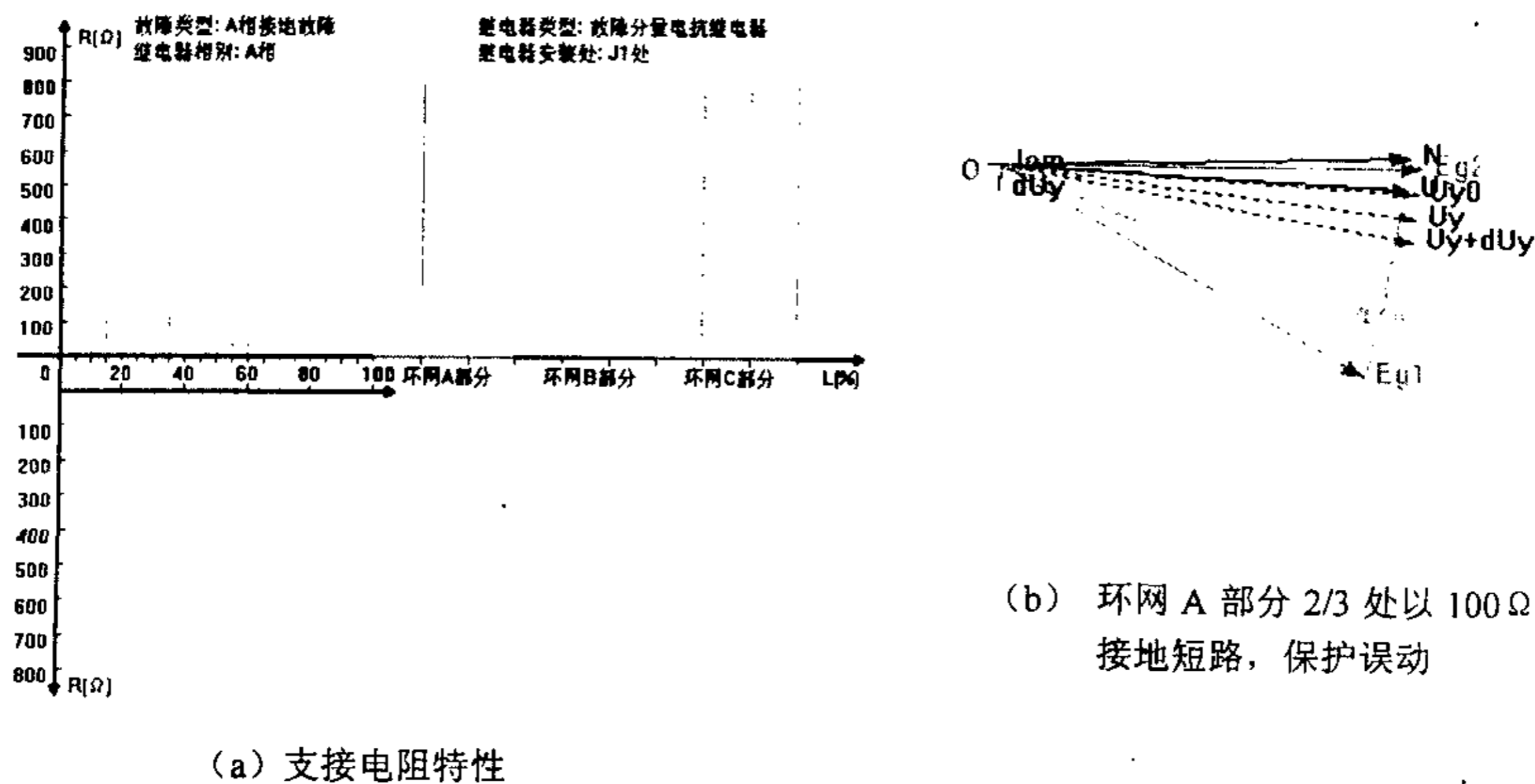


图 5.16 运行方式为大一大一大、 $-30^\circ \sim 0^\circ \sim 30^\circ$  时, 故障分量电抗继电器的支接电阻特性和电压相量图

综上所述, 故障分量阻抗继电器具有良好的方向性, 不论继电器处于送端还是受端, 在平行双回线另一回线和环网发生故障时, 继电器基本上不会误动。但故障分量阻抗继电器的耐受过渡电阻能力一般。而故障分量电抗继电器具有很强的耐受过渡电阻的能力, 但是它在平行双回线另一回线和环网发生故障时, 继电器均有误动现象出现, 必须和其他的辅助元件配合使用。

## 5.7 接地距离保护新方案

从仿真分析中可以看出，多相补偿接地距离继电器性能稳定，尤其是其处于受端时的静态特性，在众多的距离继电器中是非常突出的。然而，多相补偿接地距离继电器的送端特性却并不理想，对过渡电阻的反应能力不强。考虑到  $I_0$  极化接地距离继电器非常灵敏，处于送端时耐受过渡电阻的能力很强，虽然在平行双回线的另一回线故障和环网故障时有一些误动，但在继电器处于送端的情况下都很容易利用辅助判据加以克服。由此，提出多相补偿与送端  $I_0$  极化相配合的接地距离保护方案。

多相补偿接地距离继电器与  $I_0$  极化接地距离继电器的动作方程如式 5.4、式 5.1 所述，分别设为  $D$  和  $J$ 。增加一个送端判据  $S$ ：

$$0^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}_{I_0}}{\dot{U}_{|0|} - \dot{I}_{I_0} \cdot Z_{set}} < 180^\circ \quad (\text{式 5.10})$$

则新方案的动作方程为： $X = D + J \cdot S$ 。 (式 5.11)

新方案的送端特性应该和  $I_0$  极化接地距离继电器一样，受端特性则和多相补偿接地距离继电器一样，动作特性图参见 5.2、5.4 节。

为了分析送端判据，在大一大一大， $1^\circ \sim 0^\circ \sim 0^\circ$  和  $-1^\circ \sim 0^\circ \sim 0^\circ$  运行方式下作了仿真，如图 5.17。

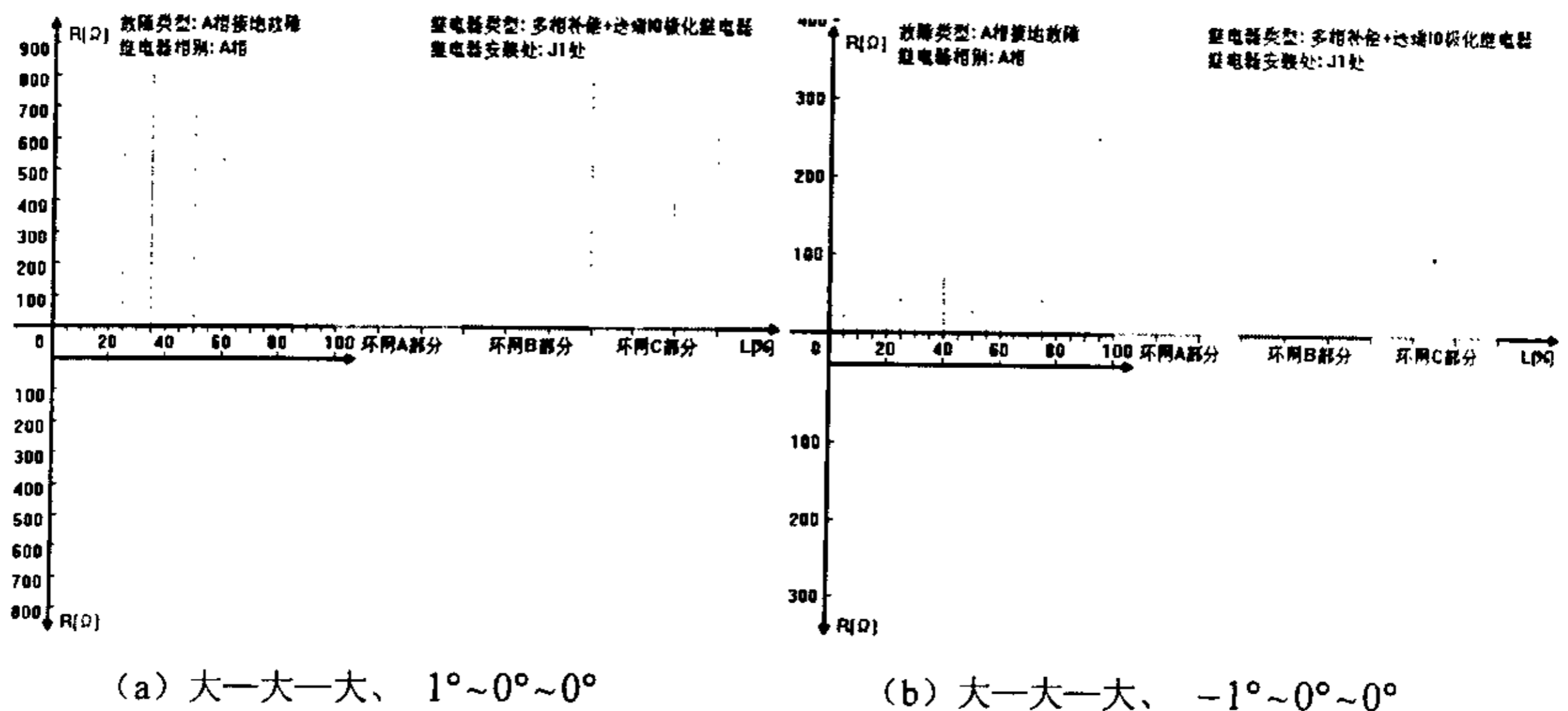


图 5.17 接地距离保护新方案支接电阻特性图

## 5.8 本章小结

本章对  $i_0$  极化接地距离继电器、双下偏  $i_0$  极化接地距离继电器、多相补偿接地距离继电器、四边形特性接地距离继电器、故障分量阻抗继电器、故障分量电抗继电器进行了静态特性的仿真研究，发现性能比较稳定的继电器是多相补偿接地距离继电器、四边形特性接地距离继电器和故障分量阻抗继电器，但是这些继电器耐受过渡电阻能力有限；其余的三种继电器虽然都具有很高的灵敏度，耐受过渡电阻能力很强，但是它们都有各种误动的情况出现。使用的时候要谨慎，必须和其他的辅助元件配合使用。

将多相补偿接地距离继电器和  $i_0$  极化接地距离继电器的优点结合起来，提出了一种距离保护的新方案。该方案具有较强的耐受过渡电阻能力，与方向元件和零序电流门槛配合使用，能够正确反映平行双回线故障，可以克服区外稳态超越现象。

## 6 超高压输电线路后备保护方案设计

本章设计了以 DSP 为硬件平台的一套超高压线路保护装置的后备保护方案, 该方案的保护范围无死区, 躲负荷能力强, 适应非全相运行并易于现场运行人员理解掌握。

### 6.1 引言

作者曾参与了由湖北省电力试验研究所、华中科技大学联合开发的新型输电线路保护装置的项目, 设计了整套装置中的后备保护方案。整个后备保护系统是以 32 位 DSP 为基本的硬件平台的数字式快速保护装置, 主要适用于 220kV~500kV 电压等级的输电线路, 采用目前较成熟的高速浮点数字信号处理器 (DSP) TMS320C3X, 通过高速多通道 16 位 A/D 转换器完成数据采集。采用无死区, 躲负荷能力强, 适应非全相运行并且易于现场运行人员理解掌握的方案, 构成后备距离保护。

该后备距离保护方案主要配置了以下几种功能: 选相功能; 三段式接地距离保护; 三段式相间距离保护; 六段式零序电流速切保护及反时限零序电流保护; PT 断线自动投入过流保护; 具有分相出口跳闸功能; 具有一次重合闸功能, 可实现单相重合、三相重合、综合重合和停用重合闸; 具有完善的事件记录。

### 6.2 启动元件

启动元件能灵敏的检测出各种故障, 并最大限度地限制超范围。本方案设计以下四个启动元件。

#### 1. “负序零序”启动元件

“负序零序”启动元件用来反映不对称故障, 其判据如下:

$$I_2 + KI_0 > I_{set} \quad (\text{式 6.1})$$

式中:  $I_{set}$  为固定阈值。 $I_{set}$  应按末端两相短路时最小的负序电流  $I_{2min}$  整定, 即  $I_{set} = I_{2min} / K_I$  ( $K_I$  为灵敏度系数)。

两相短路接地和单相短路接地时的  $I_2$  较两相短路时要小, 因此, 在启动元件中增加了  $KI_0$  分量以保证在接地故障时的灵敏度。为此, 应计算末端两相和单相短路接地时的最小  $I_2$  和  $I_0$ , 进而决定应当选择的最小  $K$  值, 使得在两种接地故



障时的灵敏度都能满足要求，做到各种不对称故障时灵敏度基本相同。此外，为保证单相高阻接地故障时能可靠启动，一般应使（当  $k=3$  时） $(0.2 \sim 0.4)I_n \leq I_{set} \leq 1000A$  (500kV 线路)， $(0.2 \sim 0.4)I_n \leq I_{set} \leq 1300A$  (220~110kV 线路)。

## 2. 相电流突变量启动元件

相电流突变量启动元件主要用来反映对称故障，同时也可作为不对称故障启动判据的补充，其判据如下：

$$\Delta I_A > I_{set} \quad (\text{式 6.2})$$

在负荷状态下， $\Delta I_A = 0$ 。因此  $\Delta I_A$  可以在三相短路电流小于负荷电流的情况下启动；又由于  $\Delta I_A$  仅负责在三相短路时启动，而三相短路时电流又是最大，其定值可以较高，提高了安全性。

## 3. 过流启动元件

如果负荷缓慢增加，三相电流始终保持对称，则  $I_2 + KI_0$  和  $\Delta I_A$  元件可能都不启动。因此，增加过流启动元件，其判据如下：

$$I_\phi > 1.2I_n \quad (\text{式 6.3})$$

其中： $\phi$  代表 A、B 或 C 相。

## 4. 转换性及非全相运行二次突变量启动元件

在保护发单跳令后和非全相运行时，设置二次突变量启动元件。

$$\Delta I_{\phi \max} > k_1 \Delta I_{\phi \phi T} + k_2 I_{\phi \phi} + k_3 I_n \quad (\text{式 6.4a})$$

$$\Delta I_{\phi \max} > k_1 \Delta I_{\phi \phi T} + k_2 I_{\phi \max} + k_3 I_n \quad (\text{式 6.4b})$$

$\Delta I_{\phi \phi T}$  为健全相间记忆电流不平衡输出， $I_{\phi \phi}$  是健全相相间电流。 $I_{\phi \max}$  是最大故障相电流。

式 6.4b 在保护发单跳令至保护启动后 150ms 内投入，150ms 后投入式 6.4a。

## 6.3 选相元件

选相元件采用相电流差突变量选相和稳态量选相相结合的方法，通过综合选相逻辑选出故障相。

选相逻辑：当启动元件发现故障启动之后，首先采用判据 1 判断是否为接地故障；如果是，采用 2、3 选接地故障相；如果不是，采用 4 选相。

1. 利用零序电压和零序电流大小确定是不是接地故障。

若  $3I_0 > I_{0set}$  且  $3U_0 > 2.5V$  时，判为接地故障。反之为不接地故障。

2. 在接地故障中，利用  $I_0$  和  $I_2$  的相位关系，把故障分为 3 个区，确定可能的故

障类型。

3. 根据电压的关系，确定是单相接地还是两相接地。

假定故障位于 AG/BCG 区， $\sqrt{3}|U_a + U_0| < |U_{bc}|$  成立，认为是 AG (A 相接地) 故障，反之为 BCG (BC 两相接地) 故障。

4. 在不接地故障中，通过电压的大小确定是对称故障还是两相故障。并确定两相故障的故障相。

5. 非全相故障的选相：

非全相故障时，先发三跳令，然后根据继电器动作情况进行选相。若相间继电器动作就选为相间故障；根据零序电流突变量的情况判断是否为接地故障；故障时，两健全相的接地距离继电器也都投入判断，根据动作的结果，给出动作继电器和相应的故障相。

## 6.4 接地距离保护

接地距离设计为三段式，采用了以下几种继电器。

### 1. 零序电抗继电器

为了使接地距离继电器的静态动作特性能覆盖较大的过渡电阻而又不会发生超越，本装置设计采用零序电抗继电器。其动作判据为：

$$360^\circ > \text{Arg} \frac{\dot{U}_\phi - Z_{set}(\dot{I}_\phi + K\dot{I}_0)}{\dot{I}_0} > 180^\circ \quad (\text{式 6.5})$$

为了防止受电侧零序电抗继电器引起保护的误动作，采用增加送端判据来进行闭锁。

送端判据：

$$0^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}_{|0|}}{\dot{U}_{|0|} - \dot{I}_{|0|} \cdot Z_{set}} < 180^\circ \quad (\text{式 6.6})$$

当两者的相位关系发生改变，不满足上式闭锁零序电抗继电器。

为了防止保护在反方向故障和远方故障误动作，还采用了零序方向元件和零序电流门槛进行闭锁。

### 2. 多相补偿接地距离继电器

为了提高接地距离保护的受端静态特性，本保护方案还采用多相补偿接地距离继电器。其动作判据为：

$$T = (K_{12}\bar{K}_{31} + K_{23}\bar{K}_{12} + K_{31}\bar{K}_{23}) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \quad (\text{式 6.7})$$

其中：  $0^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{Ay}}{\dot{U}'_{By}} < 180^\circ$  成立记为  $K_{12}$ ，不成立记为  $\bar{K}_{12}$ ；

$0^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{By}}{\dot{U}'_{Cy}} < 180^\circ$  成立记为  $K_{23}$ ，不成立记为  $\bar{K}_{23}$ ；

$0^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{Cy}}{\dot{U}'_{Ay}} < 180^\circ$  成立记为  $K_{31}$ ，不成立记为  $\bar{K}_{31}$ ；

$180^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{Ay}}{I_0} < 360^\circ$  成立记为  $C_1$ ；

$180^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{By}}{I_0} < 360^\circ$  成立记为  $C_2$ ；

$180^\circ < \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{Cy}}{I_0} < 360^\circ$  成立记为  $C_3$ 。

根据各种继电器的特性，接地距离继电器三段按以下配置：

1). 接地距离 I、II 段的动作逻辑为：

多相补偿继电器动作 + (零序电抗继电器动作 & 送端判据满足) & 零序正方向元件动作 & 超过零序电流门槛

2). 接地距离 III 段的动作逻辑为

采用不带偏移特性的方向阻抗继电器，以 A 相接地距离继电器为例：

$$270^\circ > \text{Arg} \frac{-j\dot{U}_{CB}}{\dot{U}_A - Z_{set}(I_A + KI_0)} > 90^\circ \quad (\text{式 6.8})$$

## 6.5 相间距离保护

相间距离元件分三段：

1. I 段相间距离继电器采用健全相电压极化的姆欧继电器，具有一个可整定偏转角。

$$270^\circ - \theta > \text{Arg} \frac{-j\dot{U}_\phi}{\dot{U}_{\phi\phi} - Z_{set}I_{\phi\phi}} > 90^\circ - \theta \quad (\text{式 6.9})$$

其中： $U_{\phi\phi}$  为故障相线电压， $I_{\phi\phi}$  为故障相线电流， $U_\phi$  为健全相电压。

2. II 段相间距离继电器采用由健全相电压极化的姆欧继电器。其判据为：

$$270^\circ > \text{Arg} \frac{-j\dot{U}_\#}{\dot{U}_\# - Z_{\text{set}2} \dot{I}_\#} > 90^\circ \quad (\text{式 6.10})$$

3. III 段相间距离继电器用具有抛球特性的姆欧继电器。

由于其动作时间延时长，在振荡与短路存在时也能正确测量，为此采用本相间电压为极化电压。其判据为：

$$270^\circ > \text{Arg} \frac{\dot{U}_\# - Z_{\text{set}1} \dot{I}_\#}{\dot{U}_\# - Z_{\text{set}4} \dot{I}_\#} > 90^\circ \quad (\text{式 6.11})$$

其中： $I_\#$  为故障相线电流， $U_\#$  为故障相线电压， $Z_{\text{set}1}$  为相间一段整定阻抗， $Z_{\text{set}4}$  为相间四段整定阻抗。

4. 三相故障时仍用 BC 相参数进行测量，和两相故障不同的是：当极化电压低于 12V 时，采用 BC 相记忆电压作极化电压，其动作判据为：

$$270^\circ > \text{Arg} \frac{\dot{U}_{BC(0)}}{\dot{U}_{BC} - Z_{\text{set}} \dot{I}_{BC}} > 90^\circ \quad (\text{式 6.12})$$

5. 非全相运行期间，相间阻抗元件采用自身测量电压作为极化量。

## 6.6 零序电流保护

零序电流保护分为两部分：定时限零序方向过流保护和零序过流反时限保护。

### 1. 零序方向过流保护

零序方向过流保护考虑两种情况：全相运行状态和非全相运行状态。全相运行时按常规设计四段零序方向过流保护但推荐仅用第一、四两段；非全相运行时两段零序过流保护：不灵敏 I 段和不灵敏 II 段。所有的零序段均可整定为带方向。

全相运行时，当  $3U_0 > 2V$  且  $3I_0 > I_{0\text{set}}$  时进行方向判断，其正方向动作区为：

$$12^\circ < \text{Arg} \frac{I_0}{U_0} < 192^\circ \quad (\text{式 6.13})$$

其整定配合按以下原则：

(1) 第 I 段的定值按本线全长的 80% 整定，无需和相邻线保护配合。

(2) 第 II 段的定值与下一条线的 I 段配合，一般因整定计算量大，推荐不采用，对第 II 段应按满足对本线接地故障有灵敏度整定，第 II 段不作用于跳闸。

(3) 第 III 段按保护本线路末端故障满足灵敏度整定，用延时与邻线配合，同时也作为某些功能判据中故障类型（对称或不对称故障）的判别定值。

(4) 第 IV 段零序电流定值是按躲过下一条线路始端三相短路时，流过装置的最大不平衡电流整定。一般整定为 300A(500kV) 和 400A(220kV)。

非全相运行时，其整定配合按以下原则：

- (1) 不灵敏 I 段按线路非全相运行时又发生振荡所出现的最大零序电流整定。
- (2) 不灵敏 II 段按线路非全相运行时出现的最大零序电流整定。

## 2. 零序方向反时限保护

零序反时限过流保护的動作特性为：

$$\int \left[ \left( \frac{I_0}{I_{0s}} \right)^2 - 1 \right] dt > E$$

式中  $I_{0s}$  为零序电流启动定值， $E$  为时间常数定值。

在零序保护中，还有以下特性：

- a. 零序一段動作时间固定为 0 秒。
- b. 零序各段是否带方向可以分别整定。
- c. 零序 II、III 動作是否動作三跳可以整定。
- d. 零序四段及零序反时限是否经延时 (100ms) 投入可整定。
- e. 零序电流反时限保护動作三跳。
- f. 非全相和 PT 断线 (若零序电压自产) 期间，零序反时限保护自动不带方向。
- g. 非全相运行阶段，只保留零序不灵敏一段和反时限零序段。

## 6.7 振荡闭锁

振荡闭锁分为四个部分，任意一个動作开放保护。

### 1. 瞬时开放保护

在启动元件启动后的 160ms 以内无条件开放保护。保证正常运行情况下突然发生事故能快速开放。如果在 160ms 延时段内的距离元件已经動作，则说明确有故障，则允许该测量元件一直動作下去，直到故障被切除。

### 2. 不对称故障开放元件

不对称故障开放元件采用以下判据：

$$|I_0| + |I_2| \geq m|I_1| \quad (\text{式 6.14})$$

其中： $m$  一般取为 0.66。

### 3. 对称故障开放元件

在启动元件开放 160ms 以后或系统振荡过程中，如发生三相故障，上述二项开放措施均不能开放保护。因此对对称故障设置专门的振荡判别元件，其测量振荡中心电压，其测量方法如下：

$$U_{os} = U_{\ast} \cos \varphi \quad (\text{式 6.15})$$

其中： $U_{bc}$  为 BC 相线电压， $\varphi$  为线电压与线电流的夹角加上 90 度减去线路正序阻抗角。

对称故障用  $U \cos \phi$  判断两侧电势的相位差  $\delta$ ，在  $\delta \approx 180^\circ$  时， $U \cos \phi$  接近于 0。在三相短路时不论故障点远近如何， $U \cos \phi$  等于或小于电弧的压降，约为额定电压的 5%。故障时  $U \cos \phi$  如此之小，使得非常容易区分正常运行、进入振荡和发生故障等各种状态。装置在系统进入振荡时置振荡标志，在  $U \cos \phi$  下降到接近 5% 时测量振荡的滑差，使得  $U \cos \phi$  元件很准确地躲过振荡中  $U \cos \phi < 0.05$  的时间，不开放保护。在振荡中发生故障时  $U \cos \phi < 0.05$  保持不变，于是经小延时开放保护。由于躲过振荡所需的延时是根据对滑差实时测量的结果确定的，因此既能有效地闭锁保护，又使振荡中发生三相短路时最大限度地降低了保护的延时。

#### 4. 非全相运行

非全相运行时，测量非故障两相电流差的二次突变量，当该电流突然增大时，开放非全相保护。

## 6.8 非全相运行

非全相运行指线路的三相中有一相跳开，只剩两相正常运行。造成非全相运行主要有 2 种情况：I. 线路发生单相接地故障，保护单相跳闸，造成非全相运行。II. 开关一相偷跳开或输电线被拉断，造成非全相运行。

非全相运行状态可以通过母线电压和线路电流进行判断以及断路器跳闸位置继电器 TWJ 节点来判断。考虑到 TWJ 节点的可靠性不高，其只作为一个辅助判据。

#### 1. 非全相运行状态的确定：

保护发跳闸动作命令，且对应相电流变为零，认为该相已跳开，进入非全相运行状态：

某相负荷电流变为零，而其它两相正常有负荷，且 TWJ 为 1 时，认为该相已跳开，进入非全相运行状态：

某相负荷电流变为零，而其它两相正常有负荷，若 TWJ 为 0 时，认为无法判定该相是跳开还是该相 CT 断线。若 PT 在线路侧，此时加入电压判据。当 PT 在母线侧时，CT 断线判据动作，则闭锁本判据，CT 断线判据不动作时，仍判为非全相。

检测到非全相，程序转入非全相模块。

#### 2. 非全相运行状态时，完成以下任务：

确定跳闸相；

开放条件：测量健全相间电流的工频变化量，作为非全相运行震荡闭锁开放元



件。

开放后：保留接地距离 II 段和相间距离 II 段。保留不灵敏零序 I 段和不灵敏零序 II 段。距离继电器采用相电压极化的偏移特性圆。

准备合闸于故障的条件：当跳开相又有电流后，200ms 内准备合闸于故障跳闸，阻抗特性包含原点。当三跳动作时，准备三相重合，有电流后开放 200ms。若单相运行时，切除运行相。

## 6.9 重合闸

本保护方案重合闸设计为一次重合闸方式，用于单开关方式的线路（对一个半开关方式根据重合闸跟开关原则，重合闸功能由另外配置的开关保护装置实现）。可实现单相重合闸，三相重合闸、综合重合闸和停用四种方式。

1. 起动：由保护起动或断路器位置不对应起动。

保护起动：有单相跳闸起动和三相跳闸起动两个开入量；单相故障起动则重合单相，但在发合闸脉冲前健全相又故障（保护补发三跳起动）则停止单跳计时，改用三相重合计时，其它保护动作起动可起动本装置的重合闸。

断路器位置不对应启动：主要防止断路器偷跳。利用跳闸位置继电器启动重合闸（接点位置由合态变位为跳态），同时将手跳、远跳信号引入，闭锁重合。

2. 重合

重合闸起动后，在未发重合令前，保护完成如下功能：

a. 不断检测是否有闭锁重合闸的开入（低气压、远跳、手跳、断路器未跳开等）。若有，计数器清零。

b. 若为单相跳闸或单相不对应启动重合闸，则不断检测是否有三跳启动的开入和三相跳闸位置，若有，按三相重合闸处理。

c. 根据重合闸控制字设置的检同期和检无压等方式，进行电压检查，设置检无压侧若满足无压条件则进行重合，若不满足无压条件则转为检同期。

d. 若重合闸一直未能重合，等待一定的延时整组复归。在单相重合的方式下，延时为  $2 \cdot TS1 (TL1) + 4s$ ，在三相重合闸方式下，延时为  $2 \cdot TS3 (TL3) + 4s$ ，（4 个整定值）。其中  $TS1$ 、 $TL1$  为单相重合闸短延时、长延时； $TS3$ 、 $TL3$  为三相重合闸短延时和长延时。

3. 重合闸充放电

为了防止多次重合，在程序中设置了计数器完成“充、放电”功能。

记数条件：

a. 重合闸启动回路不动作。

- b. 没有低气压闭锁重合闸和闭锁重合闸开入。
  - c. 重合闸投入。
  - d. 断路器在合闸位置，断路器的跳闸位置继电器不动作。
- 在上述条件满足后，计数器开始记数，“充电”时间为 15s。

清零条件：

- a. 重合闸停用。
  - b. 收到外部闭锁重合信号（如手动跳闸闭锁重合闸）。
  - c. 重合闸充电未满足时，收到启动信号。
  - d. 发出重合闸脉冲。
  - e. 重合闸在单重方式时保护三跳。
4. 沟通三跳。

由于重合闸装置的原因，由重合闸装置输出沟通三跳空触点，连到各保护装置的开入端实现任何故障三跳。

输出沟通三跳的条件：

- a. 重合方式为三相重合或停用。
  - b. 重合装置出现致命错误或装置掉电。
  - c. 重合闸充电未满足。
4. 重合逻辑
- a. 三相重合闸时，可以选用检无压重合闸或检同期重合闸。
  - b. 检线路无压重合闸：线路电压  $U_L$  小于  $0.3U_N$ ，无压条件满足。
  - c. 检同期重合闸时：线路电压  $U_L$  大于  $0.7U_N$ ，且同期角度（线路电压和母线电压相位差）在整定范围内。

d. 当合闸压力不足时，若重合闸未启动，延时 200ms 放电并闭锁重合闸；当合闸压力不足，在 200ms 内若重合闸启动则闭锁放电回路。

## 6. 告警

开关在闭合状态，当无启动，检无压抽取的电压低于无压定值，另一侧的 PT 有电压，报 PT 断线。经短延时告警，闭锁重合闸。

当无启动，检同期，有电流流过，同期条件不满足，告警，闭锁重合闸。

自检告警，开入、出检查告警。

## 7. 闭锁重合闸

当有外部闭锁重合闸开入和保护装置检测到系统发生的是严重故障时，闭锁重合闸。

## 6.10 后加速

### 1. 后加速条件:

重合闸“后加速允许”继电器动作,且有“后加速功能允许”开关量投入。后加速保护在 TWJ 由跳位变为合位的开始 400ms 时间内投入。

### 2. 后加速判据

#### a. 合闸于不对称故障

合闸于不对称故障,用以下判据:

$$|U_2 - 1.25Z_L I_2| + |U_0 - 1.25Z_{0L} I_0| > 0.5U_n \quad (\text{式 6.16})$$

其中:  $Z_L$  为线路全长阻抗,  $Z_{0L}$  为线路全长零序阻抗。在满足上式的同时,零序和负序的方向条件也必须满足,即下式成立:

$$|U_0 - 1.25Z_{0L} I_0| > |U_0 + 1.25Z_{0L} I_0| \quad (\text{式 6.17})$$

$$|U_2 - 1.25Z_2 I_2| > |U_2 + 1.25Z_2 I_2| \quad (\text{式 6.18})$$

若手动合闸,则还需进行故障相判别;若保护启动重合闸,则不再进行选相判断。

#### b. 合闸于对称故障

对于合闸于对称故障,采用电流速断保护和距离保护相配合,其动作判据要求同时满足以下两个条件:

$$I_\phi > I_{set} \quad (\text{式 6.19})$$

$$U_\phi < 1.5Z_L I_\phi \quad (\text{式 6.20})$$

其中:  $I_{set}$  为启动电流,按在末端最小三相短路电流下有足够的灵敏度整定。

当后加速投入,且上述两个条件之一满足,设后加速标志。

### 3. 后加速逻辑

无振荡标志 & 有加速标志 & 控制字投入该段加速、加速后出口永跳。

距离二段(相间、单相距离)动作,满足上述条件,瞬时加速二段。

## 6.11 PT、CT 断线检测

装置设有两种检测 PT 断线的判据,两种判据都带有延时,且仅在线路正常运行,在启动元件不启动的条件下投入,一旦启动元件启动,PT 断线检测立即停止,直到整组复归后重新投入。

#### a. 三相电压之和不为零,用于检测一相或两相断线。

$$|\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C| > 8V \quad (\text{式 6.21})$$

当上式成立,延时 1.3s 报 PT 断线。

## b. 三相失压检测

正序电压值低于 6V 且任一相有电流 ( $I_{\phi} > 0.1I_N$ ), 延时 1.3s 报 PT 断线。

三相电压有效值均低于 8V, 或三相电压绝对值之和小于 0.5V, 开关在合位, 且跳闸位置继电器不动作, 延时 1.3s 报 PT 断线。

装置检测 CT 断线的判据: 有零序电压但无零序电流, 延时判断 CT 断线。

## 6.12 事件纪录

### 1. 启动报告

保护启动后, 记录启动报告, 包括三相电流、电压、零序电流、电压。

### 2. 装置运行记录

包括保护投入运行、整定退出保护、调试退出保护、掉电退出保护、装置上电、装置掉电、就地信号复归、远方信号复归、就地修改定值、远方修改定值等。

### 3. 故障报告

保护动作后记录动作报告, 包括故障前后 8 周波的采样数据, 动作内容、定值、实测值和动作时间等。

### 4. 软件编程可视化

当保护动作后, 记录下保护动作的流程, 利用提供的事后分析软件可以便于事故追忆, 复现。

### 5. 重合闸报告

记录启动重合条件, 重合延时, 闭锁信号情况、开关变位信号等。

## 6.13 本章小结

本章设计了以 DSP 为硬件平台的一套超高压线路保护装置的后备保护方案, 该方案的保护范围无死区, 躲负荷能力强, 适应非全相运行并易于现场运行人员理解掌握。

## 7 全文总结

随着电力工业的发展,大量的超高压甚至特高压线路将会在电网中运行,适应新形势的超高压线路保护的研究迫在眉睫。本论文围绕设计和构成一套高性能的超高压线路后备保护装置这一课题,研究了超高压输电线路后备距离保护中存在的主要问题——分析和改善反映接地故障距离继电器的动作特性。本文在这一问题上的主要研究内容和成果有:

改善接地距离继电器的动作特性主要是要在提高接地距离继电器耐受过渡电阻能力的同时克服区外稳态超越,并且保证当保护应用于平行双回线时,另一回线故障时本线距离继电器不会误动作。为此,结合距离继电器的两种分析方法——相量推导的方法和数字仿真分析的方法,对目前在市场上占主流地位的接地距离保护方案和近年来提出的一些新方案进行了仿真研究,发现性能比较稳定的继电器是多相补偿接地距离继电器、四边形特性接地距离继电器和故障分量阻抗继电器,但这些继电器的耐受过渡电阻能力有限;而 $I_0$ 极化接地距离继电器、双下偏 $I_0$ 极化接地距离继电器、故障分量电抗继电器虽然都具有很高的灵敏度,耐受过渡电阻能力很强,但是它们都有各种误动的情况出现,使用的时候要加上其它的辅助元件。根据仿真分析的结论,将多相补偿接地距离继电器和 $I_0$ 极化接地距离继电器的优点结合起来,提出了一种距离保护的新方案。该方案具有较强的耐受过渡电阻能力,与方向元件和零序电流门槛配合使用,能够正确反映平行双回线故障,可以克服区外稳态超越现象。

在对距离继电器的研究过程中,作者利用当今主流的软件开发工具 MFC 和 VC++6.0 开发了 TRCP 仿真分析软件。该软件建立了更符合实际情况的 500kV 系统模型,按照“改进直接法”的原理反复修改过渡电阻,并调用电磁暂态程序 EMTP-ATP 进行稳态故障计算来确定继电器的动作情况,从而求出某个故障点的临界直接电阻。综合全网络所有故障点的计算结果,TRCP 绘制某种继电器在本网络中的支接电阻动作特性曲线,并且能根据需要画出所有中间计算结果的相量图。采用此仿真软件进行距离继电器的静态特性分析,网络结构具有一般性,故障计算准确可靠,仿真结果具有说服力。

最后,设计了以 DSP 为硬件平台的一套超高压线路保护装置的后备保护方案。

## 致谢

埋首撰写论文一月有余，行文至此，已是离别的季节。

最为留念的是在陈德树教授指导下的求学时光。陈老师言传身教，独有的人格魅力让我明白“科学家”这三个字的含义。

尹项根教授颇具大师风范，高屋建瓴，总揽全局，启发性的指导时常让人耳目一新。

张哲教授扎实的专业功底和严谨的治学态度给我留下了深刻的印象。

向以上三位老师表示弟子最衷心的感谢！

论文还得到了李岩博士、胡玉峰博士、骆新硕士的特别指点，以及课题组全体同学的帮助，在此一并表示感谢！

感谢李剑，停驻飘泊的心，携手风雨人生路。

最后谨以此文献给我的家人和朋友。



## 参考文献

- [1] 郑美特, 全国联网和大区形成主干网架的研究, 电网技术, 1999.1
- [2] 万启发, 二十一世纪我国的特高压输电, 高电压技术, 2000.6
- [3] P. G. McLaren et al., Sampling Techniques Applied to the Derivation Letter, Vol. 1. No. 1, 1965
- [4] I. F. Morrison, Prospects of on-line Computer Control in Trans., IE Australia, Vol. EE13, No.2, September 1997, pp. 234~236
- [5] G. D. Rockefeller, Fault Protection with a Digital Computer. IEEE Trans., Vol. PAS-88, No.4, 1969, pp. 438~464
- [6] B. J. Mann, I. F. Morrison, Digital Calculation of Impedance for Transmission Line Protection, IEEE Trans., Vol. 90, No.1, Jan./Feb., 1971, pp. 270~279
- [7] G. B. Gilcrest, G. D. Rockefeller, E. A. Udren, High-Speed Distance Relaying Using a Digital Computer, Part. I: System Description, IEEE Trans., Vol.91, No.3, May/June, 1972, pp.1235~1243
- [8] G. B. Gilcrest, G. D. Rockefeller, E. A. Udren, High-Speed Distance Relaying Using a Digital Computer, Part. II: Test Results, IEEE Trans., Vol.91, No.3, May/June, 1972, pp.1244~1258
- [9] P. G. McLaren, M. A. Redfern, Fourier-Series Techniques Applied to Distance Protection, (Dept. of Engng., Univ. of Cambridge, Cambridge, England). Proc. Inst. Electr. Eng. (GB), Vol.122, No.11, pp1301~1305
- [10] M. S. Sachdev and D. W. Wind, Generator Differential Protection Using a Hybrid Computer: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-92, No.6, Nov./Dec. 1973, pp.2063~2072
- [11] Phadke A. G. et al. Computers in EHV substation, programming considerations and operating experience. CIGRE Study Committee No.34 Colloquium, Philadelphia,1975
- [12] Malik O. P. et al, Digital protection of a power transformer. IEEE Publication 76CH1075-1 PWR Paper No.A76 191-7, IEEE PES Winter Meeting, New York,

1976

- [13] B. D. Russell, Microprocessor Applications of Intersect to Substation Protection Engineers, IEEE Committee Report, Paper No.A-77746-1, IEEE PES Summer Meeting, Mexico City, July 1977
- [14] 杨奇逊, 计算机继电保护的发展和应用的若干问题, 电力系统自动化, 1983.3
- [15] 陈德树, 计算机继电保护原理与技术, 中国电力出版社, 1992
- [16] 朱声石, 高压电网继电保护原理与技术, 第二版 中国电力出版社, 1995
- [17] 朱声石, 接地距离继电器之研究, 电力系统自动化, No.4, 1977
- [18] 俞鸣元, 多相补偿接地距离继电器动作特性的分析与计算, 电力系统自动化 No.6, 1981
- [19] 沈国荣, 综合比相式新型接地与相间距离继电器, 电力系统自动化, No.5, 1989
- [20] 隋风海等, 论突变量距离继电器, 电力系统自动化, No.11, 1995
- [21] Q. S. Yang and I. F. Morrison, Microprocessor-based Algorithm for High Resistance Earth-fault Distance Protection, IEE PROCEEDINGS, Vol.130, Pt.C, No.6, 1983, pp306~310
- [22] 杨奇逊主编, 微型机继电保护基础, 水利电力出版社, 1988
- [23] 文安、叶一麟, 一种能承受高接地电阻地微机接地距离保护新算法, 中国电机工程学报, No.6, 1988
- [24] 彭华, 全线相继速动微机距离保护装置研究, 华中工学院硕士论文, 1988
- [25] 叶萍 陈德树. 一种能克服  $I_0$  极化接地距离继电器区外稳态超越问题的新方案, 中国电机工程学报, Vol.15, No.3
- [26] 沈国荣, 高压电网超高速继电保护技术的最新成就, 中国电力, No.11, 1996
- [27] P. A. Crossley, P. G. McLaren, Distance Protection Based on Traveling Waves, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-102, No.9, Sep.1983, pp2971-2983
- [28] T. Johns, Z. Bo, R. K. Aggarwal, A Novel Non-Unit Protection Scheme Based on Fault Generated High Frequency Noise on Transmission Lines, 5 th Int.Conf.on Developments in Power system Protection, IEE Pub.No.368, 1993, pp65-68
- [29] 沈国荣, 工频变化量方向继电器原理的研究, 电力系统自动化, 1983.1
- [30] Shen Guorong Study on Ultra-High Speed Distance Relay for EHV Power System,

- IEEE/CSEE Joint Conference on High-Voltage Transmission Systems in China, 1987
- [31] 葛耀中 自适应继电保护及其前景展望 电力系统自动化 1997.9
- [32] 张之哲、陈德树 自适应式微机距离保护理论基础的研究 中国电机工程学报, 第6卷第2期, 1986
- [33] G. D. Rockefeller et al., Adaptive Transmission Relaying Concepts for Improved Performance, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.3, No.4, 1988, pp1446-1458
- [34] Y. Q. Xia et al., Adaptive Relay Setting for Stand-alone Digital Distance Protection, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, No.1, 1994, pp480-491
- [35] 张之哲、陈德树, 微型计算机距离保护中的自适应对策, 中国电机工程学报, 第8卷第3期, 1988
- [36] Yi Hu, Damir Novosel, Murari Mohan Saha et al., An Adaptive Scheme for Parallel-Line Distance Protection, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 1, January 2002
- [37] S. Jamali, A Fast Adaptive Digital Distance Protection, Developments in Power System Protection, Conference Publication No.479, IEE 2001, pp149-152
- [38] Wiszniewski, B. K. Fuzzy Set Approach to Transformer Differential Relay, 5th Int. Conf. on Development in Power System Protection and Local Control, 1994, Beijing
- [39] Wiszniewski. A Multi-criteria Differential Transformer Relay Based on Fuzzy Logic, IEEE Trans. PWRD, 1995, 10(4)
- [40] Ramachandran Vendatesan, A Real-Time Hardware Fault Detector Using an Artificial Neural Network for Distance Protection, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 1, January 2001
- [41] Y L Li, B Li, X H Zhang et al., An ANN-Based Distance Protective Relays of Transmission Lines, Developments in Power System Protection, Conference Publication No. 479, IEE 2001, pp311-314
- [42] P. K. Dash, A. K. Pradhan, and G. Panda, Application of Minimal Radial Basis Function Neural Network to Distance Protection, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 1, January 2001
-

- [43] 林湘宁, 微机保护新原理的小波理论应用研究, 博士学位论文, 华中理工大学, 1999
- [44] P. G. McLaren, Mustaphi, G. Benmouyal, S. Chano et al., Software Models for Relays, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001
- [45] Dierks, D. Kehrberg, New Algorithms to Test Distance Relays, Developments in Power System Protection, Conference Publication No. 479, IEE 2001, pp205-208
- [46] Chul-Hwan Kim, Myung-Hee Lee, Raj K. Aggarwal et al., Educational Use of EMTP Models for the Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, February 2000
- [47] P. A. Crossley, H. Y. Li, A. D. Parker, Design and Evaluation of a Circulating Current Differential Relay Test System, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April 1998
- [48] 陈德树, TRCP(d)-1 程序及应用, 全国高校电自专业第一届学术年会, 1985
- [49] 叶萍, 微机型高压输电线路保护新原理的研究, 华中理工大学博士学位论文, 1996
- [50] 文明浩, 超高压线路保护能量平衡原理及有关问题的研究, 华中理工大学博士学位论文, 2000
- [51] 侯俊杰, 深入浅出 MFC, 第二版, 华中科技大学出版社, 2001
- [52] David J. Kruglinski, Scot Wingo, George Shepherd, Programming Visual C++ 6.0, 北京希望电子出版社, 1999
- [53] Jeffrey Richter, Advanced Windows, 3<sup>rd</sup> Edition, 清华大学出版社, 1999
- [54] Xing Yibao, Sui Fenghai, Zhu Shengshi, Fault Component Reactance Relay, International Conference on Power System Technology, CSEE, 1991, pp 678~682

## 附录一

### 作者在攻读硕士学位期间所发表的主要论文

- [1] 詹奕, 尹项根, 高压直流输电与特高压交流输电的比较研究, 高电压技术, 2001年第4期
- [2] 詹奕, 李岩, 胡玉峰, 陈德树, 张哲, 一种基于EMTP稳态计算的距离继电器静态动作特性分析方法, 电力系统自动化, 已录用

## 附录二

### EMTP-ATP 系统模型文件

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW 十一月, 星期一 12, 2001
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Haldalen at SEFAS - NORWAY 1994-98
C -----
C Miscellaneous Data Card ....
C dT << Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-5   -0.1
      1     1     0     1     1     0     0     1     0
C      1     2     3     4     5     6     7     8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
51G1A  X1A          .6394   31.7777
52G1B  X1B          .1161   -0.02585 .6394   31.7777
53G1C  X1C          .1161   -0.02585 .1161   -0.02585 .6394   31.7777
-1LOA  L1A          .1948   5.4 .0051  15. 0 0
-2LOB  L1B          .027    .86 .011  15. 0 0
-3LOC  L1C          .1948   1.8 .0051  15. 0 0
-4NOA  N1A
-5NOB  N1B
-6NOC  N1C
-1L1A  L2A          .1948   5.4 .0051  15. 0 0
-2L1B  L2B          .027    .86 .011  15. 0 0
-3L1C  L2C          .1948   1.8 .0051  15. 0 0
-4N1A  N2A
-5N1B  N2B
-6N1C  N2C
-1L2A  L3A          .1948   5.4 .0051  15. 0 0
-2L2B  L3B          .027    .86 .011  15. 0 0
-3L2C  L3C          .1948   1.8 .0051  15. 0 0
-4N2A  N3A
-5N2B  N3B
-6N2C  N3C
-1L3A  L4A          .1948   5.4 .0051  15. 0 0
-2L3B  L4B          .027    .86 .011  15. 0 0
-3L3C  L4C          .1948   1.8 .0051  15. 0 0
-4N3A  N4A
-5N3B  N4B
-6N3C  N4C
-1L4A  L5A          .1948   5.4 .0051  15. 0 0
-2L4B  L5B          .027    .86 .011  15. 0 0
-3L4C  L5C          .1948   1.8 .0051  15. 0 0
-4N4A  N5A
  
```



# 华中科技大学硕士学位论文

-5N4B	N5B					0
-6N4C	N5C					0
-1L5A	L6A	.1948	5.4	.0051	15.00	0
-2L5B	L6B	.027	.86	.011	15.00	0
-3L5C	L6C	.1948	1.8	.0051	15.00	0
-4N5A	N6A					0
-5N5B	N6B					0
-6N5C	N6C					0
-1L6A	L7A	.1948	5.4	.0051	15.00	0
-2L6B	L7B	.027	.86	.011	15.00	0
-3L6C	L7C	.1948	1.8	.0051	15.00	0
-4N6A	N7A					0
-5N6B	N7B					0
-6N6C	N7C					0
-1L7A	L8A	.1948	5.4	.0051	15.00	0
-2L7B	L8B	.027	.86	.011	15.00	0
-3L7C	L8C	.1948	1.8	.0051	15.00	0
-4N7A	N8A					0
-5N7B	N8B					0
-6N7C	N8C					0
-1L8A	L9A	.1948	5.4	.0051	15.00	0
-2L8B	L9B	.027	.86	.011	15.00	0
-3L8C	L9C	.1948	1.8	.0051	15.00	0
-4N8A	N9A					0
-5N8B	N9B					0
-6N8C	N9C					0
-1L9A	L10A	.1948	5.4	.0051	15.00	0
-2L9B	L10B	.027	.86	.011	15.00	0
-3L9C	L10C	.1948	1.8	.0051	15.00	0
-4N9A	N10A					0
-5N9B	N10B					0
-6N9C	N10C					0
-1L10A	L11A	.1948	5.4	.0051	15.00	0
-2L10B	L11B	.027	.86	.011	15.00	0
-3L10C	L11C	.1948	1.8	.0051	15.00	0
-4N10A	N11A					0
-5N10B	N11B					0
-6N10C	N11C					0
-1L11A	L12A	.1948	5.4	.0051	15.00	0
-2L11B	L12B	.027	.86	.011	15.00	0
-3L11C	L12C	.1948	1.8	.0051	15.00	0
-4N11A	N12A					0
-5N11B	N12B					0
-6N11C	N12C					0
-1L12A	L13A	.1948	5.4	.0051	15.00	0
-2L12B	L13B	.027	.86	.011	15.00	0
-3L12C	L13C	.1948	1.8	.0051	15.00	0
-4N12A	N13A					0
-5N12B	N13B					0
-6N12C	N13C					0
-1L13A	L14A	.1948	5.4	.0051	15.00	0
-2L13B	L14B	.027	.86	.011	15.00	0
-3L13C	L14C	.1948	1.8	.0051	15.00	0
-4N13A	N14A					0
-5N13B	N14B					0

# 华中科技大学硕士学位论文

-6N13C	N14C							0
-1L14A	L15A	.1948	5.4	.0051	15.	0	0	0
-2L14B	L15B	.027	.86	.011	15.	0	0	0
-3L14C	L15C	.1948	1.8	.0051	15.	0	0	0
-4N14A	N15A							0
-5N14B	N15B							0
-6N14C	N15C							0
-1L15A	L16A	.1948	5.4	.0051	15.	0	0	0
-2L15B	L16B	.027	.86	.011	15.	0	0	0
-3L15C	L16C	.1948	1.8	.0051	15.	0	0	0
-4N15A	N16A							0
-5N15B	N16B							0
-6N15C	N16C							0
-1L16A	L17A	.1948	5.4	.0051	15.	0	0	0
-2L16B	L17B	.027	.86	.011	15.	0	0	0
-3L16C	L17C	.1948	1.8	.0051	15.	0	0	0
-4N16A	N17A							0
-5N16B	N17B							0
-6N16C	N17C							0
-1L17A	L18A	.1948	5.4	.0051	15.	0	0	0
-2L17B	L18B	.027	.86	.011	15.	0	0	0
-3L17C	L18C	.1948	1.8	.0051	15.	0	0	0
-4N17A	N18A							0
-5N17B	N18B							0
-6N17C	N18C							0
-1L18A	L19A	.1948	5.4	.0051	15.	0	0	0
-2L18B	L19B	.027	.86	.011	15.	0	0	0
-3L18C	L19C	.1948	1.8	.0051	15.	0	0	0
-4N18A	N19A							0
-5N18B	N19B							0
-6N18C	N19C							0
-1L19A	L20A	.1948	5.4	.0051	15.	0	0	0
-2L19B	L20B	.027	.86	.011	15.	0	0	0
-3L19C	L20C	.1948	1.8	.0051	15.	0	0	0
-4N19A	N20A							0
-5N19B	N20B							0
-6N19C	N20C							0
51G2A	X2A	.6394	31.	.7777				
52G2B	X2B	.1161	-0.02585	.6394	31.	.7777		
53G2C	X2C	.1161	-0.02585	.1161	-0.02585	.6394	31.	.7777
51G3A	X3A	.6394	31.	.7777				
52G3B	X3B	.1161	-0.02585	.6394	31.	.7777		
53G3C	X3C	.1161	-0.02585	.1161	-0.02585	.6394	31.	.7777
-1A0A	A1A	.1948	2.4	.0071	60.	0	0	0
-2A0B	A1B	.027	.86	.0123	60.	0	0	0
-3A0C	A1C							0
-1A1A	A2A	.1948	2.4	.0071	60.	0	0	0
-2A1B	A2B	.027	.86	.0123	60.	0	0	0
-3A1C	A2C							0
-1B0A	B1A	.1948	2.4	.0071	60.	0	0	0
-2B0B	B1B	.027	.86	.0123	60.	0	0	0
-3B0C	B1C							0
-1B1A	B2A	.1948	2.4	.0071	60.	0	0	0
-2B1B	B2B	.027	.86	.0123	60.	0	0	0
-3B1C	B2C							0

# 华中科技大学硕士学位论文

-1B2A	B3A	.1948	2.4	.0071	60.000	0
-2B2B	B3B	.027	.86	.0123	60.000	0
-3B2C	B3C					0
-1C3A	C2A	.1948	2.4	.0071	60.000	0
-2C3B	C2B	.027	.86	.0123	60.000	0
-3C3C	C2C					0
-1C2A	C1A	.1948	2.4	.0071	60.000	0
-2C2B	C1B	.027	.86	.0123	60.000	0
-3C2C	C1C					0
-1C1A	C0A	.1948	2.4	.0071	60.000	0
-2C1B	C0B	.027	.86	.0123	60.000	0
-3C1C	C0C					0
TRANSFORMER			T40A	1.E12		0
9999						
1T41A	T41C	.00071	.1572	23.		
2T42A		.406	89.91	318.		
TRANSFORMER T40A			T40B			
1T41B	T41A					
2T42B						
TRANSFORMER T40A			T40C			
1T41C	T41B					
2T42C						
-1A2A	A3A	.1948	2.4	.0071	60.000	0
-2A2B	A3B	.027	.86	.0123	60.000	0
-3A2C	A3C					0
NRB	NOB	1.E-5				0
NRC	NOC	1.E-5				0
NRA	NOA	1.E-5				0
SW0	SW1	1.E-5				0
/SWITCH						
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >						
X1A	LOA	-1.	5.	0.		0
X1B	LOB	-1.	5.	0.		0
X1C	LOC	-1.	5.	0.		0
X1A	K0A	-1.	5.	0.		0
X1B	K0B	-1.	5.	0.		0
X1C	K0C	-1.	5.	0.		0
L20A	X2A	-1.	5.	0.		0
L20B	X2B	-1.	5.	0.		0
L20C	X2C	-1.	5.	0.		0
K3A	X2A	-1.	5.	0.		0
K3B	X2B	-1.	5.	0.		0
K3C	X2C	-1.	5.	0.		0
X2A	A0A	-1.	5.	0.		0
X2B	A0B	-1.	5.	0.		0
X2C	A0C	-1.	5.	0.		0
X2A	B0A	-1.	5.	0.		0
X2B	B0B	-1.	5.	0.		0
X2C	B0C	-1.	5.	0.		0
T42A	B3A	-1.	5.	0.		0
T42B	B3B	-1.	5.	0.		0
T42C	B3C	-1.	5.	0.		0
T42A	C3A	-1.	5.	0.		0
T42B	C3B	-1.	5.	0.		0
T42C	C3C	-1.	5.	0.		0

# 华中科技大学硕士学位论文

```

COA X3A      -1.    5.                0
COB X3B      -1.    5.                0
COC X3C      -1.    5.                0
A3A X3A      -1.    5.                0
A3B X3B      -1.    5.                0
A3C X3C      -1.    5.                0
KOA NOA                MEASURING      1
KOB NOB                MEASURING      1
KOC NOC                MEASURING      1
K3A N20A             MEASURING      1
K3B N20B             MEASURING      1
K3C N20C             MEASURING      1
SW1 NRC             1.    5.    0.        0
SW1 NRB             1.    5.    0.        0
SW1 NRA             1.    5.    0.        0
      SW0             1.    5.    0.        0
/SOURCE
C < n l><< Ampl. >> Freq. >>Phase/T0>> A1 >> T1 >> TSTART >> TSTOP >
14G1A  0 408248.3    50.    60.                -1.    10.
14G1B  0 408248.3    50.   -60.                -1.    10.
14G1C  0 408248.3    50.   180.                -1.    10.
14G2A  0 408248.3    50.                -1.    10.
14G2B  0 408248.3    50.   -120.               -1.    10.
14G2C  0 408248.3    50.    120.                -1.    10.
14G3A  0 408248.3    50.    30.                 -1.    10.
14G3B  0 408248.3    50.   -90.                -1.    10.
14G3C  0 408248.3    50.   150.                -1.    10.
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
      NOA  NOB  NOC  K3A  K3B  K3C  G1A  G1B  G1C  X1A  X1B  X1C  T42A
      T42B T42C T41A T41B T41C X3A  X3B  X3C  G3A  G3B  G3C  X2A  X2B
      X2C  G2A  G2B  G2C
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```