

THE RESEARCH OF DIFFERENTIAL PROTECTION ALGORITHM BASED ON INCREMENTAL CURRENT

Abstract

Current differential protection is one of the most important developed directions of line main protection. It has many virtues which other protections don't have. With the development of computer and communicate technology, and the drop of communicate equipment charge, the restrict of current differential protection on high voltage transmission line is little. The advantage of current differential protection is more important. With relay protection entering the microcomputer times, more research of current differential protection has new actual meanings. In fact, it becomes research hotspot again. This paper aims at the research direction; profound studies the current differential protection of two different principles and puts forward shunt current coefficient method, and validates different criterions.

This paper first analyses the sensitivity and stability of full current protection and incremental current protection. Then it analyses the affect of load current and charge current between the two criterions on the line internal fault and external fault. Then it studies different criterions by shunt current coefficient method.

At last, the RTDS (Real Time Digital Simulator) is used as the simulator of this protection system. The simulated power system is build up in RTDS PC terminal. The paper simulates the sensitivity and stability of full current protection and incremental current protection and the affect of load current. The result of simulation shows that the proposed criterion has the perfect perform of internal fault and external fault conditions and the correctness of

previous theory analysis. So it has some use value.

Key Words : Full Current Differential Protection; Incremental Current Differential Protection; Load Current; Charge Current; Outflow current factor meth

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解广西大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

广西大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后遵守此规定）

作者签名：

边宁

导师签名：

日期：

日期：

第1章 绪论

1.1 课题的背景和研究意义

中国的电力网络迅速向着国家范围的互联发展。三峡、西电东送等大型工程也投入建设。随着各区域网络的互联，安全性和可靠性成为一个重要课题：系统的某个扰动可能造成大的停电事故。

当前的电力系统具有电网规模大、电压等级高和机组容量大的特点。为了最大限度地发挥电网的经济性，电力系统越来越多地运行在其稳定极限附近，这就要求一旦发生故障，继电保护装置能更快地切除故障^[1]。

当系统出现大范围的扰动，进而急剧影响电力系统的可靠性，引起居民、商业、工业用户的停电。历史上，大范围的扰动对社会产生巨大的损失。在2003年的8.14事件中，美国东北部失去大量负荷，从而影响到整个北美五大湖、纽约、新泽西州北和新英格兰的部分地区。在俄亥俄州，Perry核电站退出运行，主传输线也开始解列，也许是受频率波动的影响，接着又有十座核电站退出运行。这次大停电对美国 and 加拿大各个方面造成了巨大影响。美国的估计一天损失300亿美元，加拿大估计50亿美元^[2]。接着英国和意大利的大停电事故也引人注目。

由于发展电力系统互联能带来显著的效益，相邻地区甚至相邻国家电力系统互联是电力工业发展的一个趋势。电力系统互联，由于联系增强也带来了新问题。如故障会波及相邻系统，如果处理不当，严重情况下会导致大面积停电^{[3]-[8]}。

对这些大的系统扰动的研究表明继电保护与75%的大扰动相关。继电保护失灵如不能跳开故障线路或者误跳，可能引发大扰动。超高压线路的主保护是通讯继电器方案，它们使用方向、相位比较，或者纵差原理。在系统非正常条件时，保护系统的隐性故障也会引起继电器错误跳开非故障线路。

一个常见的事件就是在故障继电保护附近发生其他扰动。例如，近距

故障、过负荷，或者功率反相，系统远后备启动导致运行工况的恶化，严重时，可以引发系统范围的大停电事故。

要求后备保护能在主保护失效时清除故障，还必须考虑与其他继电保护的配合。总所周之，由后备保护动作隔离的区域要比主保护的大的多。后备保护由三段后备和过流保护构成。经国外学者 S.H.Horowitz, A.G.Phadke, J.S.Thorp 等人长期研究发现的现存继电保护中的 Hidden Failure 以及 Regions of Vulnerability and Index of Severity 所导致的保护误动作对于常规保护常常是致命性的^{[8]~[13]}。

电流差动保护是高压线路主保护的一个重要发展方向，主要有以下优点^[14]：1.能适应电力系统的振荡、非全相等各种复杂的运行状态；2.只需测量各端的电流值，不受 PT 断线的影响；3.具有天然的选相能力；4.它可以适应各种拓扑结构复杂的电力网络，如具有 T 型分支的输电线路；5.电流差动保护的灵敏度高，几乎可以实现全线路保护。传统的电流差动保护主要有两点不足，一是内部故障时其动作特性受负荷电流的影响，二是高压、超高压的长距离线路的分布电容会影响电流差动判据的准确性。微机保护的引入是电流差动保护来扬长避短的好途径，因此，深入研究电流差动保护的特性具有重要的现实意义。

1.2 电流差动保护的历史与现状

电流差动保护由于其原理简单可靠而被广泛地用作电力系统的发电机、变压器、母线和大型电动机等元件的主保护。电流差动保护原理在电力线路上的应用，最早就是传统的导引线保护。它可作为高、中压电网中的短距离线路的全线速动主保护。

电力传输线路的主保护开始广泛的使用电流差动保护。电力系统结构日趋复杂，长线路和短线路都连接到一条母线上。这对继电保护工作者又提出了距离保护的动作区间和动作时间的配合问题。电流差动保护为变压器、发电机和母线提供了一种有效的保护。当用于传输线时，这就出现了一个问题：由于线路两端的间隔，必须有通讯通道。电力通信一般使用 PLC、微波、通信电缆和光纤。

随着通信技术的迅速发展，特别是光纤通信技术，电力系统逐步开始保护控制一体化进程。我们可以预计：在不远的将来，基于光纤通信的后备保护将会广泛使用。因此现在我们有必要对此进行研究，从而能够为电力系统提供一种新的后备保护。

在人们使用单端量无法快速切除线路上任一点的故障时，自然地考虑从双端量寻找途径解决这个问题。电流纵差保护的原理是在1904年由C. H. Merz和B. Price在英国提出的，已经有约100年的历史。由于其原理简单可靠，而被广泛地用作电力系统的发电机、变压器、母线和大型电动机等元件的主保护。电流差动保护原理在电力线路上的应用，最早就是传统的导引线保护。由于存在以下两个原因，使其只能应用在二十公里以内的短线上：（1）随着线路长度的增加，一方面投资剧增，另一方面导引线分布参数将会造成保护的不正确动作；（2）输电线中负荷、故障电流和雷电等通过电磁感应引起的过电压，以及接地故障电流流过本侧大地时引起的地电位升高问题将严重影响保护的安全性和可靠性。

随着电力系统的不断发展，超高压输电线路的不断增加，系统网络越来越复杂（如分支线、平行双回线、环网），同时，通信事业不断发展，这使得电流纵差保护的应用越来越广泛。尤其是微波通信技术和光纤通信技术的发展及其在电力系统通信中的广泛应用，又先后出现了输电线路的微波电流纵差保护和光纤电流纵差保护。

在五十年代，为了克服导引线电流纵差保护应用的局限性，美国开始研究频率调制方式（FM）微波电流差动保护，它是将线路各端电流信号经音频调制后由微波通道进行传送的，因而可保护的线路不再局限于短线路，而且还适合于多端线路，可构成分相电流差动保护。但它仍存在以下问题：

（1）为消除通信过程中噪音信号的影响需增设额外监视通道，增加了保护的复杂程度和投资；

（2）应用于多端线路或实现分相差动时需要过多的通道；

（3）通道延时和信号衰落的不固定将严重影响保护的动作性能[15],[16]。在我国，也较早开展了这方面的研究。

70年代主要是研究采用频率调制方式的模拟式电流差动微波保护^[4]进入80年代,日本最先采用脉冲编码调制(PCM)方式的数字式电流纵差微波保护^{[17]-[19]}。80年代末,英国GEC公司和ABB公司也相继研制出这类保护。我国于80年代末开始研制数字式电流纵差微波保护。第一套可用于长距离输电线路的数字式电流纵差微波保护WXH-14型高压线路微波电流纵差保护装置,于1994年完成,并通过鉴定。由于光纤通信在电力通信系统的应用较少,需为电流纵差保护配设专用光缆^[20],所以,光纤电流纵差保护原先多用于短距离输电线路。由于电力通信及其它诸多原因,我国高压输电线路的主保护仍然是传统的高频保护占主导地位,微波和光纤电流纵差保护在我国电力系统继电保护中的实际应用一直非常少。投入运行的电流差动保护装置基本上是国外公司如日本东芝公司、英国GEC公司和ABB公司的数字电流差动保护装置。在国外,数字式电流差动保护的应用较多,尤其在英国和日本,数字式电流差动保护是输电线路主保护中应用最多的保护。

在国外,数字式电流差动保护的应用较多,尤其是在英国和日本,数字式电流差动保护是输电线路主保护中应用最多的保护;在其它国家也有应用。随着通信技术的向前发展和光纤等通信设备的成本下降,近几年,我国的通信发展很快,电力通信系统中也在逐步应用光纤通信。不少地方已经引进了日本东芝公司、英国GEC公司和ABB公司的数字电流差动保护装置。这些装置可用于数字微波或光纤通信系统、以及短距离的专用光纤通道上^[20]。

1.3 电流差动保护的分类

输电线路纵联差动保护按照所利用的通道类型不同,可以分为导引线纵联保护、电力载波纵联保护、微波纵联保护和光纤纵联保护4种,通常纵联保护也按此命名。它们各自的特点可以简述如下:

(1) 导引线纵联保护(简称导引线保护)

需要铺设电缆,当线路较长(超过十余公里)时显得不经济,且线路故障引起的过电压会使保护安全性降低。并且导引线的电缆必须有足够的绝缘水平,从而使投资增大。导引线直接传输交流电量,对差动保护原理的

实现提供了便利,但导引线的参数直接影响保护的性能,从而在技术上也限制了导引线保护用于较长的线路。

(2) 电力线载波纵联保护(简称载波保护)

载波通道由高压输电线及其加工和连接设备组成,在保护中应用最广泛。高压输电线机械强度大,安全可靠性高。但是,这是在线路发生故障时通道可能遭到破坏(高频信号衰减增大),为此载波保护在利用高频信号时应使保护在本线故障信号中断的情况下仍能正确动作。

(3) 微波纵联保护(简称微波保护)

微波通道与输电线没有直接的联系。微波通道是一种多路通信系统,可以提供足够的通道,彻底解决通道的拥挤问题。微波通信具有很宽的频带,线路故障时不会影响信号系统,信号不会中断,并可以传送交流电流的波形。采用脉冲编码调制(PCM)方式可以进一步扩大信息传输量,提高抗干扰能力,也更适合于数字保护。微波通信是较为理想的通信系统,但是目前状况下,为保护架设专用微波通信设备不经济,而是与通信、远动等共用。另外,微波通信也会受到气候、地形等因素的影响。

(4) 光纤纵联保护(简称光纤保护)

光纤通道与微波通道有相同的特点,也广泛的采用PCM调制方式。利用光纤通道,更有以下特点:(a)传输容量大,速率高;(b)传输损耗小,中继距离长;(c)抗干扰能力强,安全可靠性高;(d)体积小,重量轻,结构简单,耐腐蚀等。另外,由于光与电之间互不干扰,所以光纤保护没有导引线保护的那些问题。如果光纤与微波通信结合应用,可以达到事半功倍的效果。最近发展的在架空输电线的接地线中架设光纤的方法既经济又安全,很有发展前途。

1.4 本文研究的主要内容

本课题具体保护对象为输电线路。线路保护一般采用距离保护。距离保护具有易于使用,便于整定配合,动作快,较少受系统条件变化的影响。然而,在高阻接地故障、过负荷、串联补偿线路等条件下,将会拒动或误动。而电流差动保护通过对保护装置两端的差分电流的比较来判别故障。

它对内部故障具有很好的灵敏性，对外部故障具有很好的稳定性。

本文首先对全电流差动保护判据和基于故障分量的电流差动保护的判据的灵敏度和稳定性进行了研究，并且详细分析了基于故障分量的电流差动保护判据。而且分析了负荷电流和充电电流对这两种保护判据在输电线路区内故障和区外故障时的影响。然后运用分流电流系数分析法，对各种不同的判据进行的研究。

差动保护判据是电流差动保护的根本问题。本文提出的分流电流系数法对国内外现有的主要电流差动保护判据进行了总结、比较，并且详细分析了各种判据的灵敏度和稳定性。对该方法从理论上分析后，给出了翔实的仿真试验结果。通过对该方法的分析，可以得知，外部故障的稳定性随着 K_2 的增大而增大，内部故障的灵敏度随着 K_1 的减小而增大。

最后利用实时数字仿真器RTDS (Real Time Digital Simulator) 对全电流差动保护和基于故障分量的差动保护判据的灵敏度和稳定性进行了仿真，并仿真了负荷电流对判据的影响。

第2章 电流差动保护的原理

差动保护中线路各端保护装置把本端测量到的电流波形或电流相位信号传送到线路别端，线路各端的保护装置根据自己测量的电流信号和别的线路端传送过来的电流信号来判断故障所在的位置，从而决定是否动作。这种保护是直接比较线路各端的电流电气量，所以称为差动纵联保护。

差动保护的原理在于：在正常条件时，在每个节点流入线路的每相电流之和等于该相的充电电流。如果该和超过了预先设定的整定值，故障为区内故障。

本章首先介绍了全电流差动保护，在第二节具体介绍了故障分量差动保护，给出了突变量的定义、动作判据及如何提取，为后续章节的比较分析提供基础。电流差动保护判据仅需测量被保护线路的各端电流，测量简单方便，同其它需要电压的线路保护判据相比，具有不受PT断线影响的特点。因此，可以说，它更为简单可靠。电流差动保护判据，从根本上看，它是建立在基尔霍夫电流定律的基础之上的，因此，从理论上讲，它可以适应任何拓扑结构的复杂电力网络。

2.1 全电流差动保护

目前常用的数字式电流差动保护动作判据为

$$I_{diff} = |I_m + I_n| > I_{zd} \quad (2-1)$$

$$I_{op} > k_{rev} \frac{|I_m| + |I_n|}{2} = I_{rev} \quad (2-2)$$

式中： I_m 和 I_n 分别表示线路两侧 M 侧和 N 侧的电流瞬时采样值（在本文中如无特殊说明电流量均为瞬时采样值）； I_{zd} 为定值； k_{rev} 为制动系数（ $0 < k_{rev} \leq 1$ ）。

式(2-1)为辅助跳闸判据，主要用于防止线路空投或空载情况下装置因某种原因误起动(此时式(2-2)满足跳闸条件)，式(2-2)为主判据，两式同时满足时判断为区内故障。每相均按以上两式构成差动保护，则可保护所有相别的故障，并能实现分相跳闸。

常规的模拟式电流差动保护所采用的差电流是流入被保护设备的各支路电流值和，而不平衡量是一个随时间变化的正弦量，其中还包括一些各次的谐波。作为继电器的反应原理，可以是基于有效值的，也可以是基于平均值的。传统的基于相电流的电流差动保护，是将各支路电流的若干个采样值用于某种算法，例如全波傅立叶算法，半波傅立叶算法等方法，来计算出相应的基频分量的幅值相角，或虚实部，然后求出各支路电流的向量和，从而得出差动电流，带入保护判据中进行判断构成差动保护。在计算机继电保护的有效值计算方法中，故障时引起的非周期分量和谐波分量尽管衰减很快，但可能在较长时间内影响计算的准确性，即采用时间窗为一个周期的算法，若开始几个采样值中含较高的非基波分量，则将影响与这些采样值相关的各个周期的计算结果。如果要保证保护动作的可靠性，势必影响保护的動作速度。这类方法的主要问题在于，需要等待采集一定的采样值后，才能计算出其基频分量的幅值相角，即使采用短数据窗的算法，仍需要等待较长时间，不利于差动保护的速动作。而且由于谐波对基频分量的影响，在算法使用前应先对其进行较好的滤波，滤除高次及低次谐波分量。文献[22][23]针对相电流方法在时间速动性上的缺点，基于采样值原理的电流差动保护被逐渐广泛的应用在现实保护中来。若电流差动保护的動作判据按每一个采样值分别判断，则可以在原理上完全消除这种影响，有效地提高电流差动保护的動作速度与可靠性。

差动保护以其优越的性能在电力系统的保护中起到了重要的作用。电流纵差保护由于其原理简单、运行可靠、動作快速准确等优点，使其在变电站、发电机、电抗器等主设备保护中得到了广泛的应用，而且在高压、超高压线路中也普遍使用^{[24][25]}。

电流差动保护是根据被保护线路各端同名相电流向量和的大小来判断内部或外部故障的，它是构成快速動作保护的主要原理之一，其性能主要取决于它所使用的動作判据^[26]。任何一个判据应该是在区内故障时，保护灵敏可靠的動作，而在区外故障时，应该可靠不误动。全电流差动保护的主要缺点是为提高重负荷情况下保护过渡电阻的能力，不得不降低制动系数 K ，同时也就降低了区外故障时的防卫能力^[27]。

2.2 故障分量差动保护

故障信息的识别、处理和利用是继电保护技术发展的基础。为了切除系统中发生故障的元件,本世纪20年代已经提出了电流差动、电流方向、距离和高频保护等一系列继电保护原理,迄今在保护基本原理方面没有新的突破。在电力系统不断对继电保护提出新要求条件下,30年代以来,在继电保护中广泛而成功的应用了故障时出现的对称分量。由于传统的继电保护原理是建立在工频电气量的基础上的,故障暂态过程所产生的有用信息被视为有害的干扰而常常被滤掉。60年代以来,开展了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。

基于突变量的继电保护原理由于具有原理简单、实现算法容易以及灵敏度高,且不受系统振荡、正常运行时系统负荷以及非全相运行等因素影响的特性,在继电保护领域中得到大量的应用^[28]。

2.2.1 突变量的定义

从继电保护技术的特点来看,故障信息可分为内部故障信息和外部故障信息两类。这两类信息是继电保护原理的根本根据,既可单独使用一类信息,也可联合使用两类信息。内部故障信息用于切除故障设备,外部信息用于防止切除非故障设备。利用内部信息或外部故障信息的特征来区分故障和非故障设备一直是对继电保护原理与装置提出的根本要求^[29]。

根据故障信息在非故障状态下不存在,只在设备发生故障时才出现的基本观点,可用叠加原理来研究故障信息的特征。在线性电路的假设前提下,可以把在网络内发生的故障视为非故障状态与故障附加状态的叠加。^[30]

在短路前没有、仅在短路后才出现的电气量称为故障分量。应用叠加原理计算时短路附加状态中的一切分量都是故障分量。由于在短路前的正常状态下这些量是不存在的,因此反应故障分量的继电保护一般都具有较高的灵敏度和较好的选择性。应用叠加原理把故障状态分解为故障前状态或负荷状态和故障后状态或故障附加状态。线路发生故障时,可以认为线路故障是由正常运行的状态和附加的故障状态叠加而成的,故障分流电流

就是附加的故障状态中的电流分量。

故障分量可以分为两类：

- (1) 稳定的故障分量包括负序分量和零序分量；
- (2) 短暂的故障分量-突变量。

以电流突变量为例，有正序电流突变量 $\Delta I_1 = I_1 - I_{10}$ 和相电流突变量 $\Delta I_A = I_A - I_{A0} = \Delta I_1 + I_2 + I_0$ 两种。突变量包含工频分量和暂态分量，以电流突变量为例：

$$\Delta i = \Delta i_{ff} + \Delta i_r; \quad (2-3)$$

其中 Δi_{ff} 为突变量电流中的工频分量， Δi_r 为其中的暂态分量。 Δi_r 难以与干扰信号相区别，而 Δi_{ff} 为稳定的工频信号，其安全性可以保证保护的稳定。因此多利用此信号来构成保护，在本文中就是利用此信号来构成突变量差动保护。

由负序零序分量构成的保护只能保护不对称故障，而突变量保护可以保护各种故障无论是对称还是不对称故障。由于突变量是故障分量，不反映过负荷及系统振荡，因此对于过负荷与系统振荡所具有的独特优势，是突变量分量的一个良好的特性。

2.2.2 突变量差动保护原理

(1) 分相差动作判据

系统故障后,利用每相电流的突变量分量构成差动保护，本文提出的动作判据为：

$$|\Delta I_m + \Delta I_n| > k(|\Delta I_m| + |\Delta I_n| - |\Delta I_m + \Delta I_n|) + k_0 \quad (2-4)$$

式中 ΔI_m 为线路左侧 (m 侧) 的突变量电流， ΔI_n 为线路右侧 (n 侧) 的突变量电流，k 为制动系数， k_0 是为了避免不平衡电流所引起差动保护误动作的引入的常量。

而通常使用的判据如下：

$$\Delta I_{op} = |\Delta I_m + \Delta I_n|; \quad \Delta I_{bias} = |\Delta I_m - \Delta I_n|; \quad \Delta I_{op} > k \cdot \Delta I_{bias} + k_0 \quad (2-5)$$

其中 ΔI_{op} ， ΔI_{bias} 分别为由故障分量组成的动作量与偏置量。

当区外发生短路故障时，流过各相的突变量均为穿越性电流，则保护动作条件不满足，能够可靠动作。在正常运行状态下和负荷状态下，突变量电流均为零， k_0 值的设置即可避免因不平衡电流所引起的保护误动

[31],[32]。

故障分量有两大特点^[33]：

- a) 故障分量仅在故障时出现，正常时为零；
- b) 故障分量仅由施加于故障点的一个电动势产生。

由第一个特点，反应故障分量的保护在正常时不会启动，因而灵敏度高，动作速度快；由第二个特点，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。

(2) 突变量的提取

突变量电流的取法在数字式保护中比传统的模拟式保护和集成式保护中要简单的多，以突变量电流为例， Δi 在 k 时刻的采样值可以表示为：

$$\Delta i_{(k)} = i_{(k)} - i_{(k-nN)} \quad (2-6)$$

式中的 k 为采样序列， N 为每周波采样次数， n 为任意整数。如果采用 $n=1$ ，也就是采用全波采样的方法来得到突变量电流，即从当前的采样值 $i_{(k)}$ 中减去 1 个周期前的采样值 $i_{(k-N)}$ 。在非故障情况下电流中只含有基波及各次谐波，必然有 $\Delta i_{(k)}=0$ 。只有在发生故障时才有 $\Delta i_{(k)}$ 输出。

(3) “计数”技术与“启动元件”应用

在故障条件下，突变量电流 ΔI_m 和 ΔI_n 来自于瞬时的电流采样值。在遇到很大的干扰脉冲而出现个别坏数据时，其值会很大，易造成保护的误动^[34]。为了消除这种影响，加入了跳闸计数器维持保护的可靠性。如果动作量大于制动量，跳闸计数器会加 1 否则减 1。计数器的最高值和最低值分别设为 10 和 0。采样值差动保护对每一个时刻进行差动判别，在连续 R 次判别中如果有 S 次满足判据，则输出动作信号^[35]。本文中取 $R=10, S=6$ 。

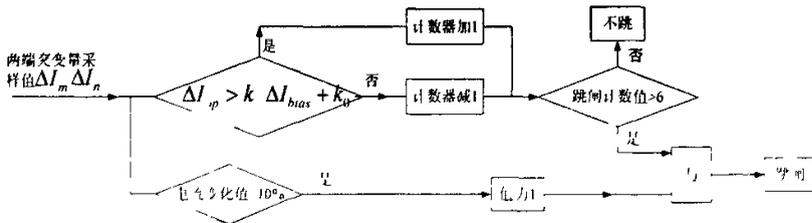


图 2.1 突变量电流差动保护逻辑图

Fig.2.1 The logic diagram of incremental current differential protection

为防止保护的误动作，在故障检测时增加了启动元件。启动元件主要

用在正常时闭锁保护出口，即使测量元件误动作也可保证不误跳闸；在故障时启动整套保护，解除出口闭锁^[36]。本文中当电流变化值大于 10%时，启动保护，允许保护跳闸。该部分的流程图如图 2.1 所示。

综合以上分析，可以得出以下特征：

- 1) 线路内部故障时，两侧故障分量电流在相位上接近相等，其相位差不受负荷电流的影响；
- 2) 线路外部故障时，即使在考虑分布电容影响的情况下，仍可认为线路两侧故障分量电流相位相反，幅值有较小的差异；
- 3) 从理论上讲，只要故障点过渡电阻不是无穷大，内部故障时两侧故障分量的相位关系就不会改变，因此，可提高保护的允许过渡电阻能力。

2.3 本章小结

本章首先介绍了全电流差动保护，然后具体介绍了故障分量差动保护，给出了突变量的定义、动作判据及如何提取。电流差动保护判据仅需测量被保护线路的各端电流，测量简单方便，同其它需要电压的线路保护判据相比，具有不受 PT 断线影响的特点。因此，可以说，它更为简单可靠。电流差动保护原理，理论上基于基尔霍夫电流定律，所需电气量少，原理简单，灵敏度高，动作速度快，是输电线路最理想的主保护之一。因此，从理论上讲，它可以适应任何拓扑结构的复杂电力网络。

第 3 章 全电流和故障分量电流差动保护的比较分析

3.1 灵敏度分析

利用图 3.1 所示的系统图对比考察 2 种判据的灵敏度。设保护装在 m、n 端，F 点发生故障，采用分相差动保护，每相保护均可用图 3.1 进行说明。对故障点而言，设有流入电流 I_m 和流出电流 I_n ，电流方向如图 3.1 所示。

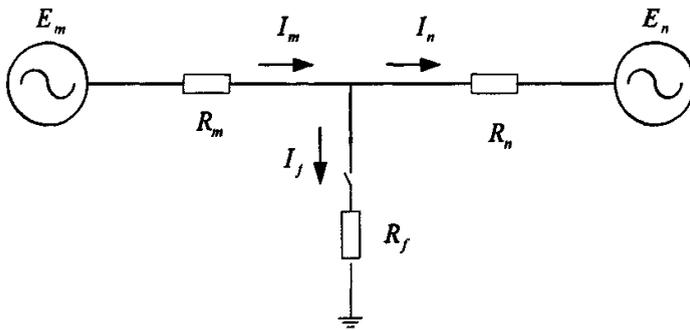


图 3.1 内部故障时故障运行状态

Fig.3.1 Running state during internal fault

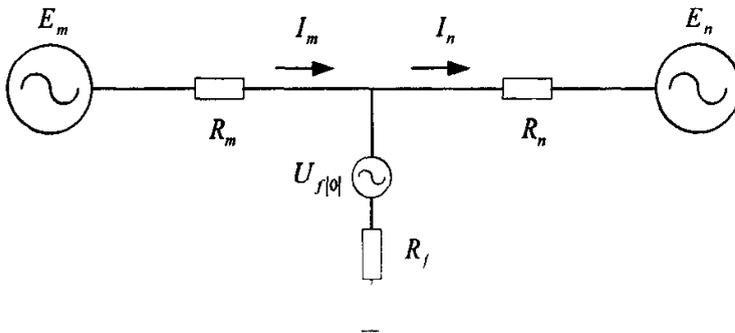


图 3.2 正常运行状态

Fig.3.2 Regular running state

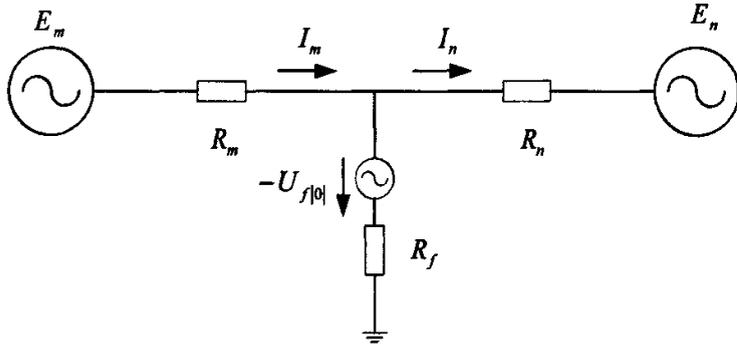


图 3.3 突变量附加状态

Fig.3.3 Incremental additional state

对于全电流比例差动判据，有

$$|I_m + I_n| > K_{res} \frac{|I_m| + |I_n|}{2} \quad (3-1)$$

对于故障分量电流比率差动判据，有

$$|\Delta I_m + \Delta I_n| > K_{\Delta res} (|\Delta I_m| + |\Delta I_n| - |\Delta I_m + \Delta I_n|) \quad (3-2)$$

本章中称式 (3-1) 为判据 1。式 (3-2) 为判据 2。

从判据 1 出发，讨论这 2 种判据在反应区内故障时的灵敏度问题。利用叠加原理，可以将图 1 分解为正常负荷状态和突变量附加状态。

全电流、故障分量电流及负荷电流的关系为

$$\begin{cases} I_m = I_L + \Delta I_m \\ I_n = I_L + \Delta I_n \end{cases} \quad (3-3)$$

式中 I_L 为负荷电流， ΔI_m 、 ΔI_n 分别为 m、n 侧的故障分量电流。

$$\text{对差流有 } I_m - I_n = I_f = \Delta I_m - \Delta I_n = \Delta I_f \quad (3-4)$$

根据图 3.1，令 $Z_n = \alpha Z_m$ ，并设 $E_n = \beta E_m$ ，则负荷电流可表示为

$$I_L = \frac{E_m - E_n}{Z_m + Z_n} = \frac{E_m(1 - \beta)}{Z_m(1 + \alpha)} \quad (3-5)$$

$$\text{故障支路电流为 } I_f = \frac{U_{F0}}{R_f(Z_m + Z_n) + Z_m Z_n} = \frac{E_m(\alpha + \beta)}{R_f(1 + \alpha) + \alpha Z_m} \quad (3-6)$$

对保护处的故障分量而言，有

$$\begin{cases} \Delta I_m = \frac{Z_n}{Z_m + Z_n} I_f = \frac{\alpha E_m (\alpha + \beta)}{[R_f (1 + \alpha) + \alpha Z_m] (1 + \alpha)} \\ \Delta I_n = \frac{Z_m}{Z_m + Z_n} I_f = -\frac{E_m (\alpha + \beta)}{[R_f (1 + \alpha) + \alpha Z_m] (1 + \alpha)} \end{cases} \quad (3-7)$$

下面先讨论接地电阻对保护灵敏度的影响。

$$\text{保护的灵敏度可表示为 } K_{\text{sen}} = I_f / I_{\text{res}} \quad (3-8)$$

根据式 (3-1)，判据 1 的制动电流为

$$I_{\text{res}} = \frac{|I_m| + |I_n|}{2} = I_f + \frac{\Delta I_m + \Delta I_n}{2} \quad (3-9)$$

由式 (3-9) 可见，使用全量构成的制动电流中，除了故障电流分量外，还包含着负荷电流，该负荷电流的存在将影响差动保护的灵敏度和稳定性。

将式 (3-5) - (3-7) 及 (3-9) 代入 (3-8) 并整理后，灵敏度可表示为

$$K_{\text{sen}} = 2 \sqrt{2 \left[\left(\frac{R_f}{Z_m} + \frac{\alpha}{1 + \alpha} \right) \frac{1 - \beta}{\alpha + \beta} + \frac{\alpha - 1}{1 + \alpha} \right]} \quad (3-10)$$

当系统运行方式及短路点位置确定时，式 (3-10) 中各量均为常数，可见，当 R_f 增加时，灵敏度将降低。为突出该问题，以判据 2 为参照，其制动量为：

$$\Delta I_{\text{res}} = |\Delta I_m| + |\Delta I_n| - |\Delta I_m + \Delta I_n| \quad (3-11)$$

把式 (3-7) 代入，可得

$$\Delta I_{\text{res}} = \frac{E_m (\alpha + \beta) \cdot 2\alpha}{[R_f (1 + \alpha) + \alpha Z_m] (1 + \alpha)} \quad (3-12)$$

$$\text{则可推导出其灵敏度的表达式为 } K_{\Delta \text{sen}} = (1 + \alpha) / 2\alpha \quad (3-13)$$

由式 (3-13) 可以看出判据 2 的灵敏度不受故障电阻和两侧系统电势的影响。在一般内部故障情况下，判据 2 的灵敏度将优于判据 1。

3.2 稳定性分析

判据1的区内故障灵敏度较低,其区外短路时的稳定性也不一定就高。用图3.4来考察区外故障保护的稳定性。此时故障支路电流和两侧系统电流的分布情况与图3.1相同。

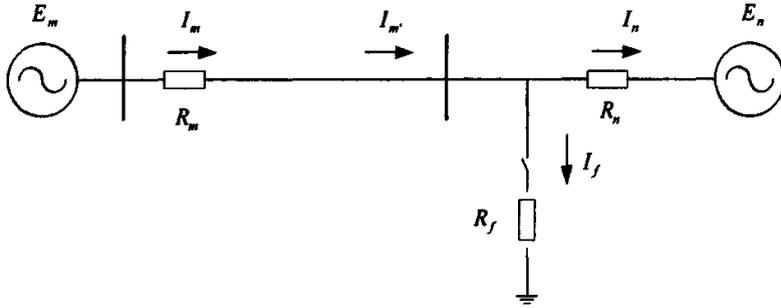


图 3.4 外部故障系统图

Fig. 3.4 The system diagram on external fault

当区外发生短路时,对一次电流而言, I_m 为穿越性电流,差流为零,保护应该是稳定的。但当 TA 饱和、尤其是单侧 TA 饱和时,情况则有所不同。令穿越电流为 I_{th} , m 侧 TA 完全传变, m' 侧 TA 部分传变,传变比为 ρ , 则有

$$I_m = I_{th} = \Delta I_m + I_L \quad (3-14)$$

$$I_{m'} = \rho I_{th} \quad (3-15)$$

$$\Delta I_{m'} = I_{m'} - I_L = \rho \Delta I_m + (\rho - 1) I_L \quad (3-16)$$

对于差流则有

$$I_f = I_m - I_{m'} = (1 - \rho) I_{th} = (1 - \rho) (\Delta I_m + I_L) \quad (3-18)$$

$$\Delta I_f = \Delta I_m - \Delta I_{m'} = (1 - \rho) (\Delta I_m + I_L) \quad (3-19)$$

由此可见,判据 1、2 的差流相等。只要比较 2 种判据的制动电流,即可获得对这两种判据恰当的评价。对判据 1 有

$$I_{res} = \frac{|I_m| + |I_n|}{2} = \frac{1 + \rho}{2} (\Delta I_m + I_L) \quad (3-20)$$

对判据 2, 相应地有

$$\Delta I_{res} = |\Delta I_m| + |\Delta I_n| - |\Delta I_m + \Delta I_n| = 2(1 + \rho) \Delta I_m + 2(\rho - 1) I_L \quad (3-21)$$

由(3-21)可见,变化因素太多,加上制动系数的考虑的,判据 1、2 的制动量几乎无法判断,因此这种情况不详细分析。

3.3 负荷电流的影响

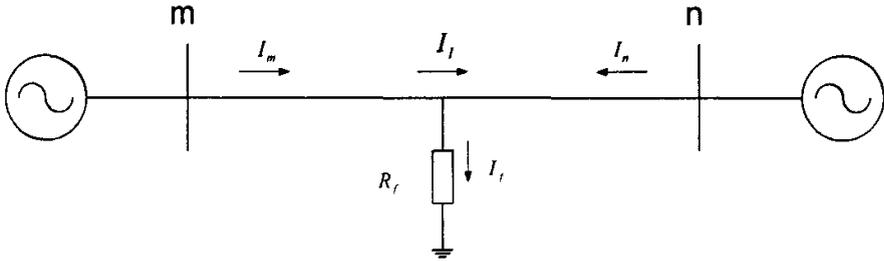


图3.5 重负荷大电阻故障时系统等值接线图

Fig. 3.5 The connecting diagram on heavy load and resistance fault

全电流差动保护判据具有计算量小等优点，但是区内故障的灵敏度除了与制动系数、故障点位置等因素有关外，还直接受负荷电流的影响。在负荷电流较小而故障分量很大时，对全电流差动判据的影响不会很大。当长线重负荷线路上发生经高阻接地时，故障分量的减小就将导致线路两侧的故障电流相位差朝着超过90度的方向发展，从而使判据中的动作量减小而制动量增大，进而使保护灵敏度受到严重影响。

在差动保护判据中， I_m 和 I_n 为全电流。正常时为负荷穿越性电流，在短路时则为负荷电流和故障电流两者的叠加。

$$\text{设 } I_m = \Delta I_m + I_f, \quad I_n = \Delta I_n - I_f$$

式中 ΔI_m 和 ΔI_n 分别为线路两侧故障分量电流， I_L 为负荷电流。

$$\text{则差动电流 } I_{diff} = |I_m + I_n| = |\Delta I_m + \Delta I_n| = |I_f| \quad (3-22)$$

式中 I_f 为故障支路电流。

而制动量

$$I_{res} = k(|I_m| + |I_n|) = k(|\Delta I_m + I_f| + |\Delta I_n - I_f|) = k(\Delta I_m - \Delta I_n + 2I_L) \quad \Delta I_n < I_f \quad (3-23)$$

$$\text{或 } = \Delta I_m + \Delta I_n \quad \Delta I_n > I_f \quad (3-24)$$

由上式可见制动量随负荷电流的增大而增大，在重负荷情况下发生经大电阻接地故障时，由于 $|I_f|$ 很小，而 $|I_L|$ 很大，动作量有可能小于制动量而拒动。为了提高重负荷情况下保护过渡电阻的能力，不得不降低制动系数 k ，同时也就降低了区外故障时的防卫能力。这是全电流差动保护的

主要缺点。

因此,全电流差动保护判据,在内部故障时其动作性能将受到负荷电流的影响。表现为一般情况下会降低保护的灵敏度。高阻故障或高阻故障伴有负荷送出时将导致保护拒动。

判据中所用的各侧电流相量,在系统正常时为负荷电流,在故障情况下为包括负荷电流在内的故障后稳态工频量。系统正常运行或发生外部故障时,两侧电流大小相等,相位相反(忽略电容电流),保护能可靠不动,负荷电流的存在不会产生不利影响。在发生内部不对称或经过渡电阻的对称故障时情形则大不相同。负荷电流为穿越性电流,它对两侧故障电流大小和相位关系的影响总是使其朝着不利于动作的方向发展,这表现为一般情况下会降低保护的灵敏度,在经高阻故障伴有负荷送出的情况下将会导致保护拒动。这类保护的允许过渡电阻能力一般不超过 250Ω ^{[37],[38]}。

在有些情况下,尤其是重负荷线路经大过渡电阻接地时,存在一些影响差动保护动作性能的问题,这种判据的灵敏度常常不能满足现场的要求。全电流差动保护由于将负荷电流引入制动量,从而降低了区内故障的灵敏度,如果参与差动保护计算的是故障分量电流,则可消除负荷电流的影响,使差动保护灵敏度得以提高。

从上节的分析中我们可以看到,故障分量电流本身与负荷电流无关,同时利用故障分量电流的差动保护判据与过渡电阻无关,因此,该保护能够很好的适应经过过渡电阻接地并伴有负荷送出的情况,大大的提高保护在这种情况下的灵敏度。

3.4 充电电流的影响

输电线路的相与相和地与地之间都存在着分布电容,在电压等级低、线路短的情况下,分布电容很小,对线路两端的电流影响不大,可忽略其对差动保护的影响;对超高压长线路,由于采用了分裂导线,线路的感抗减少,分布电容增加,线路较长则更使分布电容的等值容抗大大减少,电容电流的存在使得输电线路两端电流的大小和相位都发生了严重的畸变,因而其对线路差动保护的影响也越来越不可忽略^{[21],[32],[39]}。

分相电流差动原理具有简单、可靠,能够适应各种复杂接线的优点,

已被广泛应用,但其在我国超高压长输电线路保护中的应用却很少,在保护原理上,主要是受分布电容电流的影响。对于电流差动保护,分布电容不仅影响故障暂态过程中计算出的电流相量精度,更主要的是电容电流的存在使线路两端的测量电流不再满足基尔霍夫电流定律,从而直接影响了保护的灵敏度和可靠性。因此需要详细分析电容电流的负面影响,并研究适当的解决办法,促进分相电流差动在超高压长线上的应用,在线路上采取相应的电容电流补偿措施。

目前采取的措施包括两个方面:一是从保护方案的选择和保护定值的整定入手,选取受电容电流影响小的保护方案,并针对电容电流衰减特性,自适应的调整保护判据和定值;二是采取电容电流补偿措施,把动作电流中的电容电流分量完全补偿。文献[21]、文献[25]等都从各方面进行了分析,也得出了初步的结论,比如文献[21]利用 Π 形等值电路对电容电流影响进行的分析表明:在两侧保护装置中采用半补偿的方式,既可以提高差动保护在区内故障时的灵敏度,又可提高区外故障时的安全性;文献[42]分析了负荷电流对线路差动保护的影响;文献[40]提出了利用计算机的智能优势具有更高灵敏性和可靠性的综合差动判据;文献[41]则对电容电流影响及各种补偿方案进行了总结。但目前的分析多是在简化线路模型情况下的定性分析,缺乏直观定量分析,并且电容电流补偿问题也尚未解决,这是因为超高压长线暂态过程非常复杂,线路内部故障时的电容电流受故障电压影响很大,不易准确获得,所以目前的电容电流补偿方法都是基于区外故障的稳态情况,在暂态过程中和线路内部故障时则不能完全补偿电容电流。

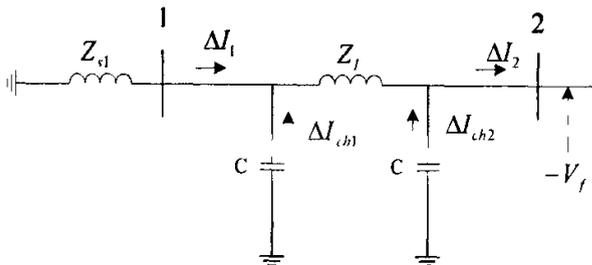


图 3.6 外部故障时的充电电流

Fig.3.6 The charge current on external fault

在分相电流差动保护中，在没有补偿措施时充电电流可作为差动电流引起继电器的误动作。

而在正常情况下由充电电流引起的突变量电流为零。因此差动电流 $I_{diff}=0$ 不会引起继电器的误动作。对于外部故障，由故障电压 V_f 引起的线路充电电流使差动电流不为零，充电电流如图 3.6。

其中， ΔI_1 为 1 端突变量电流， ΔI_2 为 2 端突变量电流， ΔI_{ch1} 为 1 端突变量电容电流， ΔI_{ch2} 为 2 端突变量电容电流， Z_{S1} 为从 1 端看到的电源阻抗， C 为传输线的电容。

补偿的差动电流 I_{diff} 可计算为：

$$I_{diff} = \Delta I_1 + \Delta I_{ch1} + \Delta I_{ch2} - \Delta I_2 \quad (3-25)$$

瞬时充电电流的推导需要母线电压、故障电压 $-V_f$ （突变量电压），

$$\Delta I_c(t) = C \cdot \frac{d(-V_f(t))}{dt} \quad (3-26)$$

在外部故障时母线电压的测量和 $\frac{d(-V_f(t))}{dt}$ 的近似值会引起瞬时充电电流计算的新误差。另外，差动电流的计算变得复杂并会降低继电器的速动性。

3.5 本章小结

本章首先对全电流和故障分量电流差动保护的灵敏度和稳定性进行了分析，得出采用故障分量的判据的灵敏度不受故障电阻和两侧系统电势的影响的结论。然后分析了负荷电流对两种判据的影响：全电流差动保护判据在内部故障时动作性能受负荷电流的影响而故障分量电流本身与负荷电流无关。最后论述了对电容电流补偿常采取的措施。

第4章 分流电流系数法

电流差动保护是根据被保护线路各端同名相电流向量的大小来判断内部或外部故障的，它是构成快速动作保护的主要原理之一^[42]。双比率差动保护由两段折线组成，低斜率段可以灵敏的反映内部故障，使保护可靠动作；而高斜率段可防止外部穿越性故障情况下，由于TA饱和引起的差动保护误动作。然而在运行中，由于多种实际不利因素的影响，使得电流差动保护几乎不可能达到理想的判别状态^{[42][43]}。

本章运用分流电流 Θ 对双比率电流差动保护算法的灵敏度和稳定性进行了分析。开发了一种双比率电流差动保护的RTDS软件模型，并通过实时数字仿真系统RTDS进行了验证。

4.1 双比率差动算法

一般而言，比率差动的差动量(Differential Current)为两侧电流矢量和，偏置电流(Bias Current)的定义则多种多样，常用的有穿越电流法，两侧电流矢量差法，两侧电流标量和法，两侧电流标量平均值法，最大电流制动等。本章重点研究采用穿越电流为偏置电流的双比率差动算法在内部高阻故障时的灵敏度和外部大电流故障TA饱和时的稳定性。

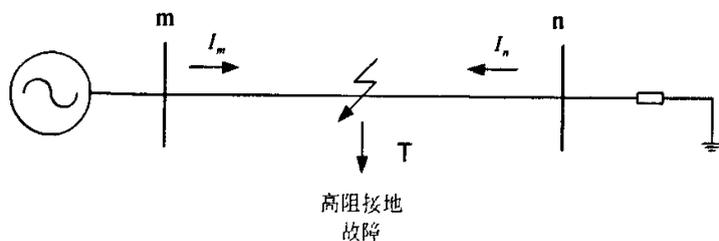


图 4.1 内部故障系统图

Fig.4.1 The system diagram on internal fault

设 I_m, I_n 为线路两侧电流如图 4.1 所示，差动电流为：

$$I_{diff} = |I_m + I_n| \quad (4-1)$$

当偏置电流取穿越电流时，制动量可取为：

$$I_{bias} = 0.5 \cdot (|I_m| + |I_n|) \quad (4-2)$$

如仅采用单比率制动，差动算法的判别式为：

$$I_{diff} \geq k \cdot I_{bias} + I_s \quad (4-3)$$

其中, k 为制动系数, I_s 为启动电流。上式 (4-3) 也是制动电流 (Restraint Current) I_{res} 的定义，即：

$$I_{res} = k \cdot I_{bias} + I_s \quad (4-4)$$

在差动偏置电流平面绘制单比率制动特性图。当差动电流大于制动电流时，保护运行于动作区，出口跳闸。当差动电流小于制动电流时，保护处于稳定运行区。单比率制动的特性曲线如图 4.2。该算法动作判据具有概念明确、形式直观、动作特性分析方便等优点，在一般情况下能满足灵敏度和稳定性的要求。

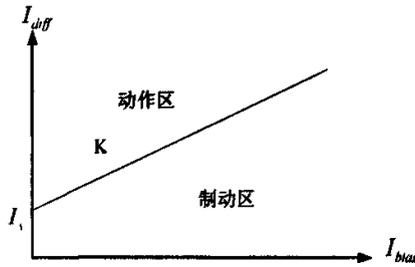


图 4.2 单比率制动特性曲线

Fig.4.2 The retain characteristic curve of single slope

而采用双比率制动时，差动算法的判别式为：

$$I_{bias} \leq I_{s2} \quad I_{diff} \geq k_1 \cdot I_{bias} + I_{s1} \quad (4-5)$$

$$I_{diff} > k_2 \cdot I_{bias} - (k_2 - k_1) \cdot I_{s2} + I_{s1} \quad I_{bias} > I_{s2} \quad (4-6)$$

其中， I_{diff} 为差动电流， I_{bias} 为偏置电流， k_1, k_2 为制动系数， I_{s1} 为启动电流， I_{s2} 为拐点电流。双比率制动特性曲线见图 3.3。

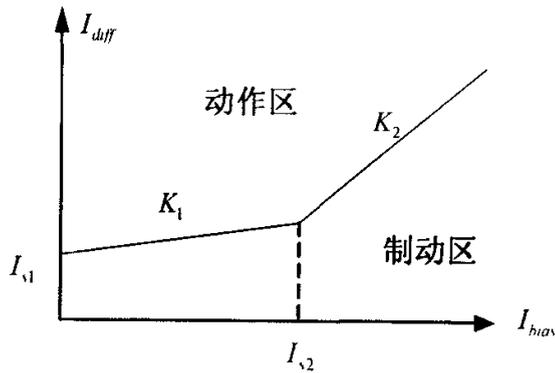


图 4.3 双比率制动特性曲线

Fig.4.2 The retain characteristic curve of dual slope

由于双比率制动系数的引入，双比率差动算法可以通过设定不同的制动比率而取得内部故障时的高灵敏度和外部故障时的稳定性。通常情况下，制动系数 K_1 取值较小，在内部高阻故障时，仅提供较小的制动电流，以确保内部故障时的高灵敏度。而在外部大电流故障 TA 饱和时，由于制动系数 K_2 相当大，穿越电流所产生的制动电流相当大，足以抵消 TA 饱和时引入的差流，从而防止了可能的误跳闸事件的发生。单比率差动算法由于仅有单一制动系数，保护整定时，必须平衡内部高阻故障时的灵敏度和外部大电流故障时的稳定性，通常无法同时取得很高的灵敏度和稳定性。这是单比率差动算法的局限性。

本文开发的一种双比率电流差动保护的软件模型，可在对数坐标平面上绘制穿越电流/标称电流倍数,分流电流系数(I, θ) 的图形来分析双比率电流差动保护算法的稳定性和灵敏度。

4.2 分流电流系数分析法

本章仅以双比率电流差动保护算法为例分析外部故障时的稳定性和内部故障时的灵敏度。由于外部大电流故障 TA 饱和时，穿越电流很大，可为标称电流的数十倍甚至上百倍。假设 I_2 拐点电流为两倍标称电流，则外部穿越性故障时的稳定性取决于双比率制动特性的第二段。

如图 4.4 所示，在外部大电流故障情况下，由于 TA 饱和或其他原因造成电流流出侧电流被部分分流。最不利的情况是一侧 TA 完全传变,另一

侧 TA 发生饱和,不妨设流入侧电流完全传变,有 $I_m = I$,当流出侧 TA 饱和时,流出侧的电流为 $I_n = -\delta \cdot I$ ($\delta \leq 1$), 则流出电流 $\theta = (1-\delta) \cdot I$, 分流电流 $\Theta = (1-\delta)$, 其中 δ 为 TA 的传变比 (即电流流出侧 TA 仅能传变穿越电流的 δ 倍)。

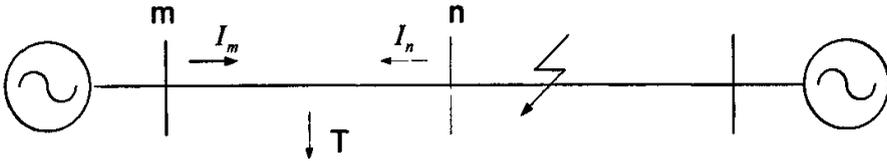


图 4.4 外部故障系统图

Fig.4.4 Fig.4.1 The system diagram on external fault

仅考虑 $I_{bias} > I_{s2}$ 的情况,由双比率制动特性曲线二段公式 (4-6) 可知,穿越电流所产生的制动电流为:

$$I_{diff} \geq k2 \cdot I_{bias} - (k2 - k1) \cdot I_{s2} + I_{s1} = k2 \cdot I_{bias} + C1 \quad (4-7)$$

由 $I_n = -\delta \cdot I$, 偏置电流可表示为:

$$I_{bias} = 0.5(|I_m| + |I_n|) = 0.5 \cdot (1 + \delta) \cdot I \quad (4-8)$$

代入 (4-6) 求解分流电流可得:

$$\Theta = 1 - \delta \geq 1 - C2 + \frac{C3}{I} \quad (4-9)$$

其中, C2 和 C3 为常数。

$$C2 = \frac{1 - 0.5 \cdot k2}{1 + 0.5 \cdot k2}, \quad C3 = \frac{-(k2 - k1)I_{s2} + I_{s1}}{1 + 0.5 \cdot k2}$$

根据公式 (4-9), 在穿越电流/标称电流倍数-分流电流对数坐标平面 ($I-\Theta$) 上绘制制动系数 $k2: \{70\%-150\%$ 曲线图。Case1 为 $k2=70\%$, Case2 为 $k2=80\%$, 依此类推绘制 Case9 曲线 $k9=150\%$, 如图 4.5 所示。其中,横坐标为穿越电流/标称电流倍数,纵坐标为分流电流,启动电流取 20% 标称电流,拐点电流为两倍标称电流,制动系数 $k1$ 为 30%。

由图 4.5 可看出,随着 $k2$ 值的增大,算法所能接受的分流电流越大。也就是说,即使外部故障时 TA 饱和而产生大量差流,算法仍能维持稳定而不至误跳闸。当穿越电流为 20 倍标称电流时,由图 4.5 Case1 ($k2=70\%$) 曲线可知,由 TA 饱和产生的差分电流最大可达到 50% 的穿越电流,算法

能维持稳定。当制动系数 k_2 取 150% 时，由 TA 饱和产生的差分电流最大可达到 80% 的穿越电流，算法仍能维持稳定，不会出现误动和拒动的情况。当制动系数 k_2 从 70% 到 150%，算法的稳定性增加了 60%。 k_2 值的取值大小直接决定了算法在外部故障时的稳定性。

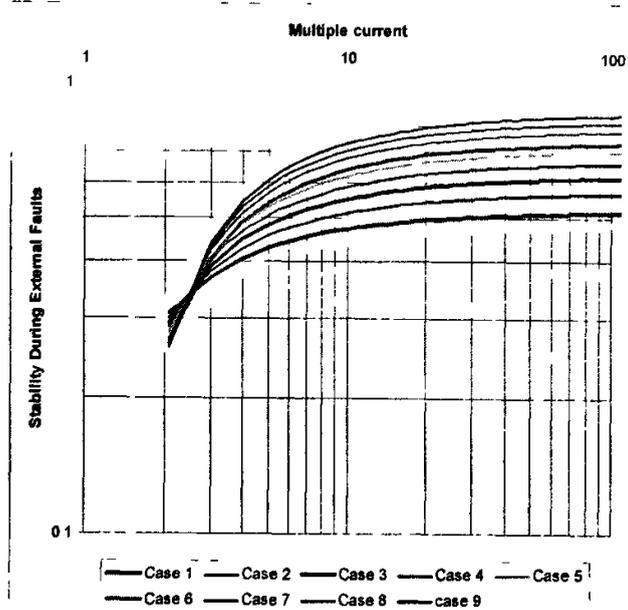


图 4.5 外部故障时的分流电流图（曲线由下至上依次为 Case1-Case9）

Fig.4.5 Outflow current diagram on external fault (The curve from top to below is Case1-Case9)

下面来分析内部故障时的情况，着重于高阻内部故障。由图 4.1 可知，系统一侧有源，一侧无源仅接负荷，由于故障阻抗较高，从而出现负荷分流情况。分流的大小取决于负荷与故障阻抗的比值。

由于高阻故障时，故障电流一般不很大，考虑 $I_{bias} \leq I_2$ 时，由双比率制动特性曲线一段可知，当差动电流大于制动电流时，保护出口跳闸。其运行特性可由公式（4-10）表示。

$$I_{diff} \geq K1 \cdot I_{bias} + IS_1 \quad (4-10)$$

设负荷分流电流为 $I_n = -\delta \cdot I$ ，则故障电流为

$$I_f = (1 - \delta) \cdot I \quad (4-11)$$

负荷分流电流可表示为：

$$\delta \leq C2 - \frac{C3}{I} \tag{4-12}$$

其中：

$$C2 = \frac{1 - 0.5 \cdot K2}{1 + 0.5 \cdot K2}, \quad C3 = \frac{Is1}{1 + 0.5 \cdot K2}$$

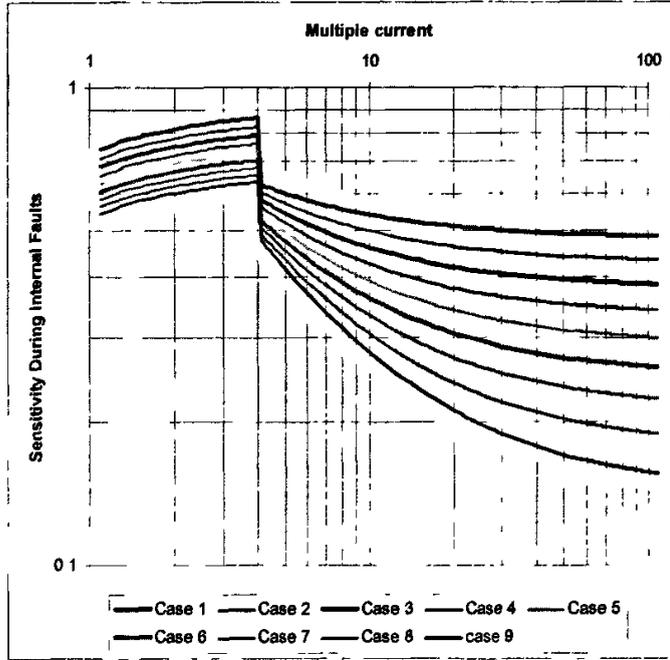


图 4.6 内部故障时的灵敏度（曲线由下至上依次为 Case9-Case1）

Fig.4.6 The sensitivity on internal fault (The curve from below to top is Case9-Case1)

差动保护内部故障时的灵敏度与启动电流直接相关，启动电流整定值愈低，内部故障时的灵敏度愈高。该灵敏度也和制动系数 $K1$ 相关。根据公式 (4-12)，在偏置电流/标称电流倍数-分流电流对数坐标平面 ($I-\Theta$) 上绘制制动系数 $K1: \{20\%-100\%$ 一段灵敏度曲线图。Case1 为 $K1=20\%$ ，Case2 为 $K1=30\%$ ，依此类推绘制 Case9 曲线 $K1=100\%$ ，如图 4.6 所示。其中，启动电流取 20% 标称电流，拐点电流为四倍标称电流。同时，二段灵敏度曲线取制动系数 $K2: \{70\%-150\%$ 绘制于图 4.6 中。

由图 4.6 可以很直观地看出，双比率制动灵敏度曲线一段为凸性，当偏置电流增大时，灵敏度相应得到提高。却随着一段制动系数 $K1$ 的增大而降低。所以 $K1$ 宜小不宜大。二段的灵敏度曲线为凹性，说明偏置电流很大时，灵敏度不应成为差动保护的制约。

双比率制动特性的优点是在外部故障时增加了制动量，而在内部故障时制动量变小。其优点是兼顾了外部故障 TA 严重饱和时保护的稳定性和重负荷下内部故障的灵敏度。当内部故障时负荷分流电流有限，制动系数取值较小，可以提高差动保护的灵敏度；外部故障时则提高差动保护的制动系数，可以防止不平衡电流引起的误动。

4.3 对不同判据的分析

本部分的制动特性曲线基本相同，只是偏置电流 I_{bias} 的取法各有不同。图 4.1, 4.7 分别为外部故障和内部故障时的系统图。

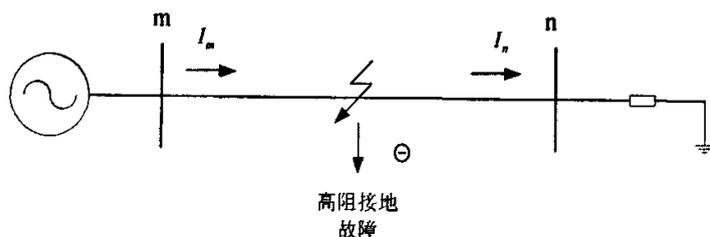


图 4.7 内部故障系统图

Fig.4.7 The system diagram on internal fault

表 4.1 不同判据表达式

Tab.4.1 Different criterion expression

No.	差动电流	偏置电流	一段制动电流	二段制动电流
1	$I_{diff} = I_m + I_n $	$I_{bias} = (I_m - I_n)/2$	$I_{res} = k_1 \cdot I_{bias} + I_{s1}$	$I_{res} = k_2 \cdot I_{bias} - (k_2 - k_1) \cdot I_{s2} + I_{s1}$
2	$I_{diff} = I_m + I_n $	$I_{bias} = (I_m + I_n)/2$	$I_{res} = k_1 \cdot I_{bias} + I_{s1}$	$I_{res} = k_2 \cdot I_{bias} - (k_2 - k_1) \cdot I_{s2} + I_{s1}$
3	$I_{diff} = I_m + I_n $	$I_{bias} = \text{Max}(I_m, I_n)$	$I_{res} = k_1 \cdot I_{bias} + I_{s1}$	$I_{res} = k_2 \cdot I_{bias} - (k_2 - k_1) \cdot I_{s2} + I_{s1}$
4	$I_{diff} = I_m + I_n $	$I_{bias} = I_m \cdot I_n \cdot \cos\phi$	$I_{res} = k_1 \cdot I_{bias} + I_{s1}$	$I_{res} = k_2 \cdot I_{bias} - (k_2 - k_1) \cdot I_{s2} + I_{s1}$
5	$I_{diff} = I_m + I_n $	$I_{bias} = I_m + I_n - I_m + I_n $	$I_{res} = k_1 \cdot I_{bias} + I_{s1}$	$I_{res} = k_2 \cdot I_{bias} - (k_2 - k_1) \cdot I_{s2} + I_{s1}$

4.3.1 对判据 1 的分析

由图 4.1、4.7，设流入侧电流完全转变，有 $I_m = I$ ，流出侧 TA 饱和时，流出侧的电流为 $I_n = -\delta \cdot I$ ($\delta \leq 1$)，流出电流 $\theta = (1 - \delta) \cdot I$ ，分流电流 $\Theta = 1 - \delta$ ，其中 δ 为 TA 的转变比（即电流流出侧 TA 仅能转变穿越电流的 δ 倍）。

1) 外部故障的稳定性

仅考虑 $I_{bias} > I_{s2}$ 的情况，由双比率制动特性曲线二段公式 (4-6) 可知，穿越电流所产生的制动电流为：

$$I_{diff} \geq k_2 \cdot I_{bias} - (k_2 - k_1) \cdot I_{s2} + I_{s1} = k_2 \cdot I_{bias} + C1 \tag{4-13}$$

由 $I_n = -\delta \cdot I$ ，偏置电流可表示为：

$$I_{bias} = 0.5(I_m - I_n) = 0.5 \cdot (1 + \delta) \cdot I_m \tag{4-14}$$

代入求解分流电流可得：

$$\Theta = 1 - \delta \geq 1 - C2 + \frac{C3}{I} \tag{4-15}$$

其中，C2 和 C3 为常数。

$$C2 = \frac{1-0.5 \cdot k2}{1+0.5 \cdot k2}, \quad C3 = \frac{-(k2-k1)Is2 + Is1}{1+0.5 \cdot K2}$$

根据公式，在穿越电流/标称电流倍数-分流电流对数坐标平面($I-\Theta$)上绘制制动系数 $k2$: {70%-150%} 曲线图。Case1 为 $k2=70%$ ，Case2 为 $k2=80%$ ，依此类推绘制 Case9 曲线 $k9=150%$ ，如图 4.8 所示。其中，横坐标为穿越电流/标称电流倍数，纵坐标为分流电流，启动电流取 20% 标称电流，拐点电流为两倍标称电流，制动系数 $k1$ 为 30%。

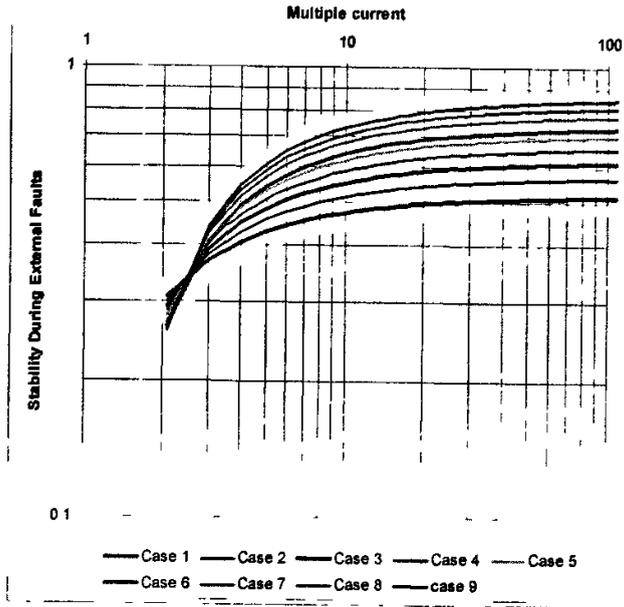


图 4.8 判据 1 在外部故障时的分流电流图 (曲线由下至上依次为 Case1-Case9)

Fig.4.8 Outflow current of Criterion 1 on external fault (Curve from below to top is Case1-Case9)

2) 内部故障的灵敏度

下面来分析内部故障时的情况，着重于高阻内部故障。由于高阻故障时，故障电流一般不很大，考虑 $I_{bias} \leq I_{2}$ 时，由双比率制动特性曲线一段可知，当差动电流大于制动电流时，保护出口跳闸。其运行特性可由公式 (4-10) 表示。

$$I_{diff} \geq K1 \cdot I_{bias} + Is_1 \quad (4-16)$$

设负荷分流电流为 $I_n = -\delta \cdot I$, 则故障电流为

$$I_f = (1 - \delta) \cdot I \quad (4-17)$$

负荷分流电流可表示为:

$$\delta \leq C2 - \frac{C3}{I} \quad (4-18)$$

其中:

$$C2 = \frac{1 - 0.5 \cdot K2}{1 + 0.5 \cdot K2}, \quad C3 = \frac{Is1}{1 + 0.5 \cdot K2}$$

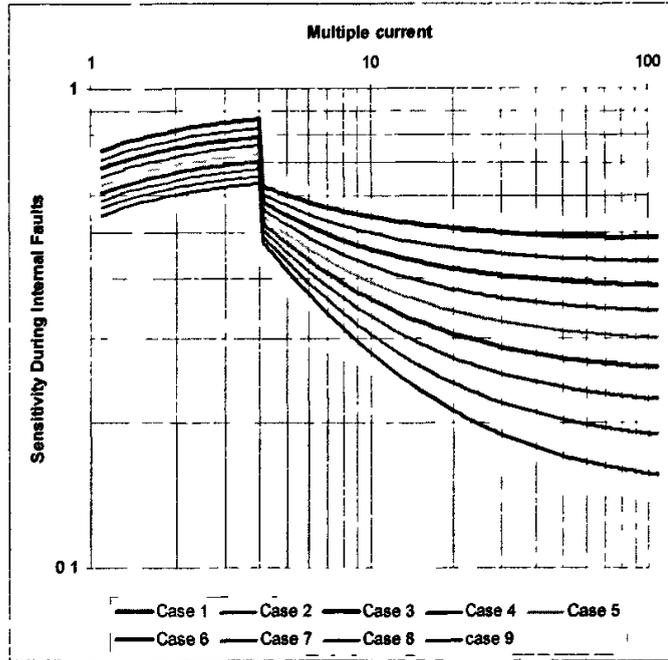


图 4.9 判据 1 在内部故障时的灵敏度 (曲线由下至上依次为 Case9-Case1)

Fig.4.9 The sensitivity of Criterion 1 on external fault (Curve from below to top is Case9-Case1)

根据公式 (4-12), 在偏置电流/标称电流倍数-分流电流对数坐标平面 ($I-\Theta$) 上绘制制动系数 $k1: \{20\%-100\%$ 一段灵敏度曲线图。Case1 为 $k1=20\%$, Case2 为 $k1=30\%$, 依此类推绘制 Case9 曲线 $k1=100\%$, 如图 6 所示。其中,启动电流取 20%标称电流,拐点电流为四倍标称电流。同时,二段灵敏度曲线取制动系数 $k2: \{70\%-150\%$ 绘制于图 4.9 中。

4.3.2. 对判据2的分析

由图1、2, 设流入侧电流完全传变, 有 $I_m = I$, 当流出侧 TA 饱和时, 流出侧的电流为 $I_n = -\delta \cdot I$ ($\delta \leq 1$), 则流出电流 $\theta = (1-\delta) \cdot I$, 分流电流 $\Theta = 1-\delta$, 其中 δ 为 TA 的传变比 (即电流流出侧 TA 仅能传变穿越电流的 δ 倍)。

1) 外部故障的稳定性

仅考虑 $I_{bias} > I_{s2}$ 的情况, 由双比率制动特性曲线二段公式 (6) 可知, 穿越电流所产生的制动电流为:

$$I_{diff} \geq k_2 \cdot I_{bias} - (k_2 - k_1) \cdot I_{s2} + I_{s1} = k_2 \cdot I_{bias} + C1 \quad (4-19)$$

由 $I_n = -\delta \cdot I$, 偏置电流可表示为:

$$I_{bias} = 0.5(I_m + I_n) = 0.5 \cdot (1-\delta) \cdot I_m \quad (4-20)$$

代入求解分流电流可得:

$$\Theta = 1-\delta \geq 1 - C2 + \frac{C3}{I} \quad (4-21)$$

其中, $C2$ 和 $C3$ 为常数。

$$C2 = 1, \quad C3 = \frac{-(k_2 - k_1)I_{s2} + I_{s1}}{1 - 0.5 k_2}$$

根据公式, 在穿越电流/标称电流倍数-分流电流对数坐标平面 ($I-\Theta$) 上绘制制动系数 k_2 : {70%-150%} 曲线图。Case1 为 $k_2=70\%$, Case2 为 $k_2=80\%$, 依此类推绘制 Case9 曲线 $k_9=150\%$, 如图 4.10 所示。其中, 横坐标为穿越电流/标称电流倍数, 纵坐标为分流电流, 启动电流取 20% 标称电流, 拐点电流为两倍标称电流, 制动系数 k_1 为 30%。

由于 $C2=1$, $\theta = \frac{C3}{I_m}$, 所以所得的曲线为一组直线。

2) 内部故障的灵敏度

下面来分析内部故障时的情况, 着重于高阻内部故障。由于高阻故障时, 故障电流一般不很大, 考虑 $I_{bias} \leq I_{s2}$ 时, 由双比率制动特性曲线一段可知, 当差动电流大于制动电流时, 保护出口跳闸。其运行特性可由公式 (4-10) 表示。

$$I_{diff} \geq k_1 \cdot I_{bias} + I_{s1} \quad (4-22)$$

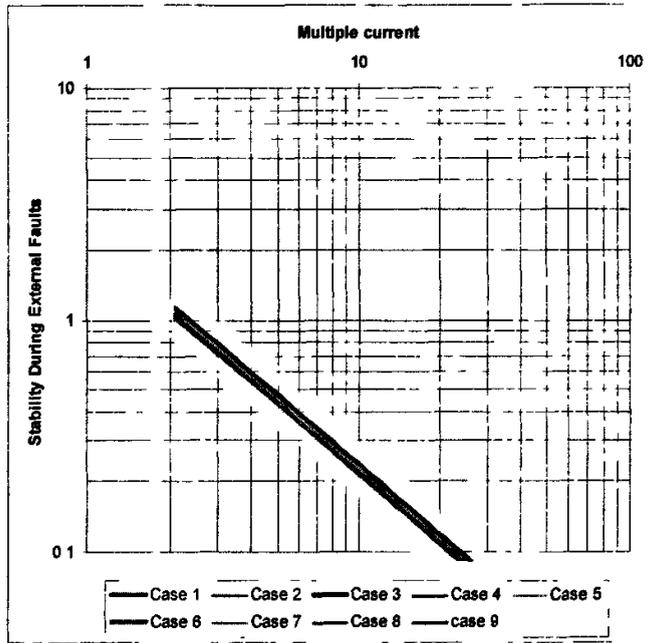


图 4.10 判据 2 外部故障时的分流电流图(曲线由下至上依次为 Case1-Case9)

Fig.4.10 Outflow current of Criterion 2 on external fault (Curve from below to top is Case1-Case9)

设负荷分流电流为 $I_n = -\delta \cdot I$ ，则故障电流为

$$I_f = (1 - \delta) \cdot I \quad (4-23)$$

负荷分流电流可表示为：

$$\delta \leq C2 - \frac{C3}{I} \quad (4-24)$$

其中：

$$C2 = 1, \quad C3 = \frac{I_{s1}}{1 - 0.5 \cdot k1}$$

根据公式 (4-12)，在偏置电流/标称电流倍数-分流电流对数坐标平面 ($I-\Theta$) 上绘制制动系数 $k1$: {20%-100%}一段灵敏度曲线图。Case1 为 $k1=20%$ ，Case2 为 $k1=30%$ ，依此类推绘制 Case9 曲线 $k1=100%$ ，如图 4.11 所示。其中,启动电流取 20%标称电流，拐点电流为四倍标称电流。同时，二段灵敏度曲线取制动系数 $k2$: {70%-150%}绘制于图 4.11 中。

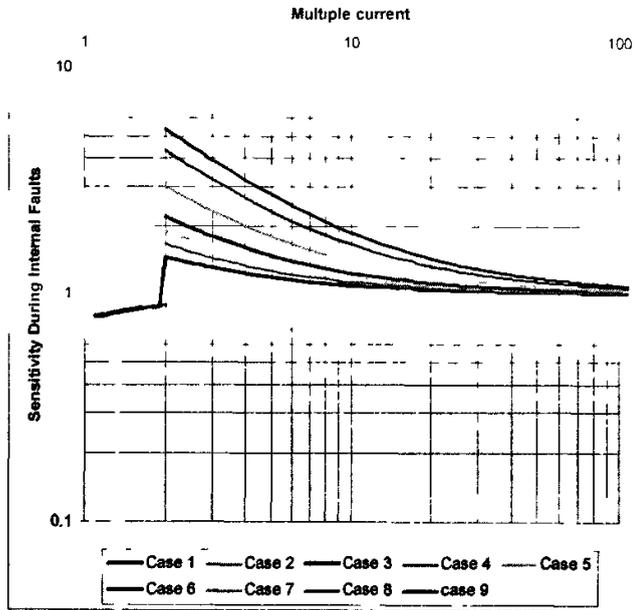


图 4.11 判据 2 在内部故障时的灵敏度(曲线由下至上依次为 Case9-Case1)

Fig.4.10 The sensitivity of Criterion 2 on internal fault (Curve from below to top is Case9-Case1)

4.3.3. 对判据 3 的分析

1) 外部故障的稳定性

仅考虑 $I_{bias} > I_{s2}$ 的情况, 由双比率制动特性曲线二段公式 (4-6) 可知, 穿越电流所产生的制动电流为:

$$I_{diff} \geq k_2 \cdot I_{bias} - (k_2 - k_1) \cdot I_{S2} + I_{S1} = k_2 \cdot I_{bias} + C1 \quad (4-25)$$

由 $I_n = -\delta \cdot I$, 偏置电流可表示为:

$$I_{bias} = \text{Max}(I_m, I_n) = I_m \quad (4-26)$$

代入求解分流电流可得:

$$\Theta = 1 - \delta \geq 1 - C2 + \frac{C3}{I} \quad (4-27)$$

其中, C2 和 C3 为常数。

$$C2 = 1 - k_2, \quad C3 = C1$$

根据公式，在穿越电流/标称电流倍数-分流电流对数坐标平面($I-\Theta$)上绘制制动系数 k_2 : {70%-150%} 曲线图。Case1 为 $k_2=70\%$ ，Case2 为 $k_2=80\%$ ，依此类推绘制 Case9 曲线 $k_9=150\%$ ，如图 4.12 所示。其中，横坐标为穿越电流/标称电流倍数，纵坐标为分流电流，启动电流取 20% 标称电流，拐点电流为两倍标称电流，制动系数 k_1 为 30%。

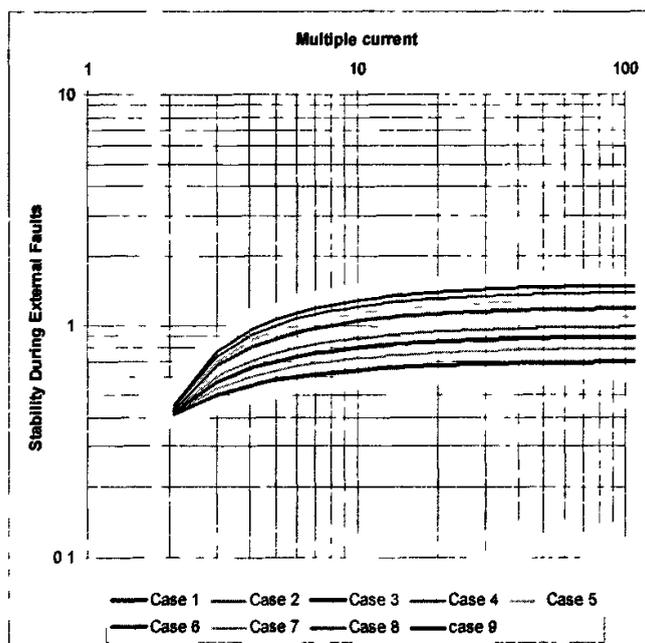


图 4.12 判据 3 外部故障时的分流电流图 (曲线由下至上依次为 Case1-Case9)

Fig.4.12 Outflow current of Criterion 3 on external fault (Curve from below to top is Case1-Case9)

3) 内部故障的灵敏度

下面来分析内部故障时的情况，着重于高阻内部故障。由于高阻故障时，故障电流一般不很大，考虑 $I_{bran} \leq I_{s2}$ 时，由双比率制动特性曲线一段可知，当差动电流大于制动电流时，保护出口跳闸。其运行特性可由公式 (4-10) 表示。

$$I_{diff} \geq k_1 \cdot I_{bran} + I_{s1} \quad (4-28)$$

设负荷分流电流为 $I_n = -\delta \cdot I$ ，则故障电流为

$$I_f = (1 - \delta) \cdot I \quad (4-29)$$

负荷分流电流可表示为：

$$\delta \leq C2 - \frac{C3}{I} \quad (4-30)$$

其中：

$$C2 = 1 - k_1, \quad C3 = \frac{Is1}{1 - k_1}$$

表 4.2 判据 3 内部故障时各参数取值

Tab 4 2 Each parameter value of criterion 3 on internal fault

K1.	K2	Is2	Is1	C2	C3	Case No.
0.2	0	2	0.2	0.8	0.25	1
0.25	0	2	0.2	0.75	0.266667	2
0.3	0	2	0.2	0.7	0.285714	3
0.3	0.7	2	0.2	0.3	-0.6	3
0.3	0.8	2	0.2	0.2	-0.8	4
0.3	0.9	2	0.2	0.1	-1	5
0.3	1	2	0.2	0	-1.2	6
0.3	1.2	2	0.2	-0.2	-1.6	7
0.3	1.4	2	0.2	-0.4	-2	8
0.3	1.5	2	0.2	-0.5	-2.2	9

当取到 case No 6 时，出现负值。所以电流分流系数法不适合该判据。

4.3.4. 对判据 4 的分析

1) 外部故障的稳定性

仅考虑 $I_{bias} > I_2$ 的情况，由双比率制动特性曲线二段公式 (4-6) 可知，穿越电流所产生的制动电流为：

$$I_{diff} \geq k_2 \cdot I_{bias} - (k_2 - k_1) \cdot I_{S2} + I_{S1} = k_2 \cdot I_{bias} + C1 \quad (4-31)$$

由 $I_n = -\delta \cdot I$ ，偏置电流可表示为：

$$I_{bias} = I_m \cdot I_n \cdot \cos \phi = (1 - \delta) \cdot I_m^2 \cos \phi \quad (4-32)$$

代入求解分流电流可得：

$$\Theta = 1 - \delta \geq 1 - C2 + \frac{C3}{I} \quad (4-33)$$

其中，C2 和 C3 为常数。

$$C2 = 1, \quad C3 = \frac{-(k2 - k1)I_{s2} + I_{s1}}{1 - k2I_m \cos \phi}$$

2) 内部故障的灵敏度

下面来分析内部故障时的情况，着重于高阻内部故障。由于高阻故障时，故障电流一般不很大，考虑 $I_{bias} \leq I_{s2}$ 时，由双比率制动特性曲线一段可知，当差动电流大于制动电流时，保护出口跳闸。其运行特性可由公式 (4-10) 表示。

$$I_{diff} \geq k1 \cdot I_{bias} + I_{s1} \quad (4-34)$$

设负荷分流电流为 $I_n = -\delta \cdot I$ ，则故障电流为

$$I_f = (1 - \delta) \cdot I \quad (4-35)$$

负荷分流电流可表示为：

$$\delta \leq C2 - \frac{C3}{I} \quad (4-36)$$

其中：

$$C2 = 1, \quad C3 = \frac{I_{s1}}{1 - k1I_m \cos \phi}$$

由外部故障和内部故障的公式推导可知，在常数 C3 中存在变量 I_m ，所以该方法不适合判据 4。

4.3.5. 对判据 5 的分析

1) 外部故障的稳定性

仅考虑 $I_{bias} > I_{s2}$ 的情况，由双比率制动特性曲线二段公式 (4-6) 可知，穿越电流所产生的制动电流为：

$$I_{diff} \geq k2 \cdot I_{bias} - (k2 - k1) \cdot I_{s2} + I_{s1} = k2 \cdot I_{bias} + C1 \quad (4-37)$$

由 $I_n = -\delta \cdot I$ ，偏置电流可表示为：

$$I_{bias} = |I_m| + |I_n| - |I_m + I_n| = 2\delta I_m \quad (4-38)$$

代入求解分流电流可得：

$$\Theta = 1 - \delta \geq 1 - C2 + \frac{C3}{I} \quad (4-39)$$

其中，C2 和 C3 为常数。

$$C2 = \frac{1}{1+2k_2}, \quad C3 = \frac{C1}{1+2k_2}$$

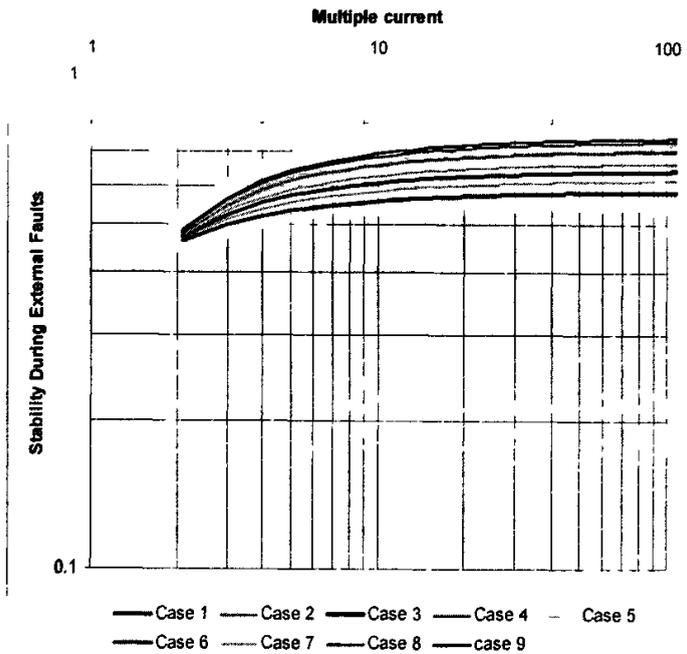


图 4.13 判据 5 外部故障时的分流电流图（曲线由下至上依次为 Case1-Case9）

Fig.4.13 Outflow current of Criterion 5 on external fault (Curve from below to top is Case1-Case9)

根据公式，在穿越电流/标称电流倍数-分流电流对数坐标平面($I-\Theta$)上绘制制动系数 k_2 : {70%-150%} 曲线图。Case1 为 $k_2=70\%$ ，Case2 为 $k_2=80\%$ ，依此类推绘制 Case9 曲线 $k_9=150\%$ ，如图 4.13 所示。其中，横坐标为穿越电流/标称电流倍数，纵坐标为分流电流，启动电流取 20% 标称电流，拐点电流为两倍标称电流，制动系数 k_1 为 30%。

2) 内部故障的灵敏度

下面来分析内部故障时的情况，着重于高阻内部故障。由于高阻故障时，故障电流一般不很大，考虑 $I_{bias} \leq I_{s2}$ 时，由双比率制动特性曲线一段可知，当差动电流大于制动电流时，保护出口跳闸。其运行特性可由公式 (4-10) 表示。

$$I_{diff} \geq k_1 \cdot I_{bias} + I_{s1} \quad (4-40)$$

设负荷分流电流为 $I_n = -\delta \cdot I$ ，则故障电流为

$$I_f = (1 - \delta) \cdot I \quad (4-41)$$

负荷分流电流可表示为：

$$\delta \leq C_2 - \frac{C_3}{I} \quad (4-42)$$

其中：

$$C_2 = \frac{1}{1 + 2k_1}, \quad C_3 = \frac{I_{s1}}{1 + 2k_1}$$

根据公式 (4-12)，在偏置电流/标称电流倍数-分流电流对数坐标平面 ($I-\Theta$) 上绘制制动系数 k_1 : {20%-100%} 一段灵敏度曲线图。Case1 为 $k_1=20\%$ ，Case2 为 $k_1=30\%$ ，依此类推绘制 Case9 曲线 $k_1=100\%$ ，如图 4.14 所示。其中，启动电流取 20% 标称电流，拐点电流为四倍标称电流。同时，二段灵敏度曲线取制动系数 k_2 : {70%-150%} 绘制于图 4.14 中。

4.4 本章小结

本章研究了双比率差动算法在内部高阻故障的灵敏度和外部故障时的稳定性，并与单比率差动算法进行了比较。然后以双比率电流差动保护算法为基础，提出了分流电流系数分析法，分析了外部故障的稳定性和内部故障的灵敏度。最后用五种不同的判据验证了分流电流系数法的正确性。

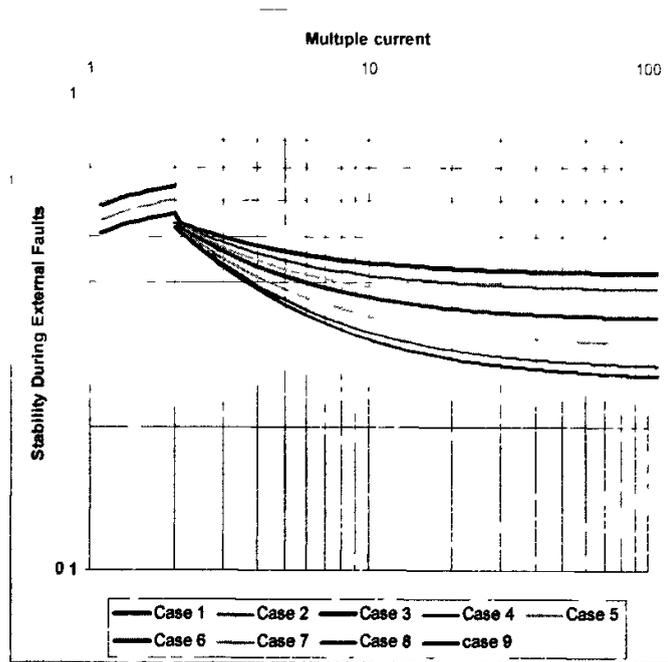


图 4.14 判据 5 在内部故障时的灵敏度(曲线由下至上依次为 Case9-Case1)

Fig.4.14 The sensitivity of Criterion 5 on internal fault (Curve from below to top is Case9-Case1)

第 5 章 仿真验证与分析

5.1 RTDS 介绍^{[44][45]}

RTDS 是由加拿大 Manitoba 直流研究中心(HVDC)开发的专门用于实时研究电力系统的数字动模系统,该系统中的电力系统元件模型和仿真算法是建立在已获得行业认可,且已广泛应用的 PSCAD/EMTDC 基础上的,其仿真结果与现场实际系统的真实情况是一致的。我国自 20 世纪 90 年代初由原南自院引进以来,已有十多个单位先后引进该设备,提高了我国电力系统在实时仿真方面的水平。

RTDS 的主要优势在于实时性和带被测试设备闭环运行的能力。它不但可以用于电力系统的仿真分析研究,它还可以提供电力系统一次设备,各类控制系统,各种电力系统自动化设备实时数字仿真试验的闭环试验环境。这类电力系统数字仿真器对它的实时仿真能力要求很高。它是由高速计算机及信号输入输出通道,被仿真系统的数学模型,实时仿真算法、良好的人机接口,以及性能优良的电压/电流功率放大部件等综合组成。这种仿真器拥有比较全面和详细的电力系统元件模型。

电力系统元件模型软件的最低层由模拟电力系统各元件的一系列模块组成。由于这些模块的长短直接影响到实时仿真的时步,所以用 DSP 的汇编语言编制和优化这些模块。目前 RTDS 可以运行的电力系统元件主要有:无源 R、L、C 支路;滤波器和电源;单回输电线和同杆双回输电线;考虑饱和因素的双绕组和三绕组变压器;断路器和故障设置;同步电机及励磁机、调速器、汽机和多质体;串联补偿(MOV 和 TCSC);高压直流阀组;CT、CVT 等。用户可以用这些电力系统的基本元件来建立需要进行研究的电力系统网络。用于单一元件以及整个电力系统仿真的算法是基于与 EMTP 及 EMTDC 中采用的同一数学模型基础上的。

RTDS 硬件仿真器通过 LAN 网与计算机软件平台互联,物理上不需要接近实际系统。LAN 网连接使 Case 运行和软硬件相互作用变得非常容易。在线仪表检测的 RunTime 运行环境非常类似于利用 SCADA 的实际网络运行。

5.1.1 RTDS 工作原理

利用动模试验设备有 2 个机柜，2 组电流、电压放大器来说明 RTDS 的工作原理。如图 5.1 所示。

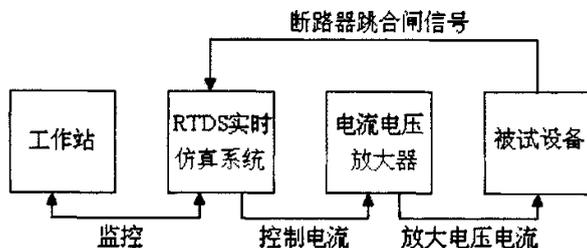


图 5.1 用 RTDS 进行保护装置动模闭环试验示意图

Fig.5.1 Dynamic analog closed circle test of protection relay by RTDS

1) 工作站

工作站由 PC 机组成，主要为人机对话界面，包括仿真系统的模型、运行方式、各种操作、参数选择、波形显示及被试设备的动作信息等主要功能。工作站通过并行接口与 RTDS 实时仿真系统进行数据信息的交换，并控制 RTDS 实时仿真系统的仿真运行。

2) RTDS 实时仿真系统

RTDS 实时仿真系统是系统的核心部分，它接收工作站的数据、操作指令来控制仿真试验。通过光电回路接收被试设备的控制命令以及接收仿真系统断路器、刀闸等一次设备的状态命令，根据工作站中的各种仿真数字信号，通过 D/A 变换将仿真系统的模拟波形送至电流电压放大器带动被试验设备，并根据工作站的操作命令来完成各种仿真试验。

3) 电流电压放大器

电流电压放大器接收由 RTDS 实时仿真系统送来的模拟信号，通过电流电压放大输出至被试设备及系统，它必须具有良好的线性度、稳定性以及高性能的频率特性。

试验结果显示 RTDS 能满足继电保护装置动态仿真试验的要求，经过

测试,发现被测保护装置的保护动作行为与电力系统仿真情况相符合。该仿真系统与常规的由旋转设备构成的动模试验系统相比较,不仅占地少,而且试验更灵活、方便。

5.1.2 RTDS 的应用

东北电力集团在 RTDS 上开展了针对 CSL-101B 型数字式线路保护装置的动模试验工作,目的是进一步校核在 RTDS 平台上建立电力系统模型的真实性和可靠性,同时测试保护装置的动模试验工作^[46]。东方电子公司也利用 RTDS 动模系统测试了新开发的超高压线路保护装置 DF3621^[47]。

早在 1992 年,加拿大 manitoba 大学和 manitoba 高压直流中心就应用 RTDS 对商业化的距离继电器进行测试。物理装置由继电器、功率监测器或者是电力系统稳定器组成。

该测试中观察了三相短路、两相短路、单相接地短路时距离继电器的动作行为,实例结果验证了运行实时仿真器测试继电器的能力,发现在各种故障时继电器均能可靠跳闸。文献中还阐述了用 RTDS 和传统的模拟仿真器相连可以大大地改善模拟仿真器的性能^[48]。

5.2 仿真环境

本课题利用加拿大产电力系统实时仿真系统 RTDS (Real Time Digital Simulator) 来对前文中的电流差动保护来进行仿真验证。目前课题中由于条件限制,暂时只能在 RTDS 上进行软件仿真,也就是利用 RTDS 的硬件部分以及其终端上的软件部分来构建虚拟电力系统和保护装置来进行测试。其构建的虚拟电力系统可以仿真系统故障,而其软件可以仿真或实验验证新型的保护算法。在算法验证通过之后,也可利用 RTDS 的实时仿真功能来外接电流电压放大器与真实保护系统来进行实时闭环仿真。^[49]

在本课题中,利用 RTDS 构建了各种线路和虚拟系统结构,以及各种故障类型和情况,来对本课题中提出的新型突变量电流差动算法以及全电流差动算法来进行仿真验证。并对负荷电流的问题进行了仿真分析。对本课题中提出的电流分流系数分析法进行了仿真验证。

1) 在仿真过程中主要采用的系统线路图有以下几种：

1. 单电源辐射型网络

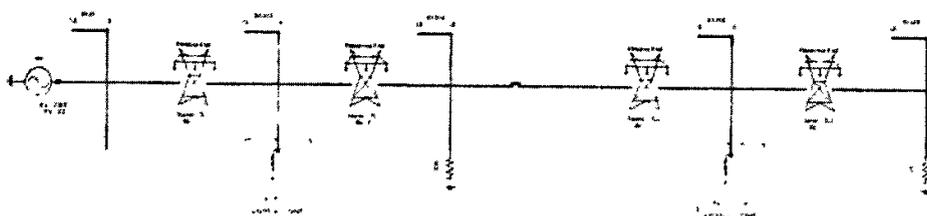


图 5.2 单电源辐射型网络结构图

Fig. 5.2 The radiant line circuit of one source supply

本线路主要用来验证在单电源辐射网络的情况下，在远电源侧是否有足够的突变量电流来使保护动作。

2. 双电源单回线线路

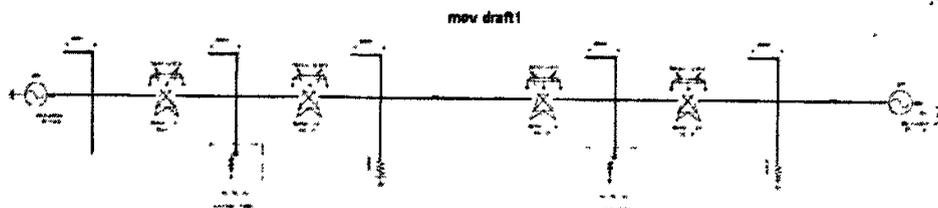


图 5.3 双电源辐射型网络结构图

Fig. 5.3 The radiant line circuit of two source supply

本测试模型主要用来对保护区内区外故障来进行验证，以及高阻接地时的保护是否能够正确动作。

3. 双电源双回线线路

本仿真线路主要用来验证保护在高压双回线线路（500KV）的情况下，保护是否能够正确动作。

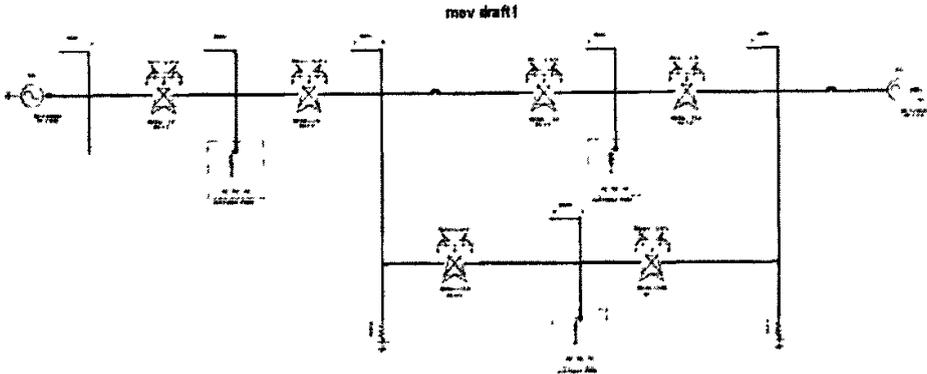
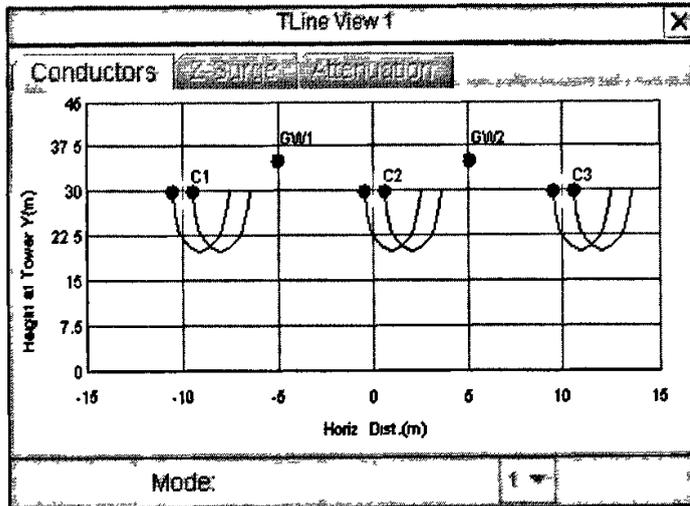


图 5.4 双电源辐射型网络结构图

Fig. 5.4 The radiant line circuit of one source supply

2) 仿真线路数据:

在 RTDS 仿真中主要采用下图所示的双线模型,



其模型的数据以及频率参数如下

线路选项

模型: 贝瑞隆(Bergeron) ▼
 已换位的: 理想换位 ▼
 插值: 行波时间插值 ▼
 输入选择: 物理数据 ▼
 输出格式: EMITDO 输出格式 ▼
 编辑文件: 不建立编辑文件 ▼

曲线拟合信息

波阻抗的极点最大数 #: 0
 波阻抗最大误差(最大值的%): 0.2
 极点处衰减最大值: 10
 衰减最大误差(最大值的%): 0.2

频率数据

最低频率(Hz): 500
 最高频率(Hz): 1000000
 用于计算矩阵 T1 的频率(Hz): 2000

其电路参数如下:

导线数据			
导线号 #	1号导线	2号导线	3号导线
导线名称	Chukar	Chukar	Chukar
Conductor Type (AC or DC)	AC ▼	AC ▼	AC ▼
V(kV)(AC L-L,rms/DC L-L, pk)	500.0	500.0	500.0
V 相位(度)	0.0	-120.0	120.0
短路电流(kA)(交流有效值/直流峰值)	5.0	5.0	5.0
短路电流相位(度)	20.0	-100.0	140.0
子导体数	2	2	2
分裂线子导线半径(cm)	2.03454	2.03454	2.03454
分裂线子导线间距(cm)	45.72	45.72	45.72
水平方向距离 X(m)	-10.0	0.0	10.0
塔高 Y(m)	30.0	30.0	30.0
中部下坠(m)	10.0	10.0	10.0
直流电阻率(ohm/km)	0.03206	0.03206	0.03206

线路长度(km): 100.0 塔地电阻率(ohm/m): 100.0

复制 芯数目: 3 ▼ 芯设置: 1-3 ▼ 单位: 公制单位 ▼

确定 取消

其中线路长度因不同线路所在位置会有所不同，最长部分选择为 400km。

5.3 仿真测试结果

5.3.1. 稳定性与灵敏度比较仿真结果

线路故障仿真对各种故障情况在各个仿真线路上进行了仿真验证，主要针对以下两个判据进行了仿真分析：

$$|\Delta I_m + \Delta I_n| > k(|\Delta I_m| + |\Delta I_n| - |\Delta I_m + \Delta I_n|) + k_0 \quad (5-1)$$

$$|I_m + I_n| > K_{res} \frac{|I_m| + |I_n|}{2} \quad (5-2)$$

本章中称式 (5-1) 为判据 (1)，式 (5-2) 为判据 (2)。

仿真利用 RTDS，建立如图 5.5 所示的双机系统模型，分别仿真图 5.2 的内外部故障。外部故障时通过改变 CT 一侧的负荷电阻 (Burden 电阻值) 达到 CT 磁芯饱和的效果，来考察饱和时的情况。在仿真中应用 RTDS 中特有的批处理及编程保护测试功能对保护系统在各种故障及不正常运行状况下的表现进行了测试。

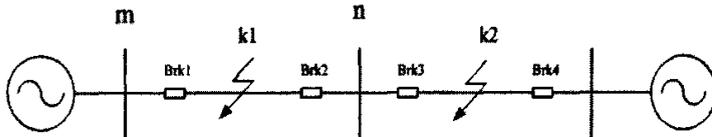


图 5.5 仿真用双机系统图 (k1 为区内故障, k2 为区外故障)

Fig 5.5 The system diagram of two-machine (k1 is internal fault and k2 is external fault)

1) 灵敏度分析

在内部故障情况下，如果两侧突变量电流差别不大也就是流出电流不大的情况，而且过渡电阻较小的情况下，两者动作速度以及灵敏度差别不大，均能够在 10ms 左右正确动作。如图 3 所示，图中由上至下六条曲线分别为线路左侧电流，线路右侧电流，线路左侧突变量电流，线路右侧突

变量电流，判据（1）动作情况，判据（2）动作情况，横轴单位为 s，故障均发生在 0.1s 处：

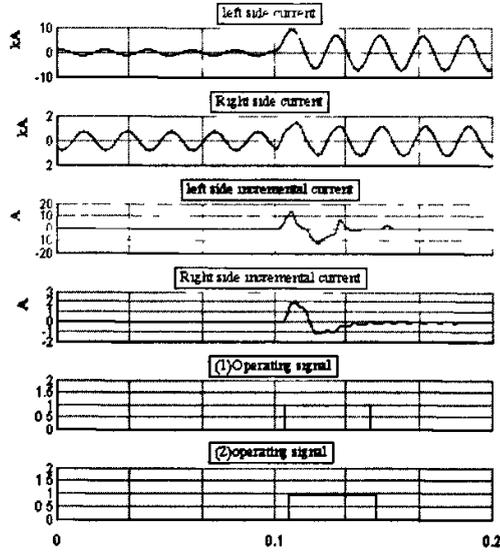


图 5.6 判据（1）（2）在内部故障时的仿真结果

Fig. 5.6 The simulation result of criterion 1 and 2 on internal fault

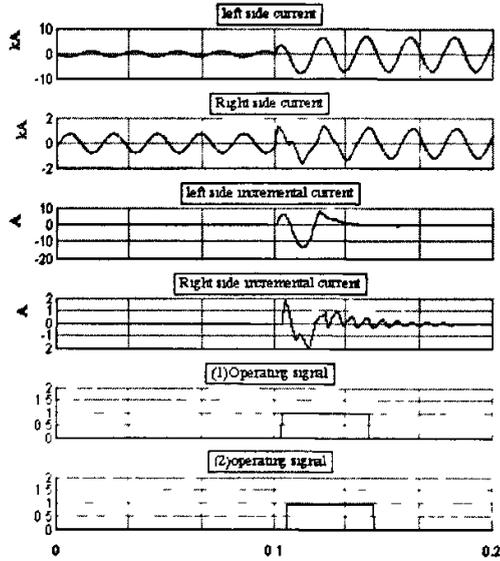


图 5.7 判据（1）（2）在内部故障存在流出电流时的仿真结果

Fig. 5.7 The simulation result of outflow current on internal fault

由如图 5.6 的仿真结果可知：判据 (1) 具有较高的区内故障灵敏度，在故障过渡电阻较大的情况下，由于突变量分量数值较小，并且此时内部流出电流比较大，会影响判据 (2) 的灵敏度以及动作速度，但对判据 (1) 的影响较小，其动作速度并没有太大的影响。

在区内故障由于流出电流以及各种误差的影响导致两侧突变量电流不等时，判据 (1) 仍能够在 10ms 以内正确动作，而判据 (2) 则出现较大延时，在 15ms 时才动作。判据 (1) 具有更大的区内灵敏度。

2) 稳定性分析

在区外故障时，两个判据均具有较高的稳定性。如图 5.8。

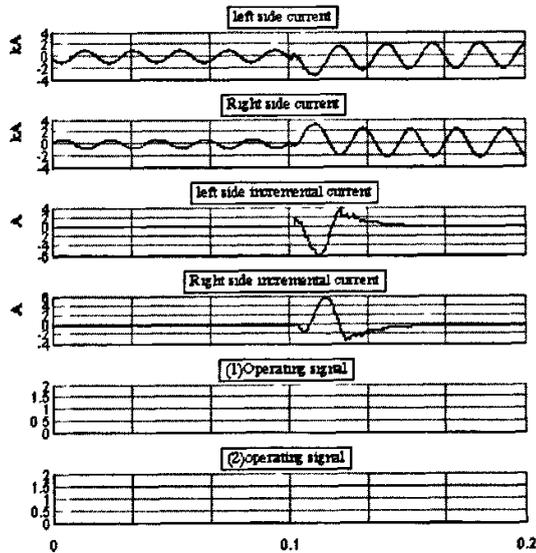


图 5.8 判据 (1) (2) 在外部故障时的仿真结果

Fig. 5.8 The simulation result of criterion (1) and (2) on external fault

由上图可以看出在区外故障即使存在一定的干扰使两侧电流不为零的情况下，两个判据仍能够正确的判断为区外故障，保持稳定性。

在区外故障时，在故障后 3 到 4 个周波后，采用判据 (1) 的保护不会因为个别暂态信号的干扰而误动作。如果两个判据采用同样的制动系数 k 和 k_0 时，判据 (1) 则具有较高稳定性。如图 5.9 所示：

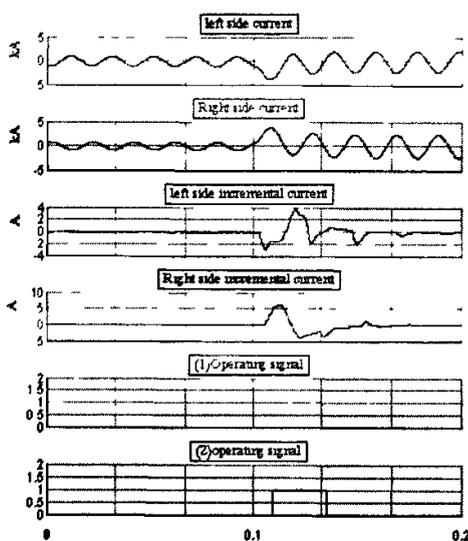


图 5.9 判据 (1) (2) 在外部故障多故障时的仿真结果

Fig. 5.9 The simulation result of criterion (1) and (2) on external multi fault

由图 5.9 可以看出由于各种原因导致的区外故障时的多周波后的扰动会导致判据 (2) 误动作。而本文提出的判据 (1) 仍能正确动作。

3) 高阻接地的情况

判据 (1) 由于其在区内故障时制动量为零, 因此可以在高阻接地时仍然具有较高的灵敏度。图 5.10 为其在单相接地电阻较高值时的保护表现。

由图 5.10 可以看出, 由于接地阻抗已经达到了较高值, 电流在发生故障后已经无明显变化, 如果采用常规的电流电压保护, 其保护根本不可能启动。但是采用突变量电流作为启动分量的差动保护判据 (1) 仍能够正确动作, 而判据 (2) 不动作。可见判据 (1) 比判据 (2) 具有更大的抗过渡电阻能力。

RTDS 仿真证明电流突变量差动保护判据简单可靠, 具有良好的灵敏度和稳定性, 反应过渡电阻能力强, 有很强的实用价值。

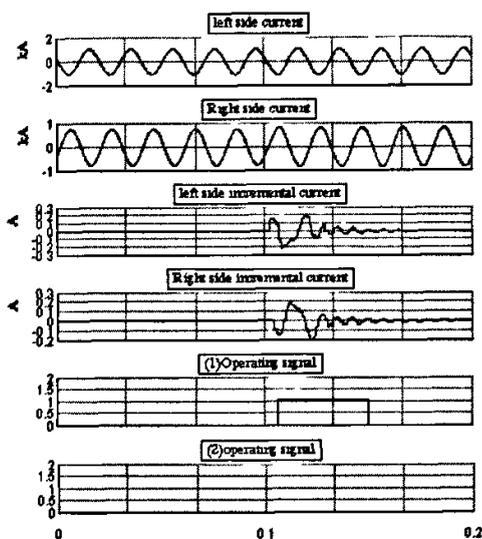


图 5.10 判据 (1) (2) 在高阻接地故障时的仿真结果

Fig.5.10 The simulation result of criterion (1) and (2) on high resistance ground fault

5.3.2. 负荷电流影响的仿真

本部分利用 RTDS 实时仿真,按照分布参数建立了一条 100 k m 长的 500 k V 线路模型,如图 5.11 所示,其中 RLD LOAD 为 RC 负载, $P=500\text{kW}$, $Q=500\text{kVar}$ 。按照空载线路工频过电压系数不超过 1.4 的原则,考虑了大、中、小 3 种系统阻抗,对接地故障考虑了从 $0\ \Omega \sim 300\ \Omega$ 的 10 种过渡电阻,故障方式考虑了单相接地、两相短路、两相接地、三相短路 4 类共 10 种故障。在线路中点设置了 1 个内部故障点。模型暂时没有考虑线路中含有串补电容和并联电抗的情况,没有考虑故障转移的情况。

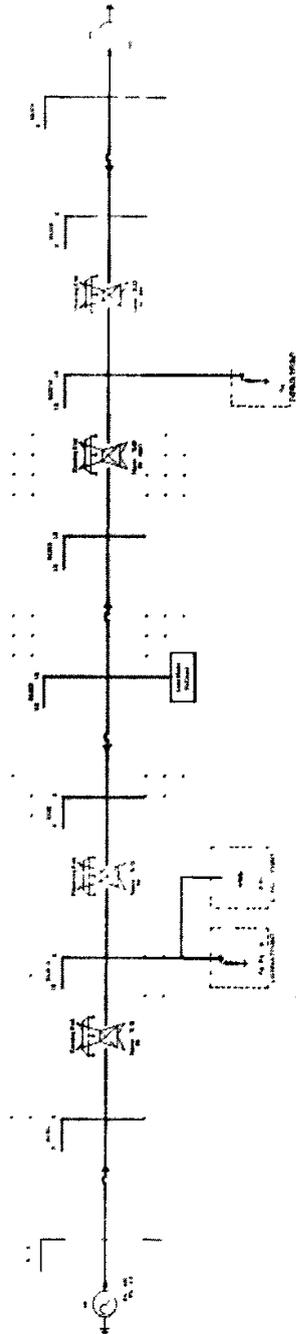


图5.11 仿真用系统图

Fig. 5.11 The system diagram for simulation

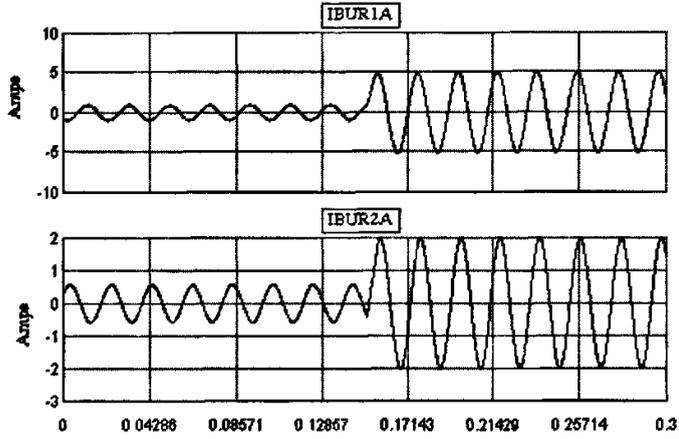


图5.12 全电流采样值

Fig. 5.12 The sampling value of full current

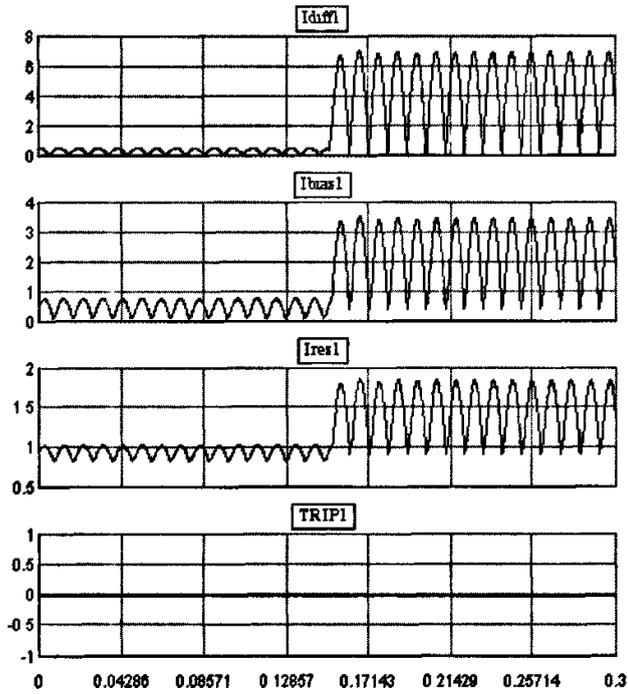


图5.13 全电流的跳闸信号

Fig. 5.13 The tripping signal of full current

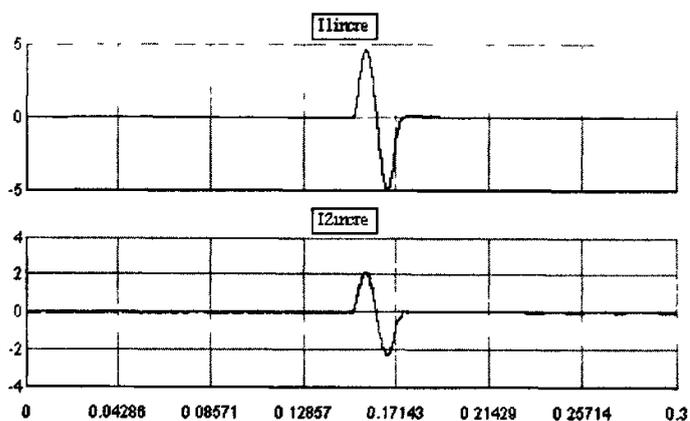


图5.14 突变量电流采样值

Fig. 5.14 The sampling value of incremental current

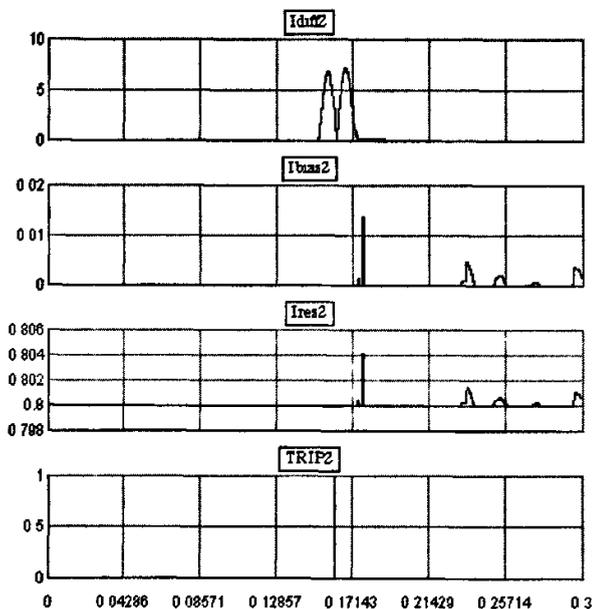


图5.15 突变量电流时跳闸信号

Fig. 5.15 The tripping signal of incremental current

由仿真结果可以看出，尽管是在重负荷线路和经大过渡电阻接地的情况下，全电流差动保护判据在区内故障时会拒动，而故障分量向量差动保护算法都能够保护区内发生的各种故障，可以正确动作，并且其灵敏度和动作特性都较传统的全电流差动保护要好。

在仿真过程中，其动作时间一般在15ms左右，即使在经大过渡电阻（本模型下单相接地故障的最大过渡电阻为200Ω），接地的情况下，该保护判据也能在20ms 之内动作。当发生区外故障时，故障分量差动保护能够可靠不动作，即使考虑线路TA 一侧饱和、一侧不饱和的情况，该保护判据也具有良好的动作性能。

由3.3节的分析及仿真结果可得出，基于故障分量的向量差动保护对区外发生的各种故障能够可靠不动作，有较强的防卫能力。对区内发生的各种故障能够快速、灵敏地动作，切除故障，保护电网的安全运行，并且动作行为不受过渡电阻的影响，克服了全电流向量差动保护易受负荷电流影响的缺点。

5.3.3. 分流电流系数法的仿真

利用本文开发的 RTDS 差动保护模型进行外部故障时稳定性和内部故障时灵敏度的仿真分析。外部故障时的仿真系统采用图 5.5 所示系统模型，线路采用 A 和 B 保护，两者均采用本文开发的 RTDS 差动保护算法，并接入同一 TA 二次电流。其中，启动电流设为 $0.2I_N$ ，拐点电流为 $2I_N$ ，制动系数 K_1 取 30%， K_2 取不同的值，来研究制动系数 K_2 对差动保护模型稳定性的影响。

在线路外部加入(A,N)故障，改变近故障侧 TA 的负荷电阻（Burden 电阻值）至 TA 磁芯呈饱和时，投入 A 和 B 保护。图 5.16 为外部 A 相发生接地故障时近故障点 TA 一次及二次侧电流。由图可见，由于 TA 饱和，该 TA 二次侧电流波形发生了严重畸变。而另一侧 TA 未饱和，能如实反应故障时的电流。由于两侧电流仅在一侧发生严重畸变，差动保护量测到较大的差流及偏置电流如图 5.17 所示。

设 A 保护制动系数 K_2 为 40%，B 制动系数为 150%。由图 5.17 仿真结果可知，A 保护起动，出口跳闸（TRIP1），B 保护保持稳定，TRIP2 输出为 0，无误跳闸信号。仿真结果表明，当制动系数 K_2 较大，差动保护具有良好的稳定性。即使一侧 TA 饱和，保护仍能够正确不动作。

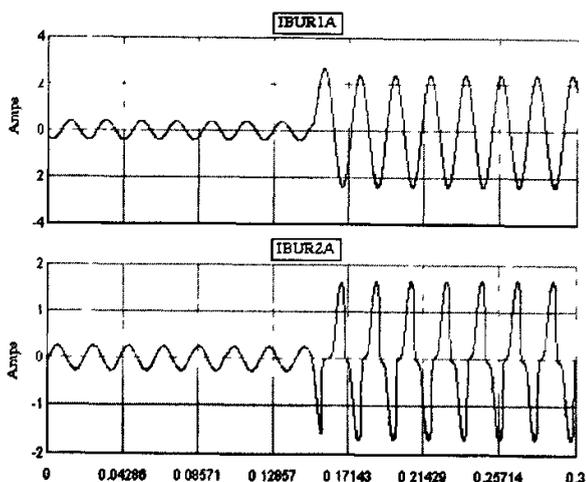


图 5.16 外部故障电流采样值

Fig. 5.16 The current sampling value on external fault

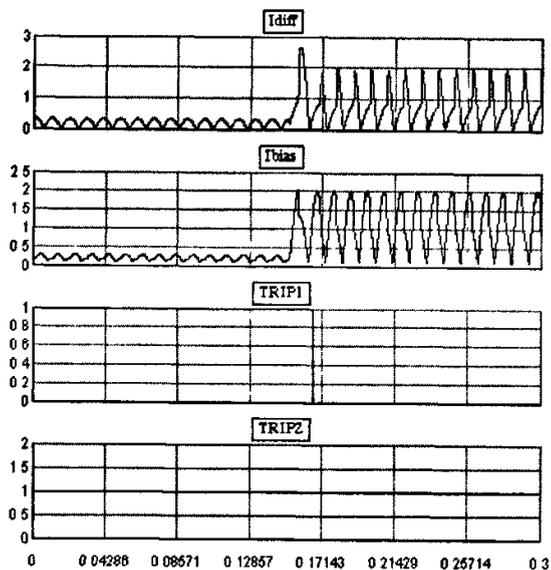


图 5.17 外部故障跳闸信号

Fig. 5.17 The tripping signal on external fault

内部故障时仿真系统模型如图 5.5 所示。同样采用 A 和 B 保护，启动电流相同，但 A 保护制动系数 K_1 为 0.2，B 保护为 0.3。当内部高阻 A 相接地故障时，A 保护正确启动，TRIP3 出口跳闸隔离故障，B 保护却未能启动。

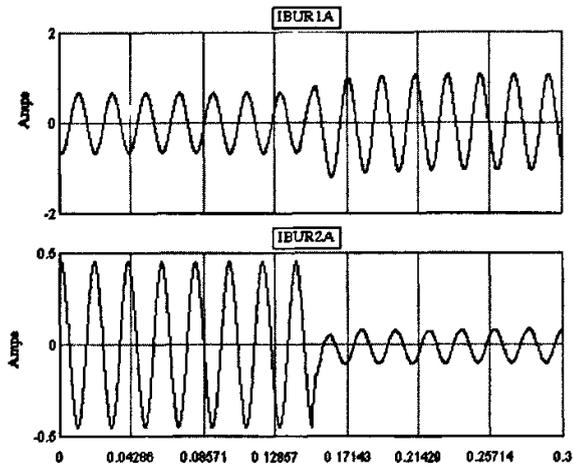


图 5.18 内部故障电流采样值（小电流）

Fig. 5.18 The current sampling value on internal fault (small current)

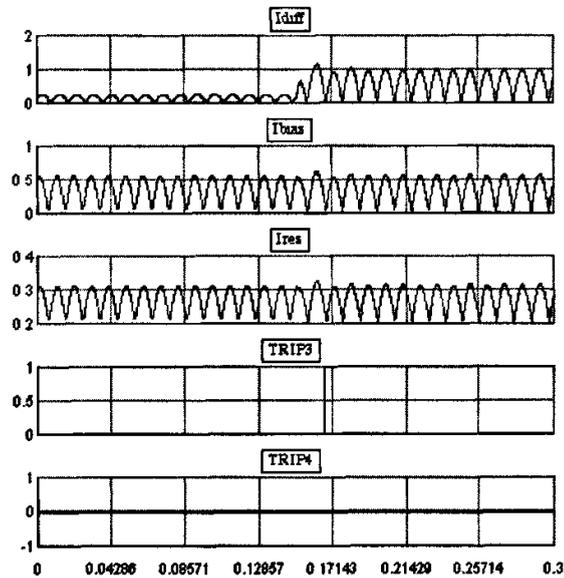


图 5.19 内部故障跳闸信号

Fig. 5.19 The tripping signal on internal fault

通过仿真分析了制动系数 K_1 、 K_2 变化时外部故障的稳定性和内部故障的灵敏度，验证了外部故障的稳定性随着 K_2 的增大而增大，内部故障的灵敏度随着 K_1 的减小而增大的结论。通过新的偏置电流/标称电流倍数-分流电流($I-\Theta$)对数坐标平面，可以有针对性地调节制动系数 K_1 、 K_2 ，

最大限度的发挥判据的效能,很直观的看出制动系数与稳定性和灵敏度的关系。

在内部故障时,由于负荷分流电流有限,制动系数 K_1 取值较小,可以提高差动保护的灵敏度;外部故障时则提高差动保护的制动系数 K_2 ,可以防止不平衡电流引起的误动。

5.4 本章小结

本章首先介绍了 RTDS 的工作原理及其应用,然后介绍了仿真的环境,最后是稳定性与灵敏度比较、负荷电流影响和分流电流系数法的仿真结果,仿真结果证明了前面的理论分析的正确性,并具有一定的实用价值。

第 6 章 结论

随着电力系统的迅速发展,微波和光纤通信的普遍应用,采用电流差动保护原理构成的分相式保护作为输电线路主保护,有效地克服了高频保护装置作为线路主保护所遇到的一些困难。电流差动保护是根据被保护线路各端同名相电流向量和的大小来判断内部或外部故障的,具有原理简单、动作可靠、快速切除故障等优点,其性能主要取决于它所使用的动作判据。

本文首先对全电流差动保护判据和基于故障分量的电流差动保护的判据的灵敏度和稳定性进行了研究,并且详细分析了基于故障分量的电流差动保护判据。而且分析了负荷电流和充电电流对这两种保护判据在输电线路区内故障和区外故障时的影响。然后运用分流电流系数分析法,对各种不同的判据进行研究。

负荷电流对全电流差动保护的灵敏度有很大影响,在重负荷情况下发生高阻故障时容易拒动,为了提高保护在重负荷情况下反应过渡电阻能力,不得不降低制动系数,同时也降低了区外故障的防卫能力。而基于故障分量的电流差动保护可以明显的减少负荷电流对差动保护性能的影响,提高了保护的灵敏度。

充电电流对全电流差动保护有很大影响,对突变量差动保护也有一定的影响,因此需要详细分析充电电流的负面影响,并研究适当的解决办法,促进分相电流差动在超高压长线上的应用,在线路上采取相应的电容电流补偿措施。

差动保护判据是电流差动保护的根本问题。本文提出的分流电流系数法对国内外现有的主要电流差动保护判据进行了总结、比较,并且详细分析了各种判据的灵敏度和稳定性。对该方法从理论上分析后,给出了翔实的仿真试验结果。通过对该方法的分析,可以得知,外部故障的稳定性随着 K_2 的增大而增大,内部故障的灵敏度随着 K_1 的减小而增大。

最后利用实时数字仿真器 RTDS (Real Time Digital Simulator) 对全电流差动保护和基于故障分量的差动保护判据的灵敏度和稳定性进行

了仿真，并仿真了负荷电流对判据的影响。仿真结果验证了前面的理论分析所得结论的正确性，具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] 唐跃中, 顾立新. 变电站综合自动化的趋势、时机和问题, 电网技术, 1996, 20(11): 5-18
- [2] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示, 电网技术, 2003, 27(9): 47-50
- [3] 陈德树. 大电网安全保护技术初探, 电网技术, 2004, 28(9): 14-17
- [4] J S Thorp, A G Phadke. Protecting Power system in the Post-Restructuring Era, IEEE Computer Applications in Power, Jan, 1999: 33-37
- [5] X R Wang, K M Hopkinson, J S Thorp, R. et.al. Developing an Agent-based Backup Protection System for Transmission Networks, Power Systems and Communications Infrastructures for the Future, Beijing, September 2002
- [6] J C Tan, P A Crossley, P G McLaren, et.al. J Ferrall, Application of a Wide Area Back-up Protection Expert System to Prevent Cascading Outages, IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2):375-380
- [7] J C Tan, P G McLaren, P A Crossley, et.al. Sequential Tripping Strategy for a Transmission Network Back-up Protection Expert System. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 68-74
- [8] A G Phadke, J S Thorp. Expose Hidden Failures to prevent cascading outages. IEEE Computer Applications in Power, July, 1996
- [9] David C.Elizondo, J.de la Ree, Arun G.Phadke, Stan Horowitz. Hidden Failures in Protection and their Impact on Wide area Disturbances, IEEE Trans on Power Delivery, 2001:710-714
- [10] Massoud Amin. Toward Self-Healing Energy Infrastructure Systems, the IEEE Computer Applications in Power, Vol. 14, No. 1, January 2001 : 20-28
- [11] S Tamronglak. Analysis of Power System Disturbances due to Relay Hidden Failures. Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, Virginia, March 1994
- [12] S Tamronglak, S H. Horowitz, A G Phadke, et.al. Anatomy of power system blackouts: preventive relaying strategies, IEEE Transmission on Power Delivery, 1996, 11(2)
- [13] J C Tan, P A Crossley, D Kirschen, et.al. An Expert System for the

- Back-up Protection of a Transmission Network IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15: 508-514
- [14] 干绪昭, 杨明玉, 杨奇逊. 二端系统数字式分相电流差动保护跳闸判据的研究, 继电器, 1992: 2-8
- [15] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术, 西安: 西安交通大学出版, 1996
- [16] Y.Akimoto, T.Matsuda 等. 在东京电力公司应用的微型处理机式数字继电保护装置, 译丛, 1981年, 第二期
- [17] 葛耀中. 利用微波通信的继电保护, 西安交通大学科技参考资料, 1979, 2
- [18] [日] 冈村正己, 太田宏次, 输配电线路继电保护, 北京: 水利电力出版社, 1983
- [19] 贺家李, 葛耀中. 超高压线路故障分析与继电保护, 北京: 科学出版社, 1987
- [20] GE power Management. Consideration of Speed, Dependability and Security in Pilot Relaying Schemes, 1-33
- [21] Qian qi-de and Zhu rui-jin. A New Digital Current Differential Protection Based on Optical Channel, International Conference in Power System Protection and Local Control. Beijing, 1994
- [22] 伍叶凯, 邹东霞. 分相式微机电流差动保护灵敏度的研究, 上海交通大学报, 1997, 31(12): 136-141
- [23] 袁荣湘, 陈德树, 马天皓等. 采样值差动保护原理的研究, 电力自动化设备, 2000, 20(1): 1-4
- [24] IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines, IEEE Std C37.113-1999
- [25] 高厚磊, 江世芳. 负荷电流对电流差动保护动作性能影响的分析, 继电器, 1999, 27(1): 14-16
- [26] 罗姗姗, 张源会. 一种分相式电流差动保护微波保护新判据, 电力系统及其自动化学报, 1995, 7(1): 13-18
- [27] 伍叶凯, 员保记. 利用故障分量的分相式电流差动保护, 继电器, 1996, 9(3): 4-9
- [28] 陈卫, 尹项根, 陈德树, 张哲. 基于补偿电压的突变量方向判别原理, 电力系统自动化, 2002, 26(14): 49-51
- [29] 高厚磊, 江世芳. 暂态故障分量电流的计算分析, 山东工业大学学报, 2000, 30(2): 146-152
- [30] 吕延洁, 张保会, 哈恒旭. 基于暂态量超高速线路保护的发展与展望, 电力系统自动化, 2001(5): 56-61

- [31] 李晓华, 张哲, 尹项根, 邰能灵, 陈德树. 故障分量比率差动保护整定值的选取, 电网技术, 2001, 25 (4): 46-49
- [32] 李岩, 陈德树, 尹项根, 张哲. 超高压长线的分相纵差保护方案设计, 电力系统自动化, 2002, 26 (15): 49-51
- [33] 朱声时. 高压电网继电保护原理与技术, 北京: 中国电力出版社, 2005, 203
- [34] 杨经超, 尹项根, 陈德树, 张哲, 胡玉峰. 采样值差动保护动作特性的研究, 中国电机工程学报, 2003, 23 (9): 71-77
- [35] 陈德树, 马天浩, 刘沛. 采样值电流差动微机保护的一些问题, 电力自动化设备, 1996: 3-7
- [36] 柳焕章, 李晓华, 尹项根, 陈德树. 三相同时刻采样值灵敏启动元件, 电力系统自动化, 2003, 27 (9): 52-56
- [37] 王旭昭, 伍叶凯等. 一种适用于双端系统微机微波电流差动保护的跳闸判据, 继电器, 1991, (4)
- [38] 山东工业大学 ABB 公司 REL561 型分相电流差动保护装置介绍及动模试验报告 119951
- [39] 李瑞生, 路光辉, 干强. 用于线路差动保护的电流互感器饱和判据, 电力自动化设备, 2004, 24 (4): 70-74
- [40] 干绪昭, 杨明玉, 杨奇逊. 三端系统数字式分相电流差动保护跳闸判据研究. 继电器, 1992, 7 (3): 2-8
- [41] 廖泽友, 鲍伟廉, 杨维娜等. 高压线路电流差动保护的现状及其前景展望. 继电器, 1999, 27(1): 4-7
- [42] 林湘宁, 何战虎, 刘世明, 杨春明, 刘沛. 复式电流比例差动保护判据的可靠性评估, 中国电机工程学报, 2001, 21 (7): 98-102
- [43] 林湘宁, 刘沛, 徐韬. 一种新的差动保护动作行为分析方法-分析篇, 电力系统自动化, 2003, 27 (24): 32-36
- [44] 冯小玲, 郭峩, 谭建成. 继电保护仿真系统的现状及其应用. 广西电力, 2004, 27(91): 50-52
- [45] 冯小玲, 郭峩, 谭建成. RTDS 实时数字仿真系统在继电保护上的应用, 国际电力, 2005, 8: 43-47
- [46] 李保福, 周泽昕. 基于 RTDS 平台进行双卷变压器本体内部故障的仿真[J]. 东北电力技术, 2001, 10: 46-48
- [47] 毛鹏, 杨立, 杜肖功等. 基于 RTDS 的超高压线路保护装置的试验研究[J]. 继电器, 2004, 3(32): 55-59
- [48] P G McLaren, R kuffel, R Wierckx, et al. A real time digital simulator for testing relays. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 1(7): 207-212

参考文献

- [49] 张庆伟, 谭建成. 基于导数法的电流互感器饱和新判据, 继电器, 2005, 33(3): 21-24

致 谢

衷心感谢导师谭建成教授对本人专业理论知识上给予的大量的指导和关怀，她严谨的治学态度，渊博的学识，以及多年的实践经验都使我受益匪浅。

感谢张庆伟师兄和冯小玲师姐及实验室全体师兄妹的热情帮助和支持。

感谢广西大学电气学院领导为我们提供了良好的研究环境。

最后尤其要感谢家人给予我精神和生活上的支持。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名： _____ 日 期： _____

附录 A 输电线路模型参数

表 A-1 线路选项
Table.A-1 Line options

模型	已换位的	插值	输入选择	最低频率 (Hz)
贝瑞隆(Bergeron)	廿换位	行波时间插值	物理数据	50.0

表 A-2 导线数据
Table.A-2 Conductor data

导线号 # (1 号、2 号、3 号)	导线名称 Chukar	导体类型 交流 (AC)	电压等级 V 110.0kV *
V 三相相位度数 0.0、-120.0、120.0	线路电流 (kA) (交流 有效值/直流峰值) 5.0	线路电流相位 (度) 20.0、-100、140.0	子导体数 2
分裂线子导线半径 2 03454 (cm)	分裂线子导线间距 45.72(cm)	水平方向距离 X -10 0、0 0、10 0 (cm)	塔高 Y 30 0(m)
中部下沉 10.0(m)	直流电阻率 0.03206(ohms/km)	线路长度 100.0(km)	接地电阻率 100.0(ohm/m)

表 A-3 接地导线数据
Table.A-3 Ground wire data

接地导线号	导线名称	导线半径	水平方向距离 X
地线 1、地线 2	7/16 Steel	0 55245 (cm)	-5 0、5.0(cm)
塔高 Y (m) 35.0	中部下沉 (m) 10.0	直流电阻率 2.8645 (ohms/km)	

附录 B 电流互感器 (CT) 参数

图 B-1 电流互感器 (CT) 参数
Fig.B-1 current transformer(CT) parameter

名称	描述	值	单位	最小	最大
NAME	CT Unit Name	CT1			
SIGA	Signal Name	IL1A			
F	Frequency	50.0	Hz	0	
csa	Cross-sectional Area	1.91532e-3	m ²	0.0	
PLen	Path Length	0.4987	m	0.0	
Rini	Initial Remanence	0.0	p.u.		
FLXRS	Enable Flux Reset?	No		0	1
DE	Core characteristics data entry	Vrms,Irms			
Rs	Secondary Side Resitance	0.253	Ohms	0.0	
Ls	Secondary Side Inductance	0.8e-3	H	0.0	
Ratio	Turns ratio	500		0	
Rbi	Burden series resistance	10	Ohms	0.0	
Lbi	Burden series inductance	10e-3	H	0.0	
LoopW	Loop Width	50	%	0	100

附录 C 发电机模型参数

表 C-1 发电机模型参数
Table.C-1 Generator model parameter

名称	描述	值	单位	最小	最大
Name	Source Name	src			
Type	Source Impedance Type:	R			
Tc	Voltage Input Time Constant	0.05	sec	0.0	
ZSeq	Zero Sequence Included	No			
Imp	Impedance Data Format:	RRLValues			
Wv Type	Source Wave Type:	AC			
PPVar	Preprocessor Source Impedance ?	No			
R1s	Resistance (series)	100.0	Ohms	0	1E38
Es	Initial Source Mag (L-L, RMS)	220.0	kV	0.0	
F0	Initial Frequency	50.0	Hz	0	
Ph	Initial Phase	0.0	deg	-360.0	360.0
Tf	Fault Duration	0.10	sec	0.0	
Rf	Source Voltage During Fault	0.50	p.u.	0.0	2.0

附录 D 变压器模型参数

表 D-1 变压器模型参数
Table.D-1 transformer model parameter

Name	Description	Value	Unit	Min	Max
Trf	TransformerName	T1			
YD1	Primary Winding Connection	Delta			
YD2	SecondaryWinding Connection	Y			
Lead	Delta lags or leads Y	Lags			
type	Transformer Model Type	Saturation			
tapCh	Tap Changer (type cannot be Linear)	No			
edge	Tap Trigger on	Rising Edge			
inps	Tap Changer Inputs	RunTime			
Tmva	Transformer rating (3 Phase)	100.0	MVA	0.0001	
f	Base Frequency	50.0	Hz	1.0	300.0
xl	Leakage inductance of Tx	0.1	p.u.	0.001	1.0
NLL	No load losses	0.0	p.u.	0.00	1.0
VL1	Base primary voltage (L-L RMS)	220.0	kV	0.0001	
Im1	MagnetizingCurrent	1.0	%	1E-4	1e3

附录 D 变压器模型参数

续表 D-1 变压器模型参数
Renewal Table.D-1 transformer model parameter

VL2	Base secondary voltage (L-L RMS)	110.0	kV	0.0001	
Im2	MagnetizingCurrent	1.0	%	1E-4	1e3
sproc	Use a separate processor for Tsat?	YES			
Sat	Saturation Placed on Winding	#1			
Xair	Air core reactance	0.2	p.u.	1E-3	10.0
Tdc	Inrush decay time constant	1.0	sec	1E-3	
Xknee	Knee voltage	1.25	p.u.	0	
Lw	Loop width	0	%	0	100

在学期间发表的学术论文及研究成果

- [1] 边宁, 张庆伟, 谭建成, 双比率差动算法的灵敏度和稳定性分析, 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十一届学术年会论文集, 第 08 部分, 2005 年 11 月; 1689-1692
- [2] 边宁, 张庆伟, 谭建成, 双比率差动算法的灵敏度和稳定性分析, 现代电力, 第 23 卷, 第 1 期, 2006 年 2 月; 15-19