

母线和变压器暂态量 保护算法

束洪春 著



科学出版社

非外借

母线和变压器暂态量保护算法

束洪春 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

母线和变压器负责线路与电源之间的连接,是电力系统中重要的枢纽设备。本书首先从故障行波与暂态量应用入手,在分析母线故障与线路故障后各线路电磁暂态过程的基础上,介绍了基于行波极性原理、方向行波原理、电压与电流暂态量波形特征、测后模拟原理的行波母线保护与暂态量母线保护。此外,介绍了电流互感器饱和原理、波形特点及其对传统母线保护的影响,并探讨了电流互感器饱和检测方法。在对变压器励磁涌流产生机理、波形特点进行分析的基础上,介绍了通过正弦拟合、数学形态学等多种数字信号处理方法提取三相差流波形特征,对励磁涌流与内部故障波形进行辨识的一系列方法。最后,介绍了引入电压量的新型变压器保护,从能量表征和模型匹配两个理路实现对变压器内部故障与励磁涌流的快速判别。

本书可供高等院校电气工程专业的学生阅读参考,也可供电力系统相关专业人员研习参考。

图书在版编目(CIP)数据

母线和变压器暂态量保护算法/束洪春著. —北京:科学出版社,2018.9
ISBN 978-7-03-058709-1

I. ①母… II. ①束… III. ①电力系统-母线保护-算法②电力变压器-继电保护-算法 IV. ①TM7②TM07③TM410.35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 205981 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:何艳萍
责任印制:师艳茹 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

艺堂印刷(天津)有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年9月第一次印刷 印张:11

字数:216 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

母线和变压器是在发电厂、变电站内直接参与电力传输的一次设备,母线负责电能在同一电压等级的汇集与分配,变压器负责电能在不同电压等级之间的传输。母线和变压器是输配电系统的关键设备,在电力系统中占有极其重要的地位,在母线或变压器发生故障时,若不能及时检测并切除故障,将会扩大事故范围,毁坏更多设备,破坏电力系统的安全稳定运行,甚至瓦解整个电力系统。因此,探寻性能完善、可靠性高的母线保护与变压器保护原理十分必要。

高压母线通常位于变电站内,发生短路故障的概率很小,而母线保护涉及所有与母线相连的线路与元件。若因人为失误或电流互感器(CT)饱和导致母线保护出现误动作,将导致所有母线上的线路和电源被切除。关于电力系统高压母线是否需要专用的母线保护在历史上曾有过争议,但是随着继电保护技术的发展与电力系统规模的扩大,母线保护的应用已经得到广泛的认可。按照我国《继电保护和自动装置技术规程》(GB14285—2016)的规定,仅在 110kV 单母线接线形式及其以下电压等级无特殊保护要求的情况下才允许不安装专门的母线保护,而使用其他设备的后备保护覆盖母线。因为母线保护包括所有连接在母线上的元件,所以母线保护有时也称为母线区域保护,虽然这个术语能更好地描述母线保护,但应用并不广泛,并且大多数工程师习惯于将这类保护简单地称为母线保护。为降低人为接线失误的影响,母线保护的架构从最初集中式逐渐发展到分布式母线保护。通过将数据采集单元下放至各个开关柜内,分布式架构降低了集中式对二次电缆接入与屏柜布线的要求,在一定程度上降低了因人为失误导致接线错误引起母线保护误动作的可能性。针对 CT 饱和问题,目前在工程上主要通过电压启动元件与其他启动元件之间的启动时差,以及谐波制动对 CT 饱和进行检测,但是工频量保护采样率低,不同启动元件的启动时间可能相差无几,不易判别,而谐波制动可能会受到线路故障产生的谐波影响,故 CT 饱和导致母线保护误动作的隐患依然存在,因此准确而快速地辨识母线区内故障与区外故障仍然是母线保护研究的重点。

传统工频量母线保护主要通过比较各回路工频电流幅值、相位来判别故障点是否位于母线,但是若在暂态过程中出现较大的一次电流,尤其是包含较大非周期分量时,可能导致 CT 因铁心磁饱和而无法准确传变工频波形,进而影响基于工频量差动原理的母线保护对故障的准确判别。基于工频电流相位原理的母线保护受 CT 饱和影响较小,但是不适用于母线故障后各回路电流相位相差较大或有电流

流出的情况,导致传统工频量母线保护在 3/2 接线等复杂接线形式下依然存在发生误动作的危险。

随着行波保护技术的发展,行波保护因不受 CT 饱和影响的特点受到学术界关注。我国学者薄志谦提出利用小波变换提取电流行波波头特征,通过提取高频暂态量中包含的故障信息构建母线保护算法,根据电流初始行波波头极性信息对母线保护区内故障与区外故障进行判别。通过引入母线暂态电压,又相继提出了基于短时窗方向行波、暂态功率方向等原理的母线保护算法,将对初始行波波头的捕捉转变为对短时窗内行波传播方向与暂态能量的检测,降低了对采样率和波头捕捉准确性的要求。我国学者索南加乐通过计算母线暂态等效阻抗模型及参数,提出了基于瞬时阻抗与模型参数识别的母线保护算法,将暂态电压与电流的检测拓展为对母线—线路系统等效模型的分析。

虽然行波母线保护与暂态量母线保护都是利用母线故障后产生的暂态电气量特征构成保护,但就构成思想而言,暂态量母线保护是对行波母线保护的继承和发扬。为了便于对照,本书以行波母线保护为切入点,在阐述行波功率方向比较式母线保护、行波电流极性比较式母线保护、行波电流差动式母线保护和积分型行波幅值比较式母线保护等原理的基础上,对暂态量母线保护(包括基于含工频频带故障电流突变方向的母线保护、基于电流小波系数相关分析的母线保护和基于测后模拟的暂态量母线保护等)进行了原理上的剖析,以及保护动作特性的仿真分析。其中,行波功率方向比较式母线保护根据当且仅当母线故障时所有出线的初始行波功率方向才会一致的原理来构建保护判据;行波电流极性比较式母线保护根据当且仅当母线故障时所有出线的初始电流行波波首波头极性才会全部相同的原理来构建保护判据;行波电流差动式母线保护根据当且仅当外部故障时与母线相连的各回出线所测得的初始电流行波的幅值之和才会为零的原理来构建具有比率制动特性的保护判据;积分型行波幅值比较式母线保护根据当且仅当母线故障时所有出线所检测到的初始行波才全部是正向行波的原理来构建保护判据。基于含工频频带故障电流突变方向的母线保护是利用初始故障电流含工频量所在频带的突变方向来取代初始电流行波波首波头极性来构成保护判据;基于测后模拟的暂态量母线保护根据当且仅当母线故障时母线上所有出线才能等效为无故障(RL)电路模型的原理来构成保护判据。对于母线上所有出线观测端,母线故障时都为反方向故障,而线路故障时,除发生故障的线路为正方向故障,其他无故障线路为反方向故障,分别利用高阶差分(SOD)、电压电流短时窗小波系数相关分析、前行波与反行波短时窗积分等方法来判断故障是正方向故障还是反方向故障,以实现母线保护的区内故障与区外故障的区分。此外,本书还针对传统保护面临的 CT 饱和问题及其对策展开了研究,并提出了 CT 饱和的过零点检测方法、基于小波原理的时差检测方法和基于 CT 二次输出电流与其差分构成的平面上相邻点距离判别的检测等方法。

变压器本身为一种铁磁元件,当变压器空载合闸时,其磁链不能突变,从而产生非周期磁链,使得变压器铁心饱和,变压器励磁电感降低,变压器合闸一侧将出现数值很大且偏向时间轴一侧的电流,进而导致变压器两端差流大幅增加,该特征与内部故障类似,故变压器保护的关键在于励磁涌流与变压器内部故障之间的区分。早在 1892 年,英国的 Fleming 就发现了励磁涌流现象,但直到 20 世纪 40 年代人们才开始重视该现象,并对其进行了深入的研究。明确变压器励磁涌流的产生机理与波形特征,有助于励磁涌流的可靠识别,可有效提高变压器差动保护的正确动作率。

目前变压器的主保护为利用电气量的纵联差动保护和非电气量的瓦斯保护。其中纵联差动保护利用变压器一次侧电流与二次侧电流的差作为差流以评定内部故障,该方法对内部故障和外部故障有较强的辨识能力。变压器差动保护建立在变压器稳态磁路平衡的基础上,在暂态过程中这种平衡关系可能被打破,变压器空载合闸、过励磁等情况下,由磁路饱和产生的涌流会引起差动保护误动作。变压器差动保护的难点在于对涌流和内部故障的可靠识别。

本书从基于工频量的变压器差动保护原理切入,探讨励磁涌流与和应涌流的产生机理及其对工频量差动保护的影响,对励磁涌流和内部故障的波形特点进行分析。根据内部故障稳态电流为正弦波形而励磁涌流含有较多二次谐波,波形偏向零轴一侧的特点,利用发生内部故障或励磁涌流后一段数据进行正弦拟合,比较拟合波形与采样数据的相似度以区分励磁涌流和内部故障。利用励磁涌流和内部故障在波形复杂程度和时频特征不同的特点,分别通过多重分形谱和时频矩阵进行励磁涌流和内部故障的鉴别。通过 Park 变换对突变量的放大作用,内部故障情况下的波形突变更为明显,再利用小波分解提取突变量中的高频成分,以高频成分的大小来区分内部故障和励磁涌流。根据内部故障下差动电流在其相邻阶次差分构成的平面上分布均匀,而励磁涌流情况差动电流在此平面上分布散乱的特点,利用差动电流与其相邻阶次差分构成的平面上相邻点距离的大小建立励磁涌流识别原理。变压器发生内部故障时,变压器等效电路模型随之改变,模拟波形和实测波形出现负相关,而发生励磁涌流时,模拟波形和实测波形相关度为正,利用正常运行时的电路模型可由一次侧电压和电流计算出二次侧线模电压,根据计算值和量测值的相似程度反映模型匹配程度,判别内部故障与励磁涌流。在发生励磁涌流时,变压器一次侧与二次侧消耗的能量都趋向于 0,能量差也趋向于 0,在发生内部故障时,一部分能量会经故障点流入大地,变压器两侧吸收与输出的能量大小不同,导致出现较大的能量差。

本书的相关研究得到了国家自然科学基金重点项目“基于数据驱动的高原山地输电线路故障精确定位与雷击电流反演恢复研究”(U1202233)、云南省自然科学基金重点项目“高原山地输电线路雷击检测识别及雷电参数反演恢复研究”

(2011FA032)、云南省科技厅攻关项目“高海拔大容量远距离输电中行波故障测距技术研究”(2003GG10)和“高原山地长距离高压输电线路电弧故障检测定位技术与系统研制”(2000B2-02),以及云南省自然科学基金面上项目“新型时域法故障测距研究”(99E006G)和“小波分析在线路故障测距应用研究”(98E0409M)等的资助,同时,在与电网业界同行合作的一系列项目中有相当部分内容得到实际应用,一并谨致谢忱。

限于作者水平,书中难免存在疏漏与不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2018年4月于昆明

目 录

前言

第 1 章 行波母线保护	1
1.1 行波功率方向比较式母线保护	1
1.2 行波电流极性比较式母线保护	7
1.3 行波电流差动式母线保护	13
1.4 积分型行波幅值比较式母线保护	20
1.5 本章小结	26
第 2 章 暂态量母线保护	28
2.1 基于含工频频带故障电流突变方向的母线保护	28
2.2 基于电流小波系数相关分析的母线保护	36
2.3 基于 S 变换的母线保护	40
2.4 基于 SOD 的暂态量极性比较式母线保护	44
2.5 基于电压电流短时窗小波系数相关分析的母线保护	49
2.6 基于方向行波原理的暂态量母线保护	53
2.7 基于测后模拟的暂态量母线保护	57
2.8 本章小结	61
第 3 章 CT 饱和及对母线保护的影响和检测方法	63
3.1 CT 饱和原理	63
3.2 CT 饱和特点及其对母线保护的影响	65
3.3 CT 饱和检测方法	67
3.4 本章小结	79
第 4 章 变压器涌流产生机理分析	80
4.1 励磁涌流产生机理	80
4.2 和应涌流产生机理及对差动保护的影响	86
4.3 本章小结	100
第 5 章 变压器励磁涌流识别	101
5.1 基于正弦拟合的励磁涌流识别	101
5.2 基于数学形态学的励磁涌流识别	108
5.3 基于多重分形谱的励磁涌流识别	113
5.4 基于时频分析的励磁涌流识别	118

5.5 基于 Park 变换的励磁涌流快速识别	124
5.6 基于差动电流相邻阶次差分构成的平面上相邻点距离的励磁涌流快速识别	128
5.7 基于差动电流梯度熵值的励磁涌流识别	134
5.8 基于差动电流梯度归一化的励磁涌流识别	137
5.9 基于差动电流顶点两侧采样点差值的励磁涌流识别	140
5.10 基于形态学骨架的励磁涌流识别	141
5.11 本章小结	144
第 6 章 增加电压检测量的新型变压器保护	145
6.1 基于测后模拟原理的变压器保护	145
6.2 基于变压器两侧能量差原理的变压器保护	155
6.3 本章小结	159
参考文献	160

第 1 章 行波母线保护

母线故障是电网故障类型中的一种极端情况,造成的短路电流往往很大,对发电机等电源造成的影响极大,故对母线保护的准确性、可靠性与速动性往往有极高的要求。但是母线上回路较多,工况千差万别,加之母线接线形式多,电流互感器(CT)易饱和,母线接近电源导致直流分量衰减时间常数大等多种因素影响,传统工频量母线保护难以完全满足工程需求。目前现场工程中所使用的工频量母线保护以差动原理为主,辅以电流相位比较式保护、过流保护、电压闭锁元件等,通过比较各回路工频电流幅值、相位以及母线电压等变量对母线区内故障与区外故障进行判别。但是作为主保护的差动保护会受到 CT 饱和影响,二次电流波形可能严重失真,故需要专门的 CT 饱和检测元件在较长时窗内进行配合,这在一定程度上降低了保护速动性。而通过比较工频电流相位的母线保护原理受 CT 饱和影响较小,但是难以适应各回路相角差很大的情况。

行波母线保护原理是在线路保护行波原理研究基础上逐步发展而来的。利用暂态故障分量实现的超高速行波母线保护不但能够规避传统母线差动保护受负荷电流、CT 饱和及过渡电阻等影响的问题,而且可以进一步提高保护的速动性和灵敏性。目前,就理论和方案而言,基于行波原理的母线保护研究已经比较深入,但是初始行波转瞬即逝,难以可靠测量与捕捉,使得行波母线保护的可靠性和实用化还需要进一步研究。

1.1 行波功率方向比较式母线保护

单母线接线方式的故障附加网络如图 1-1 所示,当发生母线区内故障时,在附加电源 $-U_f$ 的作用下将产生由故障点向各回路传播的电压行波和电流行波,而在发生母线区外故障时,故障初始行波由故障点经线路传播至母线,通过母线向其他回路继续传播。

设母线上第 k 条回路的出口处均可检测到初始电流行波 i_k 和初始电压行波 u_k ,定义第 k 条线路初始行波功率为

$$S_k = u_k i_k, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (1-1)$$

以单母线接线形式为例,设电流方向和功率方向都是以母线流向线路为正,当

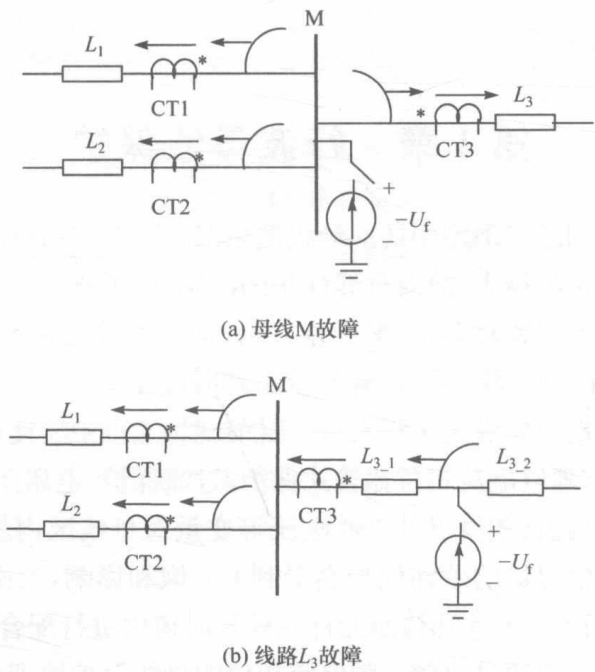


图 1-1 单母线接线方式的故障附加网络

分别发生母线区内故障与区外故障时各线路的初始行波功率方向如表 1-1 所示。

表 1-1 初始行波功率方向

故障位置	附加电 源极性	母线电压 行波极性	线路电流行波 i_k 极性			初始行波 功率方向
			L_1	L_2	L_3	
母线区内 故障	+	+	+	+	+	所有回路 $S_k > 0$
	-	-	-	-	-	
母线区外 L_3 回路故障	+	+	+	+	-	S_k 符号不一致
	-	-	-	-	+	

如表 1-1 所示,通过比较不同出线的暂态行波功率方向可以判别母线是否发生了故障。若与母线相连的所有回路上测得的行波功率方向一致,则判为母线区外故障;若至少有一个回路的行波功率方向与其他回路的行波功率方向不一致,则判为母线区外故障。基于此,设行波功率方向一致性函数为

$$S = \prod_{k=1}^n S_k \begin{cases} > 0, & \text{母线区内故障} \\ \leq 0, & \text{母线区外故障} \end{cases} \tag{1-2}$$

行波功率方向比较式母线保护的流程如图 1-2 所示。其中, $\tau_{\min}$ 为故障行波从最短线路首端传播至末端所需时间。

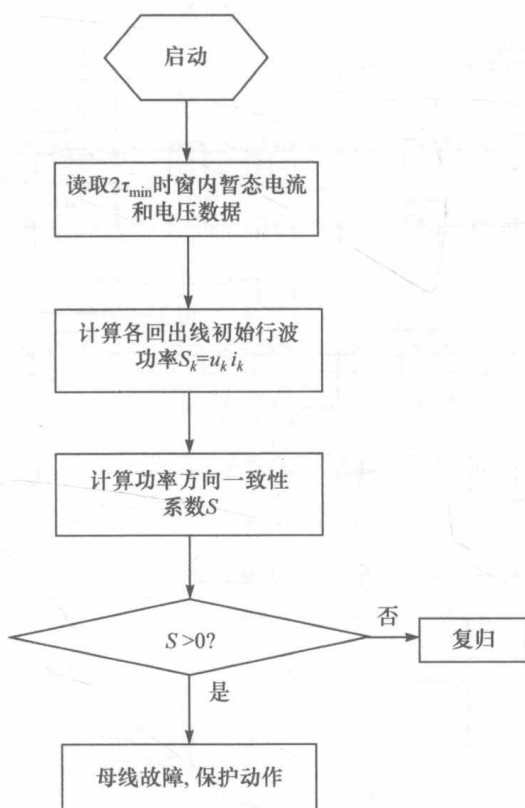


图 1-2 行波功率方向比较式母线保护流程图

仿真系统如图 1-3 所示,采样频率为 500kHz,故障初相角为 90° 。母线侧电流互感器 CT1、CT2、CT3 构成母线 M 侧保护,CT4、CT5、CT6 构成母线 N 侧保护。将三相电流和三相电压分别按 Karenbauer 变换矩阵进行相模变换,可以得到含故障相的线模电流和线模电压。定义 i_1 、 i_2 和 i_3 分别为与母线 M 相连的 CT1、CT2 和 CT3 测量计算得到的含故障相的线模电流行波; i_4 、 i_5 和 i_6 分别为与母线 N 相连的 CT4、CT5 和 CT6 测量计算得到含故障相的线模电流行波。当母线 M 故障时,含故障相的线模电流行波、线模电压行波如图 1-4 所示。母线区外故障设于线路 L_4 ,含故障相的线模电流行波、线模电压行波如图 1-5 所示。采样时窗选择均小于 $2\tau_{\min}$,其中 $\tau_{\min}$ 为故障行波在与母线相连的最短出线全长的传播时间,仿真系统中与母线相连的最短出线的长度为 180km,由 $2\tau_{\min} = 2l_{\min}/v$ 计算得到 $2\tau_{\min} = 1.2\text{ms}$ 。

由图 1-4 可知,母线 M 侧功率方向比较结果为 $S_k = \{195.2, 185.6, 185.3\}$;母线 N 侧的功率方向比较结果为 $S_k = \{-42, 39.008, 6.4\}$,据式(1-2),此时母线 M 保护判别式 $S > 0$,N 侧保护判别式 $S < 0$,据此判为母线 M 故障。

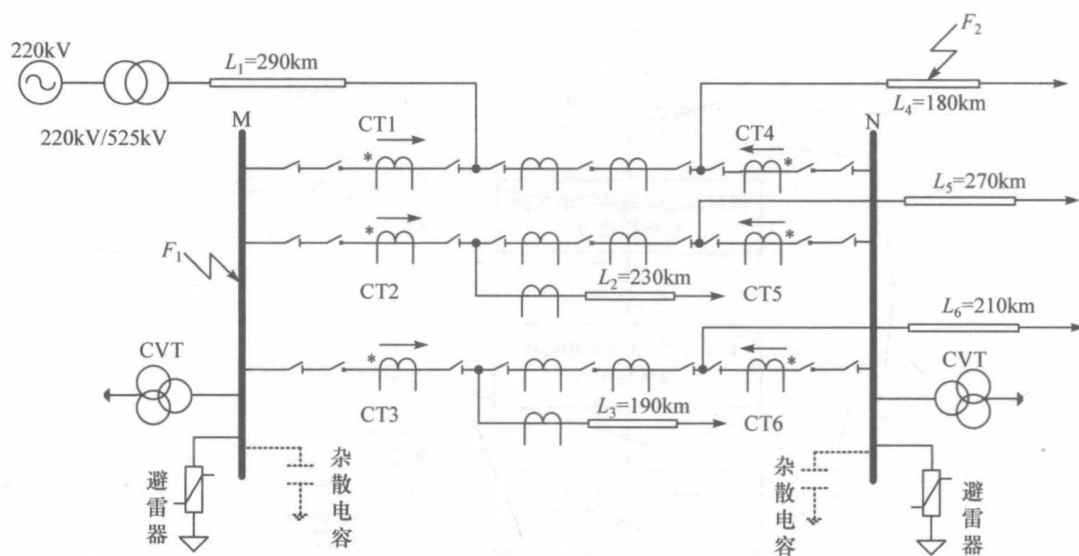
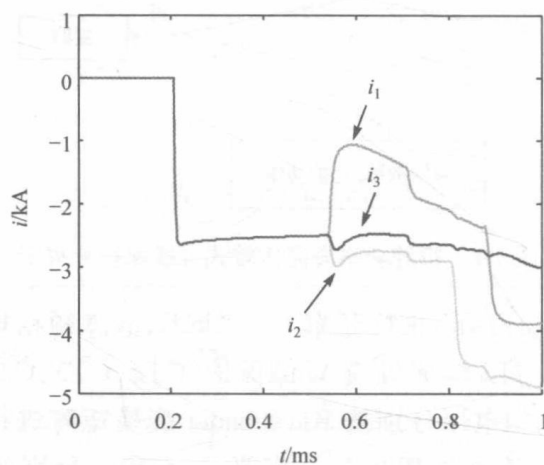
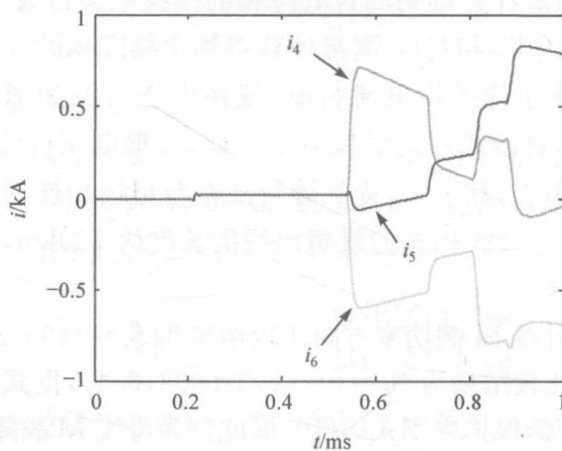


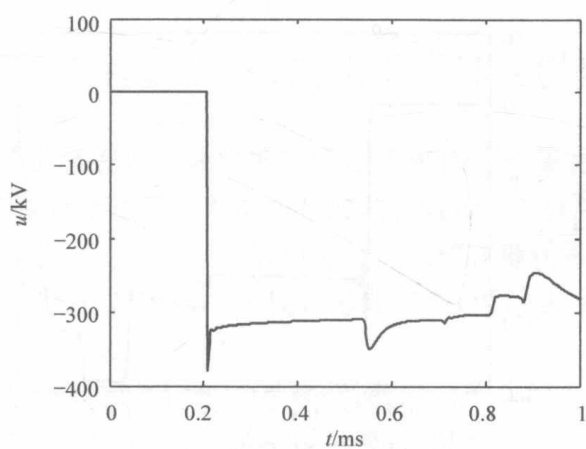
图 1-3 仿真系统图



(a) M侧的含故障相线模电流

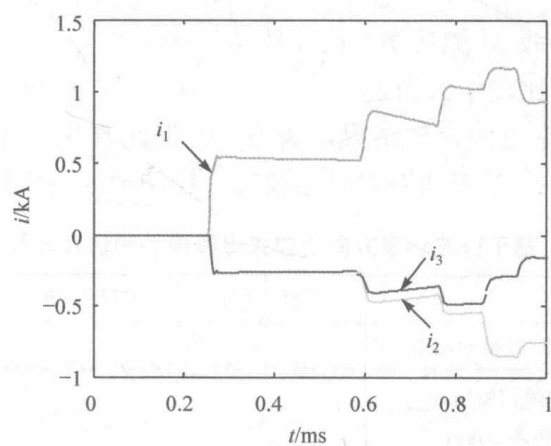


(b) N侧的含故障相线模电流

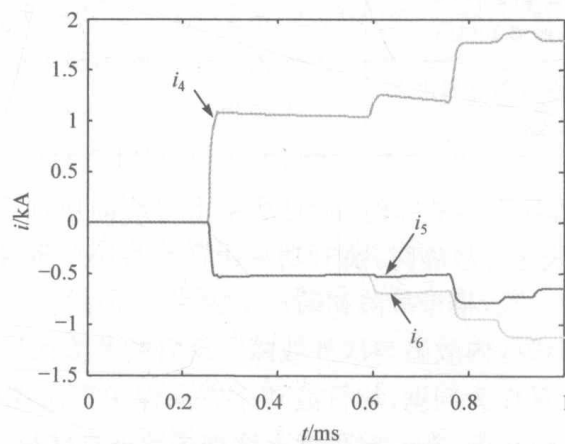


(c) 含故障相母线线模电压

图 1-4 母线 M 故障时含故障相线模电流行波和线模电压行波



(a) M侧的含故障相线模电流



(b) N侧的含故障相线模电流

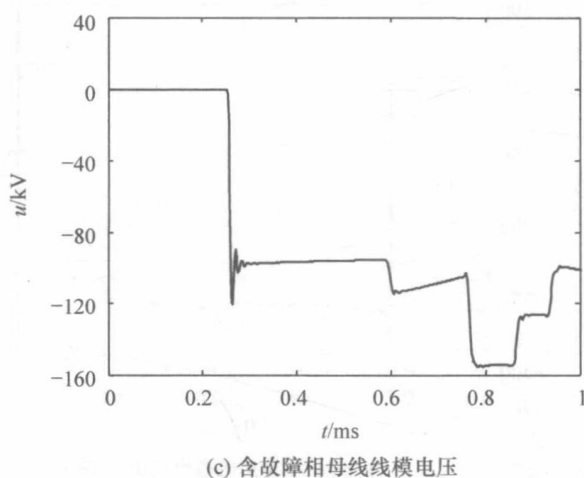


图 1-5 母线区外故障时含故障相线模电流行波和线模电压行波

由图 1-5 可知,母线 M 侧功率方向比较结果为 $S_k = \{-1.368, 0.888, 0.888\}$; 母线 N 侧的功率方向比较结果为 $S_k = \{-21.6, 10.968, 10.968\}$, 据式(1-2), 此时母线 M 侧、N 侧的功率方向比较结果都为 $S < 0$, 据此判为母线区外故障。表 1-2 为线路不同故障情况下, 基于功率方向比较式母线保护的判别结果。

表 1-2 基于行波功率方向比较式母线保护的仿真计算示例

故障类型	母线 M 侧	母线 N 侧	判别结果
母线 M 发生金属性 AG 故障, 故障初始角 90°	>0	>0	母线区内故障
出线 L_1 发生 AG 故障, 故障初始角 90° , 过渡电阻 10Ω , 故障距离 20km	<0	<0	母线区外故障
出线 L_2 发生 AG 故障, 故障初始角 60° , 过渡电阻 100Ω , 故障距离 100km	<0	<0	
出线 L_3 发生金属性 AG 故障, 故障初始角 30° , 故障距离 185km	<0	<0	

由表 1-2 可知, 母线区内故障时, 瞬时功率由母线向所连回路进行传播, 瞬时功率方向一致, 而母线区外故障时, 瞬时功率由产生故障的回路传至母线, 母线上回路功率方向不完全一致, 根据故障初瞬产生的瞬时功率方向, 行波功率方向母线保护算法能够判别母线区内故障与区外故障。现有的差流保护由于现有工频量母线保护极少使用功率量作为判据, 故行波功率方向保护算法在原理上有一定的创新性。因算法引入了电压量, 在一定程度上增加了数据存储量, 且要求电流行波波头和电压行波波头的精确捕捉与同步对时, 对硬件有较高要求, 工程实现存在一定难度。

1.2 行波电流极性比较式母线保护

常规电磁式 CT 的暂态响应基本能够满足正确传变电流行波的要求,但是因为引入了电压量,需保证电流行波与电压行波的有效传变与同步,所以行波功率方向比较式母线保护存在一定缺陷。行波电流极性比较式母线保护只采用电流行波信息构成保护,较之于行波功率方向比较式母线保护,可以从原理上躲过 CVT 传变特性对保护的影响。

由图 1-6(a)可见,母线 M 上 F_1 点故障时,故障点产生的电流行波将由母线向所有回路传播,各 CT 检测到初始电流行波的极性相同。

由图 1-6(b)可见,母线区外 F_2 点故障时,故障处产生的电流行波将向线路两侧传播,一部分传到对侧母线,另一部分传到母线 M 发生反射、折射,检测到出现故障的回路初始电流行波与非故障线路初始电流行波的极性相反。

规定电流方向以母线流向线路为正, P_k 表示与母线相连的第 k 条出线上检测到初始电流行波正极性, $\bar{P}_k$ 为其反极性,当电流极性为正时, $P_k=1, \bar{P}_k=0$,当电流极性为负时, $P_k=0, \bar{P}_k=1$,则根据上面的分析可以得到行波电流极性比较式保护的判别式为

$$D_M = \prod_{k=1}^n P_k + \prod_{k=1}^n \bar{P}_k \quad (1-3)$$

当 $D_M=1$ 时,判定为母线区内故障;当 $D_M=0$ 时,判定为母线区外故障。

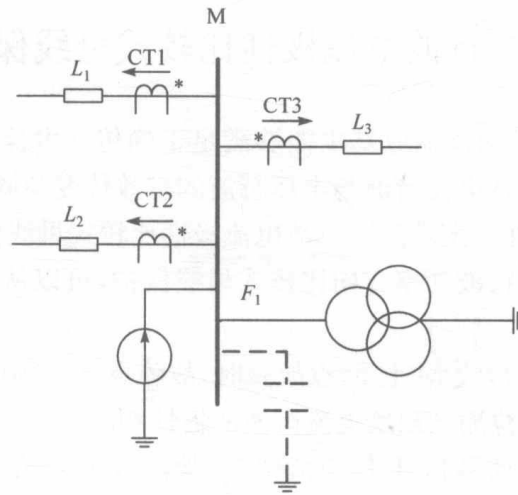
考虑到母线保护的動作判据应针对不同母线形式实现,下面以超高压电网中广泛应用的 3/2 断路器接线形式的母线为例进行讨论。

如图 1-3 所示,线路 L_4 上 F_2 点发生 A 相故障时,母线 M:CT2、CT3 上测量并计算得到的含故障相线模电流初始行波极性相同,与 CT1 测量并计算得到的含故障相线模电流初始行波极性相反。母线 N:CT5、CT6 测量并计算得到的含故障相线模电流初始行波极性相同,与 CT4 上测量并计算得到的含故障相线模电流初始行波极性相反。

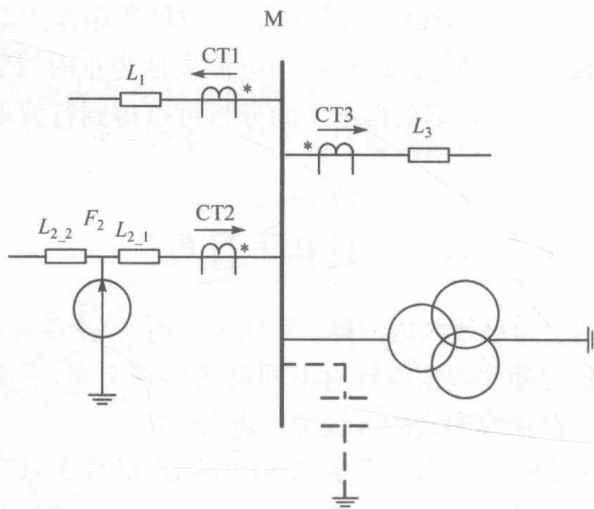
母线 M 上 F_1 点发生 A 相故障时,故障母线 M:CT1、CT2、CT3 上测量并计算得到的含故障相线模电流初始行波极性相同。非故障母线 N:CT4、CT5、CT6 上测量并计算得到的含故障相线模电流初始行波极性不相同。

行波电流极性比较式母线保护的流程图如图 1-7 所示。

仿真系统如图 1-3 所示,采样频率为 500kHz, F_1 、 F_2 均为 A 相金属性接地故障,故障初始角为 90° 。对线模电流做小波变换得到其模极大值提取初始行波突变极性,小波基函数为 db3 小波。定义 i_1 、 i_2 和 i_3 分别为与母线 M 相连的 CT1、



(a) 母线上 F_1 点故障



(b) 母线区外 F_2 点故障

图 1-6 单母线接线的故障附加网络

CT2 和 CT3 测量计算得到的含故障相的线模电流行波; i_4 、 i_5 和 i_6 分别为与母线 N 相连的 CT4、CT5 和 CT6 测量计算得到含故障相的线模电流行波。母线 M 故障时,线模电流行波及其第三尺度小波变换结果如图 1-8 所示。线路 L_4 上故障时,线模电流行波及其第三尺度小波变换结果如图 1-9 所示。

由图 1-8(a)可知,母线 M 侧 CT1、CT2、CT3 上测量计算得到的含故障相线模电流初始行波的小波模极大值 $W = \{-1.22, -1.66, -1.66\}$,此时 M 侧母线保护的电流行波极性判别结果为 $D_M = 1$;而图 1-8(b)中母线 N 侧 CT4、CT5、CT6 上测