

第 1 章 绪 论

1.1 现代电力系统

最早的发电机、电动机都是直流电机,照明设备也是直流设备。因为传输距离近,当时没有电网的概念。自从 1886 年美国西屋公司的交流输电方案中标魁北克电网,世界电力系统变成了交流电网。由于交流易于通过变压器变换电压等级,因此输电距离越来越远,发电机和负荷越来越多,就逐渐形成了电网。我国、俄罗斯等国家交流电网的频率是 50Hz,美国、韩国等国家交流电网的频率是 60Hz。我国交流高压电网电压等级包括 110kV、220kV、330kV、500kV、750kV、1000kV,国外电压等级包括 132kV、232kV、400kV、765kV。需要说明的是,直流输电并未停止发展革新,伴随着远距离、大功率传输需求,直流输电这些年得到了快速发展,直流传输容量不断增大,直流电压等级也不断提高,电压等级包括 $\pm 320\text{kV}$ 、 $\pm 400\text{kV}$ 、 $\pm 500\text{kV}$ 、 $\pm 800\text{kV}$ 、 $\pm 1100\text{kV}$ 等。截至 2021 年年底,我国建成并投运的直流输电系统有 40 个,输电线路总长度达到 47432km,额定输送容量为 200GW。

我国和世界电网规模都在不断增大,截至 2021 年年底,全世界发电装机容量为 8011GW,全世界发电量为 26960TW $\cdot$ h,我国发电装机容量为 2377GW,占比全世界 29.7%,总发电量达到 8376.8TW $\cdot$ h,占全世界发电量的 31.1%。近年来,为解决环境问题并应对能源危机,以新能源发电为标志的电力系统建设步入了“快车道”。全世界光伏发电装机容量为 848GW,风电发电装机容量为 823GW,我国光伏装机为 310GW,占比 36.6%,风电装机为 330GW,占比 40.1%。我国光伏发电量为 327TW $\cdot$ h、风电发电量为 655.6TW $\cdot$ h,分别占比全世界发电量 39.4%和 41.3%。表 1-1 展示出了我国和世界主要国家电力系统规模的对比情况。

表 1-1 2021 年我国电网规模和其他国家对照

	总装机	总发电量	光伏装机	光伏发电量	风电装机	风电发电量
世界	8011GW	26960TW $\cdot$ h	848GW	830.7TW $\cdot$ h	823GW	1588.6TW $\cdot$ h
中国	2377GW	8376.8TW $\cdot$ h	310GW	327TW $\cdot$ h	330GW	655.6TW $\cdot$ h
美国	1200GW	4115.4TW $\cdot$ h	90GW	116TW $\cdot$ h	130GW	341.8TW $\cdot$ h
欧洲	1240GW	3602TW $\cdot$ h	72GW	68.4TW $\cdot$ h	107GW	209.3TW $\cdot$ h



中国数据来源：《2021 年全国电力工业统计快报一览表》

（中国电力企业联合会）



世界数据来源：《2022 年可再生能源报告》

（国际可再生能源署）

特别的标志性事件有：我国于 2011 年建成全世界电压等级最高的 1000kV 交流输电线路，输电容量达 500 万 kW；2018 年建成全世界电压等级最高的 ± 1100 kV 直流线路，传输距离达 3300km，传输容量达 1200 万 kW；2019 年建成全世界电压等级最高、容量最大的 ± 500 kV 张北四端柔性直流电网，主力电源容量为 500 万 kW；2020 年建成 ± 800 kV 乌东德柔性直流和传统直流混合的混合柔直电网。

可以毫不夸张地说，中国已经建成全世界电压等级最高、直流输电占比最高、消纳新能源发电最多的交直流混联大电网。

1.2 现代电网对于继电保护的要求

如此巨大的人造能源网络，是人类征服自然、改造自然的壮举。同样地，如此庞大的系统和众多的发电机、变压器和电力线路在运行中难免出现故障，包括短路和断线等。继电保护是检测并自动清除故障的技术，通过快速检测并熔断自身（熔断器、保险丝）来隔离故障设备或者控制断路器跳闸来切除故障设备，从而达到保证故障设备不会因为故障而损坏、非故障电网继续安全运行的目的。它是电力系统的安全卫士，是电力系统第一道安全防线，是保障电网建设和运行最为重要的技术之一。现代电网对继电保护提出了更高的要求：

（1）可靠性。要求继电保护在故障时必须可靠动作以清除故障设备、非故障时可靠不动作。衡量可靠性的主要指标是继电保护正动率，目前我国继电保护的动率大约为 99.99%，还希望进一步提高。

（2）选择性。要求继电保护仅仅清除故障设备，不能切除非故障设备，以免造成故障停电范围的扩大和蔓延，甚至导致连锁反应。选择性要求是至关重要的。如果超（特）高压电网中的线路、发电机、变压器发生了故障，继电保护一般都能有选择性地动作，切除故障设备。但是我国配电网由于网架结构和技术原因，迄今不能做到有选择性地切除故障区段，一般来讲是从变电站出线位置配置继电保护装置，如果该馈出线路发生故障，则从变电站出线处切除整条线路，毫无疑问，扩大了故障停电范围，不符合选择性要求。对于大电网，又存在另外一个问题，就是故障设备被切除后，互联电网会发生潮流转移并导致功率失衡，造成过负荷或者系统振荡，由于过负荷和振荡表现出来的特征和故障很相似，因此高压线路必不可少的后

备距离保护可能不正确动作,此时故障虽然被正确地切除,但却造成了次生灾害。这个后果往往比单纯的电气设备故障更为严重,波及范围更为广泛。著名的美加大停电、印度大停电和巴西大停电中 70% 的故障都与后备继电保护不正确动作有关。

(3) 快速性。既然是故障,就要快速清除,继电保护动作越快,故障对于电气设备和电网的损害程度越小。目前我国的高压线路和发电机、变压器的动作时间大约是数十毫秒。但是张北柔直电网建设给继电保护提出了特别苛刻的要求:动作时间小于 3ms。原因是柔性直流电网是以多电平换流器为核心构建的电压源型直流电网,由于换流器输出电压稳定为常数,因此,当线路发生故障时,会出现巨大的短路电流,类似于交流电网。但是直流短路电流没有过零点,短路产生的电弧难以熄灭,因此直流断路器的开断容量有限。基于此,张北柔直工程提出动作时间小于 3ms 的继电保护动作速度要求,这无疑给继电保护提出了巨大的挑战。

(4) 灵敏性。要求继电保护既能检测出严重故障,也能检测出轻微的故障。有关灵敏性的话题,大家在本科教科书上学习过,任何继电保护不仅要能开断最大运行方式下靠近被保护线路首端的三相短路,还要能开断最小运行方式下被保护线路末端发生的两相短路,并且要有一定的裕度(可靠系数)。近年来,新能源发电大量接入电网,给传统的继电保护提出了挑战,原因是:新能源发电一般经逆变器接入电网,而逆变器输出的电流是受控的,即使发生短路,短路电流也不会增加很大,现有继电保护不能灵敏地检测出故障。更有甚者,由于酒泉、陕西多地发生的电弧接地故障,在电力系统现场提出了能够检测出中性点非有效接地系统单相经数千欧的双高系统接地故障(中性点高阻抗、接地点高阻抗,回路接地电流毫安级)的要求,直接挑战继电保护的极限。

1.3 现代电力继电保护的系統構成

19 世纪后期,熔断器开始应用于电力系统,它通过感受电流增大并熔断自身达到隔断短路的目的,从而保证故障电气设备不损坏、不故障设备不停电。19 世纪 30 年代,美国物理学家约瑟夫·亨利在研究电路控制时利用电磁感应现象发明了继电器,它利用电磁铁在通电和断电下磁力产生和消失的现象来控制另外一个高电压大电流电路的开合,它的出现使得电路的远程控制和保护等工作得以顺利进行。继电器是人类科技史上的一项伟大发明创造,它不仅是电气工程的基础,也是电子技术、微电子技术的重要基础。当继电器用于电力系统保护之后,就出现了一个固化的专业术语,继电保护。

从电磁式继电保护起,继电保护经历了四个发展阶段:电磁式继电器、晶体管继电器、集成电路继电保护装置、微机继电保护装置。1969 年,美国人 Rockfeller

提出了计算机保护的概念,但真正实现并广泛应用的是基于单片机的微机继电保护,迄今依然是继电保护最主要的构成形式。图 1-1 示出了微机继电保护的系统构成,主要包括数据采集系统、微型机主系统和输入/输出系统。图 1-2 示出了一个微机继电保护装置实物图。

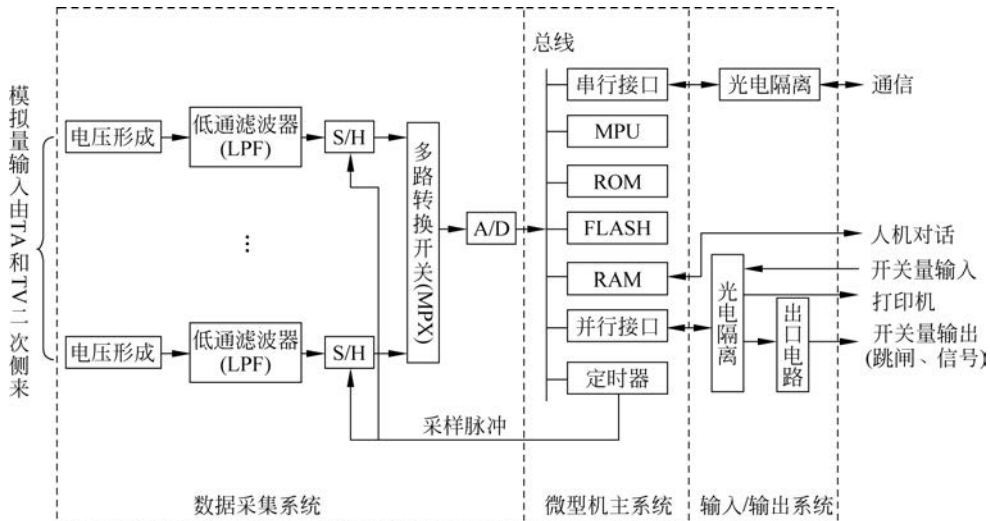


图 1-1 微机继电保护装置硬件构成



图 1-2 特高压输电线路数字式行波差动保护装置实物图

21 世纪初,由 ABB、西门子、ALSTOM 等公司共同提出了数字变电站(我国称为智能变电站)的概念和相关标准,并为此制定了著名的数字变电站规约 IEC 61850,迄今还是国内外继电保护学术会议的主题。该规约的基本出发点是:在一个变电站的不同电气设备可以进行电压、电流采样,而这些采样值是可以被共享的,不同制造厂家获取的采样数据可以相互使用,避免了重复性采样,简化了二次系统的构成,而且可据此改善传统继电保护和控制的性能。数字变电站的主要构成包括非传统互感器(包括光学互感器和电子式互感器,在中国实践中由于可靠性问题被暂时停用)、数据合并单元(merging unit, MU)、继电保护装置、智能终端单元。其本质区别是把微机继电保护中的数据采集系统(数据合并单元)、继电保护装置(微型

机主系统)和输入/输出系统(智能终端单元)分离,以增加透明度和采样数据的其他应用。

从微机继电保护和基于 IEC 61850 标准的数字变电站(智能变电站)的构成体系不难看出,现代继电保护仅仅是在微机硬件平台和通信系统支持下的一个继电保护判据和软件算法。这也从客观上为实现各种原理先进但构成相对复杂的继电保护创造了条件。

1.4 本书的内容安排

编写本书的目的首先是反映清华大学继电保护课题组和国内外同行在继电保护领域所取得的最新理论和技术进展;其次是试图反映在实际电力系统中所使用的来自不同国家和制造厂家的最新继电保护技术;还要反映现代电力系统的新需求以及由此产生的新技术。本书读者应该具有本科生电气工程专业基础,最好系统地学习过电力系统继电保护课程。但是考虑读者的实际状况,本书也通过很短的篇幅介绍一些基本的继电保护概念,以期达到电气工程专业毕业生能够有所收获、没有电气工程专业基础或者没有学习过电力系统继电保护课程的专业人员基本上能接受的程度。本书第 1 章介绍了现代电力系统概况以及对于继电保护的要求;第 2 章介绍了基本的电流保护,重点介绍无通道保护;第 3 章介绍了距离保护,重点介绍电力系统主要应用的工频变化量距离保护;第 4 章介绍了纵联保护,着重介绍电力系统广泛使用的光纤电流差动保护;第 5 章介绍了继电保护的新进展——行波保护;第 6 章介绍了直流输电系统保护,既包括换流站保护,也包括直流线路保护,既介绍特高压超长距离直流线路保护,也介绍应用于柔直电网中的超高速保护;第 7 章介绍了主设备保护,尤其是巨型发电机组故障分析方法和继电保护技术;第 8 章介绍了系统保护,包括部分切机切负荷的内容,也包括防御连锁故障、具有系统视觉的继电保护技术。

第2章 电 流 保 护

电流是描述电力设备运行状态的基础电气量。电流保护是利用电力设备电流特征构成的保护,是最早提出和应用的保护。电流保护原理简单,实现容易,在电力系统中获得广泛应用。电流是表征回路状态的电气量,同一回路不同电气设备具有相同的电流特征,如何基于本地电流增大识别被保护对象故障,满足选择性要求是电流保护需要解决的问题之一。同时电流保护基于量值比较,三相电力系统中性点接地方式、运行方式、故障类型都直接影响电流量值,如何以整定值应付动态系统中的多变随机故障,提高灵敏性,是电流保护需要重点关注的问题。现代继电保护技术以微机为基础。相较之前的继电保护技术,微机保护具有强大的数值计算和数据存储功能,易于获取并凸显故障特征,能更好地实现基于故障前后电气量变化的故障分量保护,能够实现故障类型识别和运行方式判定,易于实现电气量之间相对复杂关系特征。针对电流保护关注的选择性和灵敏性问题,基于微机保护技术,本章介绍了基于电流全量的常规三段式过电流保护、利用零序电流的电流保护、配电线路无通道保护、针对中性点非有效接地系统单相接地故障的相电流变化量保护和电流初始行波选线保护。

2.1 过电流保护

过电流保护是反映保护安装处电流增大的保护。其基本原理是正常运行设备上流过额定电流或者小于额定电流的工作电流,而故障时会有很大的短路电流流过。由于同一回路中电流特征相同,电流增大与被保护对象故障的关系不一定是充分必要条件,因此,为满足保护选择性的要求,电流保护根据其动作时间特征分为电流速断保护、限时电流速断保护和定时限过电流保护^[1-3]。

2.1.1 电流速断保护

电流速断保护是基于电流增大并瞬时动作的过电流保护。其保护动作判据可写成:

$$I_k \geq I_{op}^I \quad (2-1)$$

式中, I_k 为保护安装处的电流; I_{op}^I 为保护动作电流整定值。

电流速断保护又称为瞬时电流速断保护、无时限电流速断保护或Ⅰ段电流保护。通常,电流速断保护利用的是相电流。电流速断保护是保护判据一旦满足,直接动作出口,不需要额外延时。需要注意的是,保护速断故障不等于故障发生后零秒被动作隔离,故障信息被保护检测到和保护判断出故障都需要时间。

电流速断保护只要检测出电流大于整定值就动作,对于多条线路或者设备串联组成的单电源辐射状网络,需要考虑保护动作的选择性,以尽量减小因为短路造成的停电范围。电流速断保护只有一个定值,只能通过提高保护动作整定值来满足选择性。在三相系统中,短路故障类型和运行方式都会对故障电流产生影响。因此,为保证选择性,需采用故障电流最大的故障类型和最大运行方式计算保护整定值。相应地,电流速断保护的定值一旦确定,其保护范围直接受故障类型和运行方式的影响。其最大保护范围为在最大运行方式下发生最严重的三相短路故障时的范围。在最小运行方式下,电流速断保护存在不能保护线路全长的问题。

2.1.2 限时电流速断保护

针对电流速断保护无法保护线路全长的问题,提出了能够保护线路全长的限时电流速断保护,也称为Ⅱ段电流保护。限时电流速断保护通过增加保护动作时间延迟,实现保护选择性并达到保护线路全长的目的,其构成为电流判据和时间判据。其电流整定值满足小于线路全长范围内最小故障电流的要求,其时间延迟为躲过相邻下一段线路电流速断保护动作断路器隔离故障的时间。因此,断路器分闸隔离故障时间和电流速断保护故障发生后动作出口时间是延时时间的主要考虑因素。

三相电力系统运行方式和故障类型直接影响被保护对象故障电流,而通常的电流保护采用固定的整定值。一个固定的整定值去适应变化的故障电流,存在动作判据不满足的可能。基于此,提出了灵敏度指标表征电流保护的灵敏性。定义被保护线路末端发生两相短路时,限时电流速断保护能够做出反应的能力为灵敏度,用 K_{sen} 表示。其计算式如下:

$$K_{\text{sen}} = \frac{I_{\text{k}\cdot\text{min}}}{I_{\text{oper}}^{\text{II}}} \quad (2-2)$$

式中, $I_{\text{k}\cdot\text{min}}$ 为被保护线路末端发生两相短路时保护安装处的电流; $I_{\text{oper}}^{\text{II}}$ 为保护动作电流的整定值。

为满足保护现场运行的需要,要求灵敏度大于 1.3。如果灵敏度不满足要求,则限时电流速断保护不能用于保护被保护对象,需研究新的保护方式。

2.1.3 定时限过电流保护

针对电流速断保护不能保护全长,限时电流速断保护不满足灵敏度要求的情

况,且结合限时电流速断保护即使能够保护线路全长,但是不能作为相邻线路后备保护的特点,提出了定时限过电流保护,或称Ⅲ段电流保护。其是既能保护本线路全长,还能保护相邻线路全长的电流保护。

定时限过电流保护动作电流按大于最大负荷电流整定,时间延迟按照梯形原则从线路末端负荷到线路首端电源依次增加。其灵敏度校验按照近后备和远后备分别校验:近后备灵敏度校验选择本线路末端两相短路作为校验点,灵敏度要求大于1.3;远后备灵敏度校验选择相邻线路末端两相短路作为校验点,灵敏度要求大于1.2。

电流速断保护能瞬时切除故障,但不能保护线路全长;限时电流速断保护能够保护线路全长,并有本线路后备保护能力,但没有相邻线路后备保护能力;定时限过电流保护动作值最低,动作最灵敏,而且具有近后备和远后备保护能力,但动作时间较长。以上三种保护组合在一起,构成一套完整的三段式电流保护。其中Ⅰ段、Ⅱ段、Ⅲ段分别对应电流速断保护、限时电流速断保护和定时限过电流保护。

2.1.4 方向过电流保护

双电源供电网络和单电源环网为了提高供电可靠性,缩小停电面积,在母线两侧均装设有断路器。故障后要求从线路两端切除故障,且仅切除故障线路。如果采用三段式电流保护,则会出现发生一个故障,母线两侧保护同时动作的情况,如图2-1所示。在图2-1(a)所示的双电源供电网络中,当线路PQ上的K1点发生短路故障时,在故障点的M侧,电流保护1、保护2和保护3都流过故障电流 $\dot{I}_{KM}$;在故障点的N侧,电流保护4、保护5和保护6都流过故障电流 $\dot{I}_{KN}$ 。由于三段式电流保护不存在方向性,保护2、保护3、保护4和保护5存在同时动作的问题。在图2-1(b)所示的环网供电网络中,线路PN上的K1点发生短路故障,也存在电流保护2、保护3、保护4和保护5同时动作的问题。

为解决上述问题,提出了方向过电流保护。由图2-1可以看出,线路运行时,母线两侧的电流方向一侧为线路流向母线,另一侧为母线流向线路。以母线电压为参考,以母线流向线路为电流正方向,有功功率的正负直接反映电流方向。有功功率的计算式如下:

$$P = UI \cos \varphi \quad (2-3)$$

正向故障时, $P > 0$,此时电压和电流相量的夹角 $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$;反向故障时, $P < 0$,电压和电流相量的夹角 $90^\circ < \varphi < 180^\circ$ 或 $-180^\circ < \varphi < -90^\circ$ 。

电压和电流同相位时,功率方向继电器具有最大输出,亦即最灵敏。发生金属性故障时,故障电压与电流相位相差线路阻抗角,如果把电压相量向后旋转阻抗角或者把电流相量向前旋转阻抗角,功率方向继电器动作最灵敏。电压为0V时,如

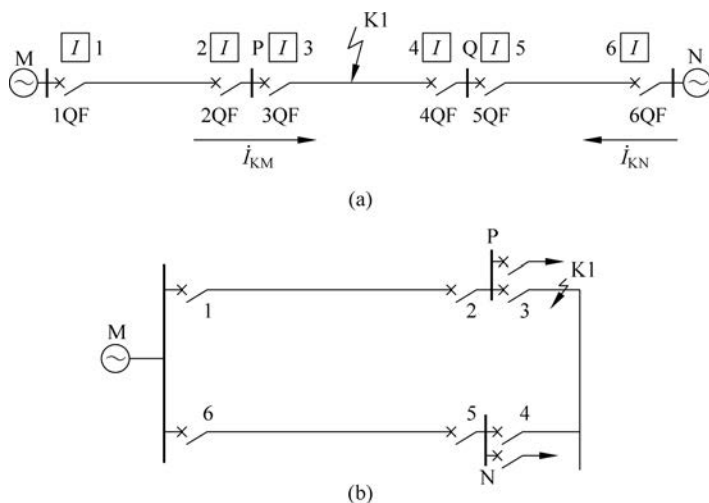


图 2-1 供电网络

(a) 双电源; (b) 单电源环网

果母线出口故障,此时 $P=0W$,功率方向继电器不能正确动作,这种情况称为电压死区。

三相电力系统可以接入不同的电压和电流来判断功率方向。同名相电压和电流接入方向继电器的接线方式称为 0° 接线。采用一相的电流作为电流量,另外两相的相间电压(线电压)作为电压量的接线方式称为 90° 接线。之所以称为 90° 接线,是因为三相对称时,系统中一相电压与其他两相的相间电压的相位差为 90° 。

90° 接线的优点是可缩小电压死区。 0° 接线方式在保护正方向出口发生三相短路、两相接地、单相接地短路时,接入的故障相电压很低,以上故障情况均为保护动作死区。而 90° 接线只有出口三相短路才为死区。

方向过电流保护由方向元件和电流元件构成,有时还配合时间元件,实现时间延迟。方向过电流保护逻辑为方向元件和电流元件都动作,才出口跳闸。

2.2 零序电流保护

过电流保护利用电力系统中三相电流互感器直接测量得到的相电流,基于故障电流大于正常运行时负荷电流的基本特征构成。其实现的方式是通过设定整定值,整定值既要大于非故障运行时的电流,又要小于故障电流。由于非故障运行时负荷电流存在变化,尤其是电动机负荷启动时可出现较大的启动电流,而故障时故障类型、故障位置和故障点情况(如过渡电阻)都不确定,可出现较小的电流,因此

可能导致过电流保护不能正确动作。基于电力系统是为用户提供合格电能的本质目的,正常运行时以正序电流为主,而在发生接地故障时会存在显著的零序电流,因此提出了零序电流保护。

零序电流保护利用的是接地故障时产生的零序电流。系统三相对称运行时不存在零序电流,零序电流保护相比过电流保护更加灵敏。零序电流保护应用于接地故障。由三相电力系统故障分析可知:三相接地和两相接地时,故障相电流和零序电流同时增大;而发生单相接地故障时,受制于中性点接地方式,故障相电流不一定增大。本节介绍不同中性点接地方式下的零序电流特征及其保护。

2.2.1 中性点有效接地方式下的零序电流保护

中性点有效接地方式分为中性点直接接地和中性点经小电阻接地。由故障分析可知:中性点有效接地方式下故障接地点、中性点和故障相导线构成短路回路,短路电流大。具体而言,接地相电压降低、电流增大;非接地相电压和电流基本不变;零序电流显著增大^[1-3]。

与过电流保护相似,中性点有效接地方式下零序电流保护分为零序电流瞬时速断(零序Ⅰ段)保护、零序电流限时速断(零序Ⅱ段)保护和零序过电流(零序Ⅲ段)保护。零序电流瞬时速断保护反映测量点的零序电流大小而瞬时动作,其整定原则为躲开下一条线路出口处单相或两相接地短路时可能出现的最大零序电流,躲开断路器三线触头不同期合闸时可能出现的最大零序电流,以及躲开非全相运行状态下又发生系统振荡时出现的最大零序电流。零序电流限时速断保护动作电流与下一条线路零序Ⅰ段配合,并带一个时限。零序过电流保护动作电流躲开下一条线路出口相间短路时所出现的最大不平衡电流,时间定值逐级配合。

如图 2-2(a)所示的中性点有效接地双电源网络,当 K1 点和 K2 点发生单相接地故障时,其零序网络分别如图 2-2(b)和图 2-2(c)所示。接地点增加零序电压源,变压器 T1 和 T2 中性点直接接地侧分别存在零序电抗,变压器中性点不接地侧零序网络开路。K1 点和 K2 点故障时,母线 N 两侧都流过零序电流,但方向相反。如果不涉及零序电流方向,则存在母线 N 两侧保护都动作的误动可能。因此,在电源中性点都接地的双电源网络中,零序电流保护同过电流保护一样,需加装方向元件,构成方向性零序电流保护,实现选择性。零序方向元件按照电流流出母线为参考正向,零序电流超前零序电压一定角度($95^{\circ}\sim 110^{\circ}$)时保护动作。零序方向元件因故障点零序电压最高,越靠近故障点零序电压越高,对出口故障不存在电压死区;而对保护安装处远离故障点,零序电压降低,零序方向元件可能不启动。