

高等学校教学参考书

煤矿半导体继电保护

祝生香 编著

煤炭工业出版社

TD61

3

高等学校教学参考书

煤矿半导体继电保护

祝生香 编著

煤炭工业出版社



230457

内 容 提 要

本书结合煤矿特点着重阐明半导体继电保护的基本原理,从理论上对煤矿电力系统故障作了分析,并附述了半导体继电保护装置成熟的实例及新的技术成就。

全书共分六章,第一章至三章分析了半导体继电保护装置的的基本电路和接线原理;第四章至第六章分别对电网、电动机、电动机的半导体继电保护;第六章为煤矿机电设备专用的半导体继电保护装置。

本书为煤炭高等院校工业电气自动化专业的教学参考书,亦可供有关工程技术人员参阅。

责任编辑:胡玉雁

高等学校教学参考书

煤矿半导体继电保护

祝生香 编著

煤炭工业出版社 出版

《北京前门内大街15号》

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本787×1092¹/₁₆ 印张16³/₄ 插页3

字数394千字 印数1—3,350

1985年4月第1版 1985年4月第1次印刷

书号15035·2718 定价3.15元

前 言

半导体继电保护具有灵敏度高、速度快、体积小、重量轻、耐震动及维护调试方便等优点,尤其适合煤炭企业应用,对提高供电可靠性,保证矿井安全均具有特殊意义。在国外已得到广泛的应用,而国内使用情况,效果也很好。今后的大量推广应用,已成为必然趋势。

本书着重阐述了煤矿半导体继电保护的基本原理及电路,反映了应用成熟的新技术,主要介绍煤矿35千伏以下供电的半导体继电保护装置。针对煤炭企业实际,每章均列举实例,可供具体使用,因此除供给师生教学参考外,对从事电力系统继电保护及煤矿供电的工程技术人员,亦有一定参考价值。

在编写过程中,得到南京自动化设备厂、上海供电局、南京电力学校等单位的大力支持。书稿经清华大学电力系王维俭副教授审阅,提出许多宝贵意见,在此一并表示衷心感谢。

由于本人水平有限,书中缺点和错误在所难免,殷切期望读者批评指正。

编 著 者

1984. 5.

目 录

绪 论	1
一、继电保护装置在电力系统中的作用	1
二、半导体继电保护的特点	1
三、对半导体继电保护装置的基本要求	2
四、半导体继电保护的基本原理与系统组成	3
五、半导体继电保护在煤炭事业中的特殊意义及发展前景	4
第一章 半导体继电保护装置的基本电路	5
第一节 测量回路的铁芯元件	5
一、铁芯元件的功用	5
二、测量回路铁芯元件的等值图及工作特点	5
三、电流互感器(LB)与电压互感器(DKI)的比较	8
四、小型变换器的设计	9
第二节 构成半导体继电保护装置的基本电路	14
一、电压形成回路	14
二、整流、滤波与稳压电路	15
三、触发电路	24
四、时间电路	34
五、记忆电路	41
六、脉冲展宽电路	43
七、逻辑电路	45
八、出口电路	51
九、信号电路	53
第二章 半导体继电保护的测量回路	56
第一节 对称分量过滤器	56
一、零序电压过滤器	58
二、零序电流过滤器	57
三、负序电压过滤器	58
四、负序电流过滤器	61
五、复合电流过滤器	61
第二节 按绝对值比较原理工作的阻抗继电器特性	66
一、无极化电压时方向阻抗继电器	66
二、有极化电压时方向阻抗继电器	68
第三节 按绝对值比较原理工作的两比较量阻抗元件的构成及动作特性的分析	71
一、特性的表达式	71
二、具有圆特性的阻抗元件的构成	75
三、具有直线特性的阻抗元件	77
第四节 按绝对值比较原理工作的测量元件整定比较原则	81

一、基本原理	81
二、绝对值比较回路	85
三、绝对值比较方法	87
第五节 两比较量按相位比较原理工作的测量回路	88
一、直接相位的比较式相位测量回路	89
二、脉冲式相位测量回路	92
三、相敏电路式相位测量回路	93
四、两比较量的时序式相位测量回路	102
第六节 多比较量按相位比较原理工作的测量回路	105
一、三比较量的时序式相位测量回路	105
二、多比较量的极性重合式相位测量回路	106
第三章 电网的保护	110
第一节 电网的电流保护	110
一、半导体电网保护电压形成回路的接线方式	110
二、半桥电网短路相短路电流的保护	114
三、电网相间短路的方向性电流保护	126
四、小电流接地系统电网中单相接地故障的零序电流保护	136
第二节 电网保护的自动重合闸装置	155
一、自动重合闸在电力系统中的作用	156
二、对自动重合闸装置的基本要求	158
三、单端电源送电线路半断路器一次重合闸装置	157
第三节 35千伏电网保护应用实例	162
一、操作原理与方框图	162
二、主要元件的工作原理	164
第四章 变压器保护	175
第一节 矿山电力变压器的故障类型、不正常运行状态及其相应的保护方式	175
第二节 电力变压器的过负荷、速断及过电流保护	175
一、电压形成回路	175
二、过负荷保护	176
三、速断保护	176
四、过电流保护	176
五、出口回路	177
六、信号回路	177
七、电源回路	177
第三节 电力变压器的差动保护	177
一、变压器差动保护的特点	177
二、变压器外部短路时的不平衡电流	178
三、变压器空载合闸的励磁涌流	180
四、变压器内部相间短路电流的波形分析	184
五、按纵波原理而构成的变压器纵差动保护	185
六、二次谐波制动原理的差动保护	189
七、变压器差动保护继电器整定需考虑的问题	192
第四节 电力变压器的抗速保护	192

一、零序过电流保护的装设原则	192
二、零序后备保护整定条件	193
三、晶体管变压器接地保护实例	194
第五节 电力变压器差动保护实例	196
一、差动保护装置各部分工作原理	196
二、差动保护装置整定计算	212
第五章 电动机保护	214
第一节 电动机故障种类、不正常工作状态及应当采取的继电保护装置	214
第二节 电动机相间短路保护	214
第三节 电动机的单相接地保护	215
第四节 电动机的过负荷保护	216
第五节 电动机的低电压保护	217
一、电动机低电压保护装设原则与接线基本要求	217
二、电动机低电压保护装置	218
第六节 电动机保护实例	221
一、概述	221
二、工作原理	224
第六章 煤矿机电设备专用半导体继电保护	227
第一节 BFL-1型高压隔爆电磁继电器保护装置	227
一、高压隔爆保护装置	227
二、高压电磁保护装置	230
第二节 BFL-1型反时限过电流断路器保护装置	233
一、概述	233
二、工作原理	233
第三节 电动机综合保护装置	239
一、电动机综合保护装置	239
二、DZB-1型电动机综合保护装置	242
第四节 电动机断相过载保护器	245
一、断相保护电路	245
二、过载保护电路	247
第五节 煤电钻综合保护装置	247
一、概述	247
二、保护工作原理	247
第六节 综采电动机的保护	249
一、功率自动调节器	249
二、H33A负载控制装置	252
第七节 千伏级设备中的半导体保护装置	255
一、信号检测环节	257
二、电源	257
三、过流保护	257
四、短路保护	258
五、欠压保护	258
六、执行环节	258
主要参考书目	259

绪 论

一、继电保护装置在电力系统中的作用

电力工业是国民经济的重要组成部分，它是煤炭工业的主要动力来源，随着煤矿电气化自动化水平的不断提高，它将占有越来越重要的地位。电力系统在运行中可能发生各种故障和正常运行状态，最常见和最危险的故障是各种形式的短路。故障点通过很大的短路电流，它引起的电弧可使电气元件破坏。短路会造成部分电网电压下降，破坏用户工作的稳定性；严重者也会破坏各电厂之间并列运行的稳定性，使系统无法工作。

电力系统最常见的正常运行状态是过负荷。长期的过负荷使电气设备过热，造成绝缘老化；或由于电力系统功率不足产生频率下降，电压降低。发电机突然甩负荷所引起的过电压也属于正常运行状态，这也将使用户的供电质量变坏，如不及时处理亦会发展成故障，影响产品质量、毁坏设备，甚至威胁到矿井安全。

为了减小事故造成的危害，在事故发生后要求迅速及时地将故障部分切除，缩小事故范围，保证无故障部分正常运行。这个任务由继电保护装置完成，因此继电保护的作用是：

1. 发生故障时自动、迅速、有选择性地故障设备从电力系统中切除，保证无故障部分迅速恢复正常运行，免遭破坏。
2. 反应电气设备的不正常运行状态，并根据运行维护条件，动作于发信号、减负荷或跳闸。一般带有一定延时，以保证选择性。
3. 配合自动装置（如自动重合闸、备用电源自动投入、按频率自动减负荷装置等）自动消除或减少事故或不正常运行方式。

由于继电保护的上述作用，它已成为电力系统的重要组成部分。随着电力系统的日益发展，自动化水平的不断提高，传输线及设备单机容量的增大，对继电保护要求也越来越高。在现代化的电力系统中，如果没有专门的继电保护装置，要想维持电力系统的正常运行是不可能的。因此加强继电保护工作，具有十分重要的意义。

半导体元件在继电保护技术中的应用，近几年来有较大的发展，已利用它构成了许多新的继电器和保护装置。这种保护装置具有体积小、重量轻，消耗功率小，灵敏度高，不怕震动，可以实现无触点等一系列优点。因此受到广大继电保护工作者的重视。

二、半导体继电保护的特点

（一）与机电式继电保护比较，半导体继电保护具有以下优点

1. 是无触点系统，无可动部分

由半导体电路构成的保护装置动作速度快，动作时间以微秒计（无触点出口的保护）；有触点出口也只有数十毫秒，较机电式快几倍到几十倍。因无可动部分，没有轴承、齿轮，接点的磨损及接触不良等问题。由于无触点，保护装置耐冲击、抗振动，能防止振动造成的触点误动。

2. 灵敏度高

由于半导体电路触发功率很小，并可对信号放大，有利于反应故障情况，因而可制成灵敏度很高的配电保护装置。

3. 容易构成特性复杂的保护装置

由于半导体继电保护采用无触点逻辑电路等，较易得到复杂的特性，可以实现机电式保护装置无法满足的要求（如快速动作的继电保护装置，矩形特性的阻抗元件，反应微小量的继电器等）。机电式继电保护则存在动作延时长，触点抖动，多个继电器组合使用协调困难等问题。

4. 体积小、重量轻，消耗功率小

半导体继电保护用半导体元件组成、易于小型化。多数情况下体积小、重量轻，可缩小控制室和配电装置面积。由于消耗功率小，可大大减轻电压互感器和电流互感器的负担，使其额定容量可减小。

5. 调试维护方便

半导体保护无轴承、弹簧、接点、传动机构等机械部分，又有自动检测装置，插件装卸容易，调试维护简单。

（二）半导体保护存在的缺点

1. 抗干扰能力差

半导体保护装置动作快，灵敏度高，因此对于干扰比较敏感，易受交流或直流电磁波的干扰，造成误动。

2. 电子元件对温度敏感，且易损坏

由于所用电子元件多，受温度影响特性易变化，且元件可能损坏，这些都降低保护装置的可靠性。

3. 存在不可靠因素

因焊点、插件及布线均很多，若工艺达不到要求，将造成误动或拒动。

随着元件质量的提高，集成电路的应用，只要严格工艺，加强抗干扰措施，解决温度影响问题等，上述缺点可逐渐得到克服。近十几年来，半导体保护得到很大发展，目前虽处于机电式和半导体式保护并存的阶段，但半导体式更多的代替机电式保护将是发展的必然趋势。

三、对半导体继电保护装置的基本要求

（一）对继电保护装置的基本要求是：

1. 选择性 继电保护装置只将故障部分切除，使停电范围限制到最小；
2. 速动性 要求快速切除故障；
3. 灵敏性 对故障的反应能力要强，即灵敏度要高；
4. 可靠性 即不拒动也不误动，要动作可靠。

（二）半导体继电保护装置的关键问题——可靠性

据1972年统计我国66千伏以下半导体继电保护装置共有88套，共动作607次，其中正确动作522次，正确动作率达95.86%，误动作较多，拒动作较少。保护的误动、拒动会造成严重的后果，这是不允许的。

半导体保护装置的可靠性与很多因素有关，为了提高可靠性应采取如下措施。

1. 严格对元件筛选和提高工艺水平

据调查由于产品质量所引起的误动占70~80%，其中因元件质量不好和制造工艺不良占全部误动作的50%以上。实践证明经老化筛选后，初期失效管子曾高达20~30%；若严格筛选条件，提高制造工艺，可以大大提高可靠性。

2. 合理设计保护装置中的半导体电路

设计电路时应考虑元件参数有足够的裕度，要采用线路简单、性能稳定的基本电路；根据信号特点，考虑温度影响和抗干扰的保护措施。

3. 采用自动监视和自动检查装置

由于半导体保护装置中元件较多，且都有一定的故障率，设置自动监视和自动检查装置可及时发现故障，加以排除。经用概率计算结果表明，采用自动监视和检查后，装置的可靠性可提高10~100倍。

4. 采用闭锁或双重化措施

闭锁装置是将闭锁元件和保护装置串联起来，只有在双方都动作时才有输出，对防止误动有利。

双重化是由两套保护装置组成。若将其串联，则必须二者都动作，才输出跳闸，减少误动，但增加拒动可能性。若将二者并联，二者中任一动作都能输出跳闸，减少了拒动，但增加了误动的可能性。可根据电力系统的具体要求和装置本身的情况选用。

四、半导体继电保护的基本原理与系统配合

目前在电力系统中广泛应用的半导体继电保护方法都是根据反应故障时工频电气量变化的原理而构成的，例如过电流、低电压、高周、低周、差周、功率方向等。又如距离保护，反应的是故障时工频电压对电流比值的变化；高频相差保护，反应的是故障时或零序两端工频电流相位关系的变化。故障时工频电气量的变化与电力系统的参数，以及当时运行状态有关。例如负荷电流，系统各电流、电势间的相相差，线路的分布电容电流、系差阻抗及时间常数等，对继电保护装置都会产生不同程度的影响。

半导体继电保护装置，一般是由若干功能元件和基本电路组成的一个整体。一套半导体继电保护装置，通常由测量电路、逻辑电路和输出电路三部分组成。

测量电路的作用是判别被保护设备是否发生故障。它的输入端与被保护设备的电流或电压互感器二次侧联接，反应被保护设备运行状态的电流、电压、阻抗或电流电压之间的相位等电气量；通过测量电路的加工整理，将所得到的电信号送入逻辑电路。

在半导体继电保护装置中通常是将被测量的电气量变换成弱电的直流电压，当此电压达到一定数值或者极性改变时，使保护装置起动。因此保护装置的测量回路又由电压形成回路和起动回路组成。

电压形成回路的任务是将电流互感器或电压互感器的强电交流系统与弱电直流系统隔离；并根据各种保护装置动作原理的要求，进行相应的电气参量变换，以供给保护装置弱电电压信号。

起动回路包括比较回路和执行电路两部分。比较回路的任务是对故障电气参量变化进行比较、判别，然后将结果输入给执行电路。

逻辑回路的功用是对测量电路送来的信号，根据规定的条件，进行分析判别。半导体保护装置的逻辑回路就逻辑关系而言，与机电型保护装置的逻辑部分基本相同。它由时间电路、门电路等组成；包括对信号时间的判断，根据判别的结果决定是否给输出电路发出

信号，使保护装置动作。

输出电路包括出口电路和信号电路，它的作用是将逻辑回路送来的“是”或“否”的单值命令信号放大，并执行操作。因为由逻辑回路输出的信号通常是微弱的，不能直接推动跳闸回路；因此往往通过输出回路提高输出功率，然后送到执行机构进行操作，例如使断路器跳闸或发出灯光、音响信号。

五、半导体继电保护在煤炭事业中的特殊意义及发展前景

由于煤炭生产多属地下开采，生产环境恶劣，潮湿，有危险气体、工作面移动频繁、空间狭窄等等，因此对电气设备要求能防爆、防潮、具有安全火花性能、体积小、重量轻。对于继电保护装置亦有同样的要求。半导体继电保护装置比较容易做到上述要求。因为它体积小、重量轻，且可以做成全封闭式的，所以便于安装在设备内部，不多占空间，易于防潮。由于是无触点系统，克服了机电型继电器有机械传动及接点裸露引起的问题及产生火花的危险。

半导体保护装置均系弱电系统，消耗功率小，容易制成安全火花型。在控制与通讯的保护方面使用较广泛，很适合于有瓦斯煤尘爆炸危险的矿井中应用，对煤矿安全具有重要意义。

半导体继电保护抗震性能好，维修调试方便。使用于井下的设备移动频繁、振动性强的条件下，能保证较高的可靠性。

半导体保护装置的快速性、灵敏度也都优于机电型继电保护装置。因此近十几年来在国内外煤炭生产中，半导体继电保护的采用得到了很快的发展。随着我国半导体技术的不断发展，产品质量提高，集成电路的大量应用，工艺水平的改进，半导体继电保护可靠性将会进一步提高，逐步取代机电型继电保护将是发展的必然趋势。

第一章 半导体继电保护装置的基本电路

第一节 测量回路的铁芯元件

半导体继电保护装置测量回路中的铁芯元件，是各种类型的中间变换器。按其功用可分为电压变换器（YB）、电流变换器（LB）、电抗变换器（DKB），也可统称为测量小变压器。

一、铁芯元件的功用

1. 电路隔离

使半导体管的弱电直流回路与电气设备二次交流回路隔离。这是因为电气设备二次回路为电压互感器或电流互感器的强电交流回路，根据安全的需要必须进行保护接地，而半导体电路则不允许接地，因此必须实现电的隔离。半导体电路为弱电系统，对干扰信号敏感，必须注意抗干扰问题。干扰的来源有交流和直流两方面。将测量小变压器一次和二次绕组之间加设隔离屏蔽层（一般用屏蔽铜皮），并将屏蔽层经保护装置外壳接地，交流干扰信号就不能直接侵入保护装置的测量回路。因为干扰信号会引起误动，严重者可损坏元件，所以采用测量小变压器进行电的隔离更有特殊意义。

2. 电量值的变换

将电气设备二次回路的电压或电流按比例降低，以适应半导体保护测量回路的特点。

由于半导体保护装置的测量回路很灵敏，反应的电压数值很小，因此必须通过铁芯元件将电气设备二次回路的电压或电流按比例地变换成数值较小的电压量。这样既安全，又可降低交流功率损耗。

3. 定值调节

借铁芯元件一次或二次绕组抽头实现继电器的定值调整，或扩大定值范围。

4. 电量变换（即实现换能器的作用）

因为半导体继电保护装置测量回路的输入是电压，所以要通过铁芯元件将欲测量的量（电压、电流、电抗等）全部转换为电压，故可实现“换能器”的作用。

5. 电量的综合

实现这种作用的小变压器称为“综合变压器”，这是为了减少装置中铁芯元件数目。可用晶体管电路构成“加法放大器”完成此任务，即可进行输入信号的综合，又可消除输入量之间的干扰。

二、测量回路铁芯元件的等值图及工作特点

上述三种铁芯元件均可用T型等效电路表示，如图1-1。

图中 $\dot{E}_1$ 和 Z_1 为电源势和內阻抗， Z_1 、 Z_2 为铁芯元件一、二次绕组的漏阻抗， Z_m 为励磁阻抗， Z_F 为铁芯元件的二次侧负载， $\dot{U}_2$ 为二次负载上的输出电压。

三种铁芯元件的T型等效电路的参数大小有显著不同，现分述如下。

1. 电压变换器（YB） 它的作用是将被测量的交流高电压变换成适合半导体电路比

较低电压，实现高电压到低电压的变换。YB一次绕组接电力系统中的电压互感器的二次侧，因YB一次是电压源，故 $Z_Y \approx 0$ 。二次负载 Z_F 是半导体保护继电器电压回路的等效阻抗，数值很大，正常工作时相当于开路。一次和二次绕组的漏抗很小可以忽略，由于铁芯没有气隙，为了保证测量准确，铁芯需工作在线性段，所以 Z_m 很大；故一次与二次电压比可认为近似等于匝数比，与二次负载大小基本无关，可视为恒压源。

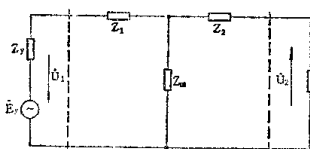


图 1-1 铁芯元件 T 型等效电路

如果忽略 YB 中产生的很小角度误差，则可认为二次电压与一次电压同相位，或相差 180° 。

电压变换器 T 型等效电路参数特点为： $Z_m \gg Z_Y$ ， $Z_F \gg Z_Y$ ， $Z_1 \approx 0$ ， $Z_2 \approx 0$ 。

设计制造 YB 时，为了满足 $Z_m \gg Z_Y$ 的条件，铁芯的正常工作磁通密度不应超过 7000~8000 高斯。应尽量增大 Z_F ，以满足 $Z_F \gg Z_Y$ 的条件。

2. 电流变换器 (LB) 它的作用是将输入一次侧的交流大电流，按比例地变换成低电压，实现电流到电压的转换。其一次绕组与电力系统电流互感器的二次线圈串联。因 LB 一次是电流源，故 Z_Y 极大。二次侧并联一个阻值很小的固定电阻 R (约几百欧)，总负载 Z_F 总是小于 R ，使得 LB 二次电流流过 R 所产生的电压与一次侧电流保持线性关系 (铁芯不饱和时)。LB 铁芯没有气隙，励磁电流很小，励磁阻抗 Z_m 很大，可以认为一次侧电流 I_1 变换到二次侧；铁芯不饱和时励磁电流、一次和二次漏抗均可以忽略，认为一次电流 I_1 与二次电流 I_2 成正比，并近似等于匝数的反比。 R 上的电压 U_2 主要决定于 I_1 ，而与二次负载变化基本无关，所以 LB 可看作恒流源。实际上 LB 二次所接固定电阻 R 很小，故正常时 LB 二次接近工作在短路状态。为了保证测量的准确度，LB 铁芯要工作在线性段。一般 R 多采用纯电阻，使 U_2 与 I_1 同相位。

对于电流变换器 T 型等效电路参数特点为： $Z_m \gg Z_2$ ， $Z_Y \gg Z_F$ ， $Z_1 \approx 0$ ， $Z_2 \approx 0$ 。

在设计制造 LB 时，要考虑到系统在最大的短路电流倍数下，铁芯要工作在线性段，就要合理选择 R 的阻值及铁芯工作磁通密度。一般反应单一量的 (如电流继电器) 要求可低一些，而反应两个比较量以上的 (如阻抗继电器) 要求要高一些，对于冷轧高硅硅钢片，一般可取 9000~11000 高斯。

3. 电抗变换器 (DKB) 它的作用也是将输入一次侧的交流大电流按比例地变换成二次侧的低电压，实现电流到电压的转换。其一次绕组与电力系统电流互感器的二次线圈串联，亦为电流源，故 Z_Y 极大。它与 LB 的不同表现在 DKB 铁芯有气隙，磁阻很大，励磁阻抗 Z_m 很小，励磁电流 I_0 很大。DKB 二次负载 Z_F 通常很大，接近于开路，因此二次电流 I_2 很小，一次电流 I_1 几乎全部作为 I_0 ，用以激磁。一次与二次的漏抗亦较大，不能忽略。电抗变换器的 T 型等效电路参数特点为： $Z_F \gg Z_m$ ， $Z_Y \gg Z_m$ ， $Z_1 \neq 0$ ， $Z_2 \neq 0$ 。

DKB 二次输出电压 U_2 为： $U_2 = I_1 Z_m \approx j I_1 X_M = j I_1 \omega M$

式中 X_M ——DKB 的互感电抗；

M ——DKB 一、二次绕组之间的互感；

ω ——工作角频率。

DKB 的原理接线如图 1-2 a 所示。

当DKB的二次不接负载 (W_2 开路、 W_3 不接电阻), 其等值电路如图1-2 b 所示, 和一般空载变压器相同。此时 $\dot{I}_1$ 全部作为励磁电流 $\dot{I}_0$, 其中一部分 $\dot{I}_{01}$ 用来产生磁通, 另一部分 $\dot{I}_r$ 供给铁芯损耗, 这时 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 = \dot{I}_{01} + \dot{I}_r$ 。二次侧感应电势 $\dot{E}_2$ 正比于铁芯中的磁通 Φ_m , 并滞后于 $\dot{I}_1$ 近于 90° 。DKB二次输出电压 $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$, 在铁芯不饱和时, $\dot{U}_2$ 正比于 $\dot{I}_1$, 且滞后近 90° , 向量如图1-2 c 所示。由前述公式 $\dot{U}_2 = \dot{I}_1 Z_m$ 也可看出, Z_m 具有阻抗的量纲。实际上 $\dot{U}_2$ 是 $\dot{I}_1$ 在阻抗 Z_m 上的压降, $-\dot{U}_2$ 超前 $\dot{I}_1$ 的角度 α 就代表 Z_m 的阻抗角。因 $-\dot{U}_2$ 超前 $\dot{I}_1$ 近 90° , 故 Z_m 相当于一个电抗, 因此被称为电抗变换器。

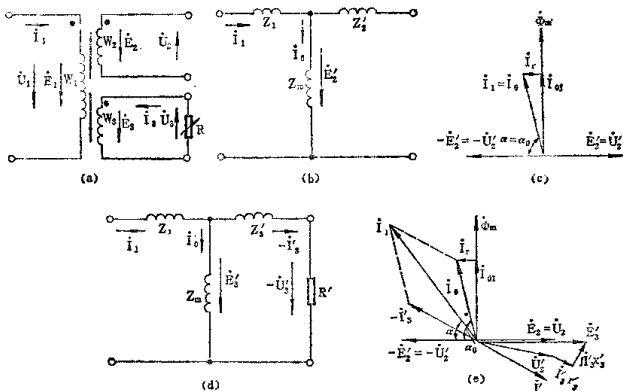


图 1-2 DKB等值电路和向量图

a—原理接线图; b、c— W_2 开路、 W_3 不接电阻等值图及向量图; d、e— W_2 开路、 W_3 接电阻等值图及向量图

在实际的继电保护中, 常用DKB来模拟电流在被保护线路阻抗上的压降, 需要根据被保护对象(线路或变压器)的阻抗, 来调整 Z_m 的阻抗角, 即调整 $-\dot{U}_2$ 超前 $\dot{I}_1$ 的相角 α 。为此常在DKB二次侧多绕一线圈 W_3 , 并接入可调电阻 R , 构成移相电路, 其等值图和向量图如图1-2 d、e 所示。图中 X'_3 表示移相绕组漏抗, 这时 $R \neq \infty$, $\dot{I}'_3 \neq 0$ 。由图1-2 a 可见 $\dot{E}_1$ 与 $\dot{E}_2$ 同相位, $\dot{E}_2$ 由 $\dot{I}_1 R$ 与 $\dot{I}'_3 X'_3$ 、 $\dot{I}'_3 r'_3$ 向量合成。所以 $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_3$, 即 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_3)$, 其它情况与DKB无载时一样。将图1-2 c 与 e 比较, 由于存在 $\dot{I}'_3$, 故 $\dot{I}_1$ 必然偏离 $\dot{I}_0$ 逆时针移动。因 $-\dot{U}_2$ 超前 $\dot{I}_1$ 角度 α 变小; R 越小, $\dot{I}'_3$ 越大, α 角越小。实际上 $\dot{I}_1$ 是作为电流源固定不变的, 当 R 减小时, $\dot{I}'_3$ 增大, 但 $\dot{I}_0$ 、 Φ_m 、 $\dot{E}_2$ 、 $\dot{U}_2$ 均有减小, 但结果使 α 随 R 减小而变小。这就相当于 Z_m 的数值要减小, 这是不希望的, 可在铁芯气隙附近安装一个可调的磁分路片, 以便使 Z_m 的数值不变, 也可用电位器对输出电压作相应调整。

为了在较大的范围内 $\dot{U}_2$ 与 $\dot{I}_1$ 保持线性关系, DKB铁芯都具有气隙。因为具有气隙的铁芯的 $B-H$ 曲线, 在铁芯不饱和时完全线性, 较之无气隙铁芯的 $B-H$ 曲线有较大的线性

段。不同情况铁芯的B—H曲线如图1-3所示。

众所周知：铁芯磁化曲线在起始部分，当励磁电流较小时，铁芯导磁率很低，在中间的直线部分导磁率最高，当励磁电流足够大以后，铁芯呈现饱和，导磁率也下降，故在首末两部分出现非线性。为了扩大其线性段，对于H（即 I_1 ）很小时呈现的非线性，采用插入一片楔形的坡莫合金片进行补偿。因为坡莫合金的磁化曲线在小电流时，有很高的导磁率，可以增加小H时的B值。而在大电流时，合金片迅速饱和，不起补偿作用。对于H（即 I_1 ）很大时呈现的非线性，采用插入软铁片的方法补偿，因为软铁片在大励磁电流时较铁芯不易饱和，提高了铁芯的导磁率，以补偿末端的非线性，经附加磁分路补偿前后的、带气隙铁芯的B—H曲线如图1-4所示。

另外DKB的 Z_m 除受铁芯特性的影响以外，因由 i_1 产生磁通故与系统的频率变化有关。由磁通变化产生的二次侧的电势 $E_2 = 4.44fW_2\Phi_m$ ，由于 $E_2 \propto f$ ，所以 Z_m 也与 f 成正比的变化。因此DKB对一次侧电流中的高次谐波分量有放大作用（因 f 很大）；而对短路电流中的非周期分量（因 f 极小）则有削弱作用，这也是DKB的重要特点。

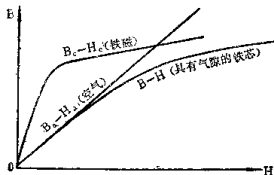


图 1-3 B—H曲线

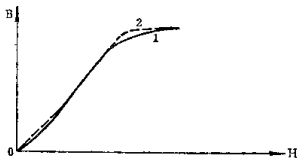


图 1-4 DKB铁芯B—H曲线的线性补偿

1—补偿前的特性；2—补偿后的特性

三、电流变换器（LB）与电抗变换器（DKB）的比较

LB和DKB都是将一次电流转换为二次电压的铁芯元件，下面比较它们的不同之处。

（一）高次谐波问题

设一次电流是含有高次谐波稳定的交流电流 i_1

$$i_1 = I_{1m}\sin\omega t + I_{2m}\sin 2\omega t + \dots + I_{nm}\sin n\omega t$$

当将 i_1 输入给LB的一次侧时，若铁芯未饱和，则其二次电流及其通过二次侧并联电阻上产生的二次电压波形基本上和一次电流波形相同。

当将 i_1 输入给DKB的一次侧时，同样铁芯未饱和，因为DKB的一次电流可认为全部为励磁电流，则在二次侧感应的电压为

$$\begin{aligned} U_2 &= M \frac{di_1}{dt} = MI_{1m}\omega \cos\omega t + 2MI_{2m}\omega \cos 2\omega t + \dots + nMI_{nm}\omega \cos n\omega t \\ &= U_{1m}\cos\omega t + U_{2m}\cos 2\omega t + \dots + U_{nm}\cos n\omega t \end{aligned}$$

式中 U_{1m} 、 U_{2m} 、 $\dots$ 、 U_{nm} 分别为各次谐波在二次侧产生电压的最大值。

可见DKB二次感应电压的幅值与一次电流频率有关。对于 n 次谐波 $\omega_n = n\omega$ ，故在 $I_{1m} = I_{2m} = \dots = I_{nm}$ 的情况下， n 次谐波分量幅值比基波分量大 n 倍，即二次电压中各次谐波幅值之比等于各次谐波的频率比。所以DKB有放大一次电流中高次谐波的作用。当一次含

有高频谐波电流通过DKB时,二次电压将发生严重畸变,在这点上DKB比LB差。

(二) 线性范围的比较

由于DKB铁芯具有气隙,且能够进行线性补偿,所以它有较强的线性工作范围;补偿良好者,最大与最小磁通密度之比可达40倍。而LB铁芯无气隙不能补偿,故最大与最小磁通密度之比仅有10~15倍。故就线性范围来讲,DKB较LB好的多。

(三) 非周期性分量问题

在短路故障的暂态过程中,一次电流含有非周期分量,它是一个变化极慢的电流,设为 $Ie^{-\frac{t}{T_a}}$ (T_a 为非周期分量衰减时间常数, $T_a = \frac{L}{R}$)。在DKB二次侧产生电压为

$$U_2 = M \frac{di_1}{dt} = -\frac{M}{T_a} Ie^{-\frac{t}{T_a}}$$

一次电流衰减越慢, T_a 越大,则DKB二次电压越小。因此DKB有抑制非周期分量的作用。

但非周期分量通过LB时,励磁电流可达到相当大的数值;又因铁芯无气隙,不可避免要产生饱和现象,则一次电流中的交流分量不易传变到二次去。因此LB在传变含有非周期分量的一次电流时,将有严重畸变,不如DKB好。

综上所述,对于线性要求较高和希望较少反应非周期分量的保护继电器(如阻抗继电器、谐波制动或间断角原理的变压器差动保护继电器等),宜采用电抗变换器。对于高频谐波特别敏感的继电保护元件(如负序电流过滤器),则应采用电流变换器。

四、小型变换器的设计

(一) 电抗变换器(DKB)的设计

电抗变换器的原理接线如图1-5所示。

表 1-1

型 号	a(mm)	c(mm)	h(mm)
E-8	8	7	20
E-9	9	11	30
E-11	11	11.5	34
E-12	12	14	40
E-15	15	13.5	24

1. 已知条件

(1) 保护的整定范围 即一次最小整定电流 I_{IQmin} 和一次最大整定电流 I_{IQmax} 。

(2) 选择铁芯截面积 S_T

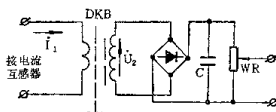


图 1-5 电抗变换器

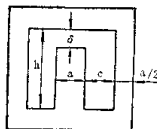


图 1-6 铁芯硅钢片尺寸

参照表1-1预选型式, S_T 按下式计算:

$$S_T = 0.9ab \text{ 厘米}^2$$

式中 0.9——考虑硅钢片之间绝缘间隙的叠压系数;

b ——叠片厚度, 一般取 $b = (1 \sim 1.5)a$ 。

各型式铁芯的硅钢片尺寸如表1-1。

以上各型式的铁芯又有无气隙 ($\delta = 0$) 及有气隙 ($\delta = 1, \delta = 1.5$) 之分。

2. 选择最大磁通密度 B_{max}

选择的 B_{max} 应在磁化曲线的最大饱和值 B_H 以下, 使之在 $B-H$ 曲线的线性段工作。对

冷轧高矽硅钢片按经验 $B_{max} = \frac{B_H}{1.5 \sim 2.0}$ (高斯), 一般取 $B_{max} = 9000 \sim 11000$ 高斯。

3. 确定一次线圈匝数 W_1

根据选定的 B_{max} , 在DKB铁芯的磁化曲线上查出对应的安匝数 $I_0 W_1$, 和已知条件中的最大整定电流 $I_{1Q, max}$, 可按下式近似计算出

$$W_1 = \frac{I_0 W_1}{I_{1Q, max}} \quad \text{匝}$$

4. 确定二次线圈匝数 W_2

根据半导体保护逻辑电路比较电压 U_A 的大小, 并考虑滤波电阻压降 U_B (一般取 1 伏)

及整流管内阻压降 U_C , 则对应于最小整定电流 $I_{1Q, min}$ 时DKB的副边电压 $U_2 = \frac{U_A + U_B + U_C}{0.9}$,

其中 0.9 是单相全波桥式整流的电压整流系数。

由于保护工作在磁化曲线的线性段, 再由 $I_{1Q, min}$ 、 $I_{1Q, max}$ 和 U_2 进而可以推出最大整定电流 $I_{1Q, max}$ 时的副边电压 $U_{2max} = \frac{I_{1Q, max}}{I_{1Q, min}} U_2$ 。于是可按下式求出 W_2 。

$$W_2 = \frac{U_{2max} \cdot 10^8}{4.44 f S_T B_{max}} \quad \text{匝}$$

5. 选择导线截面 S_x 和线径 D_x

一次、二次线圈导线截面和线径均可按下式计算。

$$S_x (1.2) = \frac{I}{j} \quad \text{毫米}^2$$

式中 j ——电流密度, 对于漆包线一般可取 $3 \sim 5$ 安/毫米²。

$$D_x (1.2) = \sqrt{\frac{4}{\pi} S_x (1.2)} = 1.13 \sqrt{S_x (1.2)} \quad \text{毫米}$$

电抗变换器的 D_{x1} 一般考虑正常通入最大负荷电流安全线径, 并保证流过最大故障电流时的过载能力, 一般 $D_{x1} = 1.5 \sim 2.0$ 毫米。对 D_{x2} , 由于二次电流很小, 要保证导线强度, 取 $D_{x2} = 0.13 \sim 0.15$ 毫米。

6. 铁芯窗口面积校验

当铁芯截面选好后, 由图1-6可知铁芯窗口面积为

$$Q = hc \quad \text{毫米}^2$$

一、二次线圈总面积由下式计算

$$\Sigma S = S_{x1} W_1 + S_{x2} W_2 \quad \text{毫米}^2$$

为保证铁芯窗口够用, 应满足