

可控串补 (TCSC) 本体保护原理、配置及实现研究

胡玉峰,尹项根,陈德树,张哲

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 以可控串补本体保护为研究对象,在介绍其基本故障类型与故障形式的基础上,分析了其保护的基本配置与构成,详细说明了各保护模块的基本原理与实现方法,同时阐述了各保护的功能及其作用,以期对该领域的研究提供一个较全面的参考。

关键词: 不平衡保护; 过载保护; 高温保护; 能量保护; 电容器放电保护; 平台闪络保护; 三相不一致保护

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)07-0028-05

1 引言

可控串补的实际运用,为继电保护领域提供了一个新的研究方向:如何配置与提供完整而有效的继电保护系统,以保证可控串补的安全可靠运行。与传统电力系统设备相比较,可控串补设备的组件类型较多,不仅涉及传统的电力元器件,还包括新型的电力电子设备,同时各组件在保护原理与实现技术上也与传统继电保护有一定差别。可以说,整个的可控串补保护是随电力系统发展而产生的一个新型元件保护分支。本文以此为对象,对可控串补保护进行系统研究。探讨其基本配置、相关原理以及实现方法的具体问题。

2 TCSC 本体故障的基本类型

任何一个继电保护系统的构成,都是在充分分析被保护对象可能出现的各种故障与异常工况的基础上,从保证可靠性、灵敏性、选择性几个方面的要求出发而构成。因而,在配置 TCSC 本体保护系统

之前,有必要对可控串补系统可能出现的各种故障作出分析。

图1是TCSC本体的单相结构图,其保护及控制所用的传感器在图中也表示了出来(电容电压 V_C 是通过与电容器并联的大电阻 R 来测量的)。从图中可以看到,TCSC本体电路主要包括串补电容器组、可控硅电感支路(TCR)、氧化锌避雷器MOA与旁路断路器BPS。在这些组件中,串补电容器组与TCR支路是TCSC本体的核心部件,为系统提供可调节的补偿度。氧化锌MOA、TCR支路以及旁路断路器BPS作为TCSC的保护环节,主要为电容器提供过电压保护和为氧化锌提供能量与温度保护。

从TCSC的本体电路以及考虑实际运行工况的角度来看,其可能出现的故障与异常情况主要包括以下几部分:

TCSC本体元件故障。主要有:串补电容器组内部电容器被击穿、氧化锌MOA被破坏、可控硅元件被破坏、绝缘平台绝缘度下降、旁路断路器BPS故障以及隔离开关故障等。

TCSC异常运行情况。主要指由外部系统故障以及异常运行导致的非正常运行。包括:电容器组过载(过电压或过电流)、MOA能量越限或温度越限、MOA过负荷等。

从以上的基本故障类型来看,TCSC本体故障涉及的范围较广、元件的类型较多,因而决定了其继电保护系统的多样性与复杂性。

3 TCSC 本体继电保护系统的基本配置及其原理^[1,2]

针对上述TCSC的基本故障类型与异常运行工况,其继电保护系统一般采用以下配置:

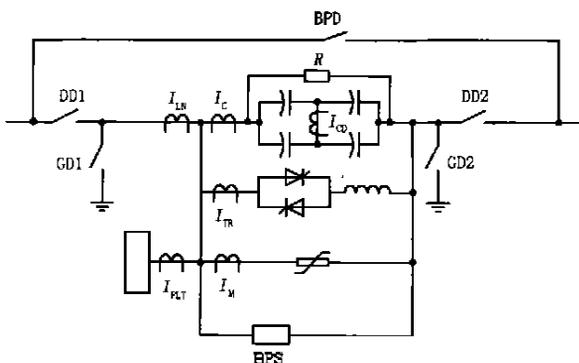


图1 可控串补(TCSC)系统主回路单相图

Fig. 1 The single-phase circuit of TCSC

电容器组保护,主要包括:电容器不平衡保护(差动保护)、电容器过载保护及其自动重投功能、电容器放电功能。

MOA 保护,主要包括:MOA 能量保护、MOA 温度保护、MOA 能量梯度保护、MOA 过流保护以及相应的电容器自动重投功能。

晶闸管元件保护,主要包括电力电子元件保护以及触发回路监视功能。

其它设备保护与监测,主要有:平台闪络保护、断路器失灵保护、三相位置不一致保护以及电容器放电等功能。

3.1 电容器保护

TCSC系统的电容器保护主要为电容器不平衡保护与电容器过载保护。前者主要针对电容器单元内部故障而设置,后者则主要是在电力系统发生过负荷运行等异常情况下为 TCSC 提供保护。下面简要介绍一下两种保护的原理。

3.1.1 电容器不平衡保护

TCSC 串联电容器组的连接,一般采用 H 型的桥式连接方式(如图 1 所示),各桥臂由若干电容器组单元构成,其单元电容器组的内部结构通常如图 2 所示。

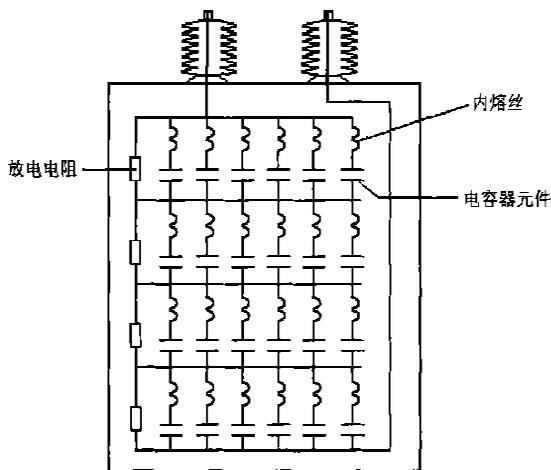


图 2 单元电容器组内部结构图

Fig.2 The internal structure of capacitor unit

当单元电容器组内部电容器元件因过电压而击穿或熔丝熔断时,该电容器元件即退出运行,从而使该电容器组单元等值电容减小。这种减小,将造成流过该单元的电流增加,电压升高,对非故障电容器元件造成不利影响,甚至导致恶性循环。为此,必须设置相应的保护措施,避免这种现象的发生。

常用的保护方法是电容器不平衡保护,它是通

过测量电容器组桥臂中点连接支路的电流(不平衡电流)的大小,来判断与衡量单元电容器组内部电容器元件的运行情况。当单元电容器组内部完好无缺时,在不考虑电容器元件参数差异、测量系统误差时,其中心连接支路上的不平衡电流的理论值应该为 0。当内部有电容器元件退出运行时,桥臂平衡被破坏,不平衡电流随之出现,且这种不平衡电流将随内部电容器元件损坏的个数,即不平衡度的增加而加大,表 1 是一组典型的工程数据。

表 1 串补工程故障电容器元件个数
与相关物理参数关系表

Tab. 1 The relationship between the number of the fault capacitors and the corresponding parameters in the series-compensated capacitor engineering

单元电容器 组中熔丝熔 断个数	不平衡 电流 /A	有故障单元 电压/无故障 单元电压 /p. u.	熔丝熔断元 件电压/无 熔丝熔断元 件电压 /p. u.	有熔丝熔断 单元等值电 容相对比 /%
0	0.000	1.00	1.00	100.00
1	0.152	1.00	1.04	100.00
2	0.317	1.01	1.09	100.00
3	0.497	1.01	1.14	100.00
4	0.695	1.02	1.20	100.00
5	0.914	1.02	1.26	100.00
6	1.156	1.03	1.33	99.99
7	1.427	1.03	1.40	99.99
8	1.730	1.04	1.49	99.99
9	2.072	1.05	1.49	99.99
10	2.464	1.06	1.69	99.99
11	2.911	1.07	1.82	99.99
12	3.431	1.08	1.97	99.98
13	4.043	1.10	2.14	99.98
14	4.773	1.11	2.35	99.98

实际运用中,考虑到电容器元件参数的差异、测量系统的误差,在正常情况下,中心点连接支路也存在一定不平衡电流。且这种电流将随外部线路电流的增大而呈现出非线性增大的规律。因而,为构成灵敏的差动(不平衡)保护,一般采用比率差动构成串补的不平衡电流保护。即计算不平衡电流与线路电流的比值,以此作为衡量保护的动作量。通常,将该保护设定为三段,依次为报警段、低值旁路段与高值旁路段。各段的电流定值依次递增而延时定值依次递减。其中高值旁路可定义为与外部线路电流大小无关,各关系曲线见图 3 所示。

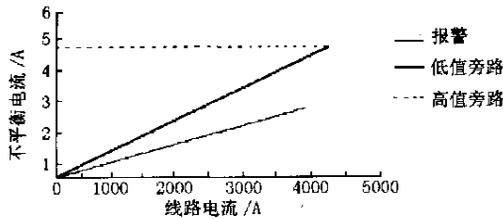


图3 电容器不平衡电流与线路电流的相对关系

Fig. 3 The relationship between capacitor s unbalance current and line current

从图3中可以看出,对于不平衡保护的报警与低值旁路段,采用了比率判别,对于高值旁路,则直接采用不平衡电流作为动作量。这种模式既保证了轻微故障时较高的灵敏度,又可保证在严重故障条件下计算的简易性与动作的速动性,同时还可避免因外部故障电流过大而降低不平衡电流与线路电流的比值,造成不利影响。

另一方面,由于报警段与低值旁路段采用比值作为动作量,在实现时需要考虑靠近零值时的不确定因素。尤其在微机保护中,需要避免出现“ $0 > 0$ ”的现象而造成保护误动。为此,一般需要增设一个线路电流阈值,只有当线路电流超过该阈值时才投入保护功能。

3.1.2 电容器过载保护

系统运行过程中,由于负荷波动、故障的产生、双回线中一回线路的退出等原因,可能导致串补电容器出现过负荷(过流)现象。电容器在过负荷情况下运行,容易造成绝缘老化、介质角损失等现象。不利于电容器的安全运行,需要增设相应的保护措施加以避免。

电力电容器的过负荷运行能力,IEC与IEEE都有相应的标准。以下是IEC60143给出的数据:连续工作1.0 p.u;8 h过负荷能力1.1 p.u;30 min过负荷能力1.35 p.u;10 min过负荷能力1.5 p.u。

根据此标准提供的数据,对于电容器过载现象,常采用反时限过流保护。当电容器电流超过1.1 p.u时,反时限的过负荷保护开始计算,其计算可采用以下积分公式:

$$n_{eq} = \frac{\int_{t_1}^t n_{OL}(t) dt}{\int_{t_1}^t dt} \quad (1)$$

其中, n_{eq} 为 t 时刻等值过载倍数, $n_{OL}(t)$ 为 t 时刻的实际过载倍数,其计算公式为 $n_{OL}(t) = I_C(t) / I_{CN}$, $I_C(t)$ 为 t 时刻电容器电流, I_{CN} 为电容器额定电流。通过公式(1)计算出来的等值过载倍数,不仅考

虑了当前的实际过载倍数,还考虑了前面的累积效应,由此通过查表或插值法得到反时限的时间值,能够比较客观地反映出电容器在波动负荷条件下的耐受能力。因此,只需要通过设置相应的计时器,当累计时间超过上述查表或插值得到的时间值,保护则动作,使电容器退出运行。若在保护动作前,电容器电流恢复到1.05 p.u以下或旁路断路器由于其它保护模块动作而使电容器退出,则将以上的等值过载倍数 n_{eq} 清零。

3.2 氧化锌避雷器(MOA)保护

氧化锌避雷器元件是TCSC过电压保护的重要元件,当TCSC所在系统发生故障时,数倍于负载电流的短路电流将流过串联在线路中的电容器,为避免这种情况下电容器的过电压损坏,通常的串补工程中,都依靠氧化锌避雷器来实现高速的限压保护,利用其非线性电压—电流特性将电容器两端电压限制在保护范围之内。

系统发生故障时,由于MOA的非线性电阻特性,使得故障期间的短路电流主要从MOA上流过,此时,MOA需要吸收巨大的短路容量,造成自身的温度升高。MOA所能承受的短路能量注入与温度是有一定限度的,当超过该限度时,可能导致MOA的爆炸,必须采取措施加以保护。

3.2.1 MOA高温保护

MOA高温保护是通过计算MOA中的电流,包括泄漏电流,并利用MOA的热模型来连续计算避雷器的温度,当温度超过定值时,则旁路TCSC装置。

热模型是MOA高温保护的关键环节,它主要用于通过测量MOA的电流(功率)来计算避雷器的绝对温度。其具体数学模型中包括了3组与装置内部的热电阻和热能量有关的参数:氧化锌避雷器模块、机架、传导及辐射媒介。

氧化锌避雷器一般为多柱并联而成,每柱上又包括若干串联的阀片。因此,需要通过流入MOA的总电流来计算每个阀片上的电流。此时,上述的氧化锌避雷器模块数是计算所需的参数。

机架的结构与材料是决定MOV本体热电阻参数的重要因素,其主要影响热模型中MOV柱、MOV柱与瓷套内壁间以及紧固件、连接件的热阻参数。

传导与辐射媒介主要用于考虑热损失,热模型一般将其用一个可变的介质热电阻代替。当机架与周围空气(或其它传导与辐射介质)的温差增大时,则介质热电阻降低,热损失过程加快。

综合考虑以上因素,可给出串补用MOA的等效

热电路,即热模型,并根据 MOA 所输入的电流来计算出对应的温度值,实现 MOA 的高温保护。

3.2.2 MOA 短时能量保护

MOA 短时能量保护主要是针对系统故障时短时的能量注入而设定的,氧化锌避雷器在能量升高很快时,会生成温度很高的热点,即局部高温点。此时,利用温度保护较难反应这种幅值较大、时间较短的能量注入过程。为此,需设置 MOA 短时能量保护来消除这种异常情况的影响。

MOA 短时能量的计算,可采用瞬时功率的积分得到,其公式如下:

$$E_{\text{mov}} = \int_{t_1}^t i_{\text{mov}}(t) \cdot u_{\text{mov}}(t) dt \quad (2)$$

其中 E_{mov} 为 MOV 的注入能量, $i_{\text{mov}}(t)$, $u_{\text{mov}}(t)$ 分别为 MOA 的瞬时电流、电压值, t_1 为故障起始时刻。

当积分所得的累计能量值超过保护设定的定值,则由保护发出 Bypass 命令。使 MOA 上累计的短路容量得到释放,同时,在相关线路保护动作之前旁路短路电流,抑制 MOA 上短路容量的进一步增加。

3.2.3 MOA 过电流保护

前面所述的 MOA 高温保护与短时能量保护,考虑的都是一种累计效应,无法区分故障的性质,如 TCSC 所在线路故障(定义为区内故障)还是相邻线路故障(定义为区外故障)。这就造成 MOA 的上述保护的動作必须在累计效果达到预定值时才能动作。

若系统发生区内故障,由于 TCSC 所在的线路必定要被相关线路保护切除,所以可以无需等到累计效果达到预定值才旁路 TCSC,而可以直接在判定为区内故障时就发旁路命令。这种做法可以大大减轻 MOA 的负担,延长其使用寿命。

MOA 过电流就是为实现这种目的而设置的保护功能。它的整定值一般大于区外故障时流过 MOA 的最大短路电流。当故障发生时流过 MOA 的电流超过此定值,则必定为区内故障,此时可直接发旁路命令。

3.3 晶闸管元件保护^[4]

晶闸管元件是 TCSC 整体系统的核心部件,它的保护功能也是 TCSC 本体保护与传统继电保护最大的区别所在。

实验与研究表明,晶闸管元件的损坏主要由以下三个因素造成:(1)过电压,(2) dv/dt , (3) di/dt 。因而,对晶闸管元件的保护,主要是针对上述三方面通过晶闸管的外围辅助电路与相应的阀电子系统和

控制策略来完成。

从可靠性与经济性的角度考虑,TCSC 工业设备中的反并联晶闸管多数采用多个晶闸管串联再并联的方式,依据需要承受的电压等级与选用的晶闸管元件标称值并考虑一定的冗余来确定串联元件的个数。这种模式,使得单个元件所能承受的电压远小于 TCSC 设备的额定电压,当串联的晶闸管元件的导通不能做到完全同步,或某些晶闸管元件的触发系统发生故障时,就造成晶闸管元件过电压。在这种情况下,未导通的元件将承受远超过自身额定值的电压,使晶闸管元件被损坏。

常用的晶闸管元件过电压保护是采用 BOD (BreakOver Diode) 方案,即后备触发方案。其基本电路如图 4 所示:从电路图上可以看出,当阀电子系统出现故障或触发不同时,未导通的晶闸管元件将出现过电压。采用 BOD 方案,则可在晶闸管两端电压升高到一定的预定值时(该预定值可保证晶闸管元件的安全),由 BOD 导通补发一触发信号,使元件导通,避免过电压的出现。

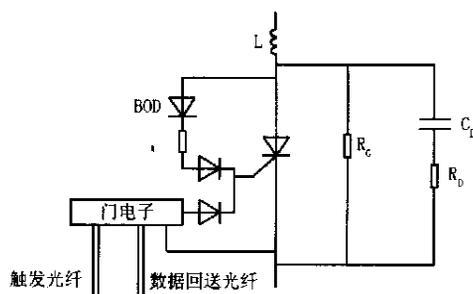


图 4 BOD 保护方案原理图

Fig. 4 The theory diagram of BOD protection scheme

BOD 的動作次数与動作情况,由相应的检测系统通过数据回送光纤送到地面的监控单元,当监控系统发现串联晶闸管元件 BOD 持续动作的次数超过预定值,则说明该元件出现故障(故障可由元件本身或其触发系统引起),若故障元件的个数超过一定,则需要旁路 TCSC。

图 4 中所示的 R_G 、 R_D 与 C_D 也具备一定的过电压保护能力,其中 R_G 为静态均压大电阻,由其保证稳态时分配到每个元件上的电压平均,避免出现电压分布不平衡带来的过电压; R_D 与 C_D 一方面起阻容吸收作用,一方面作为动态均压元件,使得晶闸管元件关断时不出现过电压和大的 dv/dt 。

TCSC 装置的 di/dt 保护主要通过 TCR 支路中的串联电感来完成,即图中所示的 L 元件。由于电感对电流突变有抑制作用,可保证通过晶闸管的电

流不会出现大的突变,确保其安全。

3.4 其它保护功能

除上述保护功能外,TCSC 本体保护一般还包括以下功能模块:

三相不一致保护:实时监视三个 TCSC 平台的旁路断路器位置与相应的隔离刀闸、接地刀闸位置,当出现三相位置不一致时开始计时,时间到达预定值则发三相旁路命令(断路器位置不一致)或报警信号(刀闸位置不一致)。

TCSC 本体保护的许多功能模块,都允许单相旁路串补系统,并依靠自动重投功能来确保故障消除后 TCSC 的对称运行。这种模式对于保证系统稳定,减少 TCSC 保护动作对系统的冲击很有好处。但当 TCSC 本体元件发生故障或外部故障与异常工况持续时间较长时,自动重投功能可能失效或无法满足重投条件,系统将长期处于不对称运行,此时必须依靠三相不一致保护将三相 TCSC 全部旁路,保证系统的安全稳定运行。

三相不一致保护的動作,需要与相关线路保护密切配合,一条基本的原则是其时间必须小于线路保护零序电流动作时间。否则将导致线路保护的误动(具体情况还需要考虑串补度的大小及其可能引起的零序电流大小)。

断路器失灵保护:旁路断路器在接到合闸命令后,预定时间到达时,若没有动作,则发合闸失灵保护信号,远跳两边的线路断路器。

旁路断路器在接到分闸命令后,预定时间到达时,若没有动作,则发分闸失灵保护动信号,将三相 TCSC 全部旁路,避免引起系统的不对称运行。

平台闪络保护:TCSC 的本体设备一般都按相安装在绝缘平台上,平台由绝缘子支撑,与大地绝缘。各 TCSC 本体设备通过一个公共端与平台相连(具体见图 1),并在连接支路上配置电流互感器。当绝缘平台的绝缘度下降,则绝缘子的泄漏电流增大,这种电流变化可以从平台与 TCSC 本体设备的连接支路上反应出来,通过监视该支路的电流大小来判断平台的绝缘好坏。

电容器放电功能:系统发生区内故障时,由于存在高阻接地、远端故障等可能性,因而无法保证在区内故障时 TCSC 的本体保护一定能够使 TCSC 转入 Bypass 模式。若在线路断路器跳开之前,串补电容一直未被旁路,则线路断路器断开之后,串补电容器中将有较大的直流残压。该直流电压可能造成以下

影响:(1)故障点第二次熄弧延迟;(2)线路断路器暂态恢复电压(TRV)升高^[3];(3)重合闸时间增长。

研究表明,通过放电间隙对电容器进行放电操作可以解决上述问题。为此,在 TCSC 本体保护功能中,配置了电容器放电功能。当线路保护发跳闸命令时,同时也发远跳信号启动 TCSC 旁路。TCSC 本体保护在接收到远跳信号后,将根据线路断路器的操作旁路单相或三相。并在线路重投成功后,重新使 TCSC 投入工作。

4 结束语

本文以可控串补本体继电保护系统为研究对象,在分析其基本故障类型的基础上,详细介绍了 TCSC 本体继电保护系统的基本配置、原理与实现技术,并结合实际系统的运行要求,对这些保护在实际运用中的相关问题以及与线路保护的配合中出现一些问题做出了初步的论述,期望对同行开展这个领域的研究有所借鉴。

参考文献

- [1] 丁扬. 500 kV 阳—淮线串联补偿装置的保护配置原则[J]. 现代电力, 2001, 18(2): 32 - 38.
- [2] 赵淑珍, 于德明, 李钢. 大房双回 500 kV 线路蔚县串补站二次系统及实验[J]. 华北电力技术, 2002, (5): 13 - 16.
- [3] 曾昭华, 蒋卫平, 班连庚. 伊冯 500 kV 可控串补系统中断路器的工作条件及操作过电压[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 1 - 5.
- [4] Wheeler J J, Davidson C C, Williams J D G. Design Aspects of the Chandrapur 2 X 500MW Back to Back HVDC Scheme [C]. Cigre 1996, 14-104: 1 - 8.
- [5] Piwko R J, Wegner C A, Furumasa B C. The Slatt Thyristor Controlled Series Capacitor Projector Design, Installation, Commission and System Testing [C]. Cigre 1994, 14 - 104.
- [6] Christl N, Hedin R, Krause P E, et al. Advanced Series Compensation with Thyristor Controlled Impedance [C]. Cigre 1992, 14/ 37/ 38-05: 1 - 11.

收稿日期: 2002-09-30; 修回日期: 2003-02-26

作者简介:

胡玉峰(1975 -),男,博士研究生,从事电力系统继电保护的研究;

尹项根(1954 -),男,教授,博士生导师,电力系主任,主要从事电力系统继电保护,变电站自动化及电力系统控制的研究;

陈德树(1930 -),男,教授,博士生导师,IEEE 高级会员,主要从事电力系统继电保护与安全稳定控制等领域的研究。

行波法在电气化铁道牵引网故障测距中应用的可行性研究

焦在滨,高仕斌

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 根据电气化铁道牵引网的各种供电方式,在具体分析的基础上,讨论了行波法在电气化铁道牵引网故障测距中应用的可行性,并对一些需要考虑的问题作了初步的探讨。

关键词: 行波; 电气化铁道; 牵引网; 故障测距

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)07-0033-04

1 引言

近年来随着电子技术和计算机技术的发展以及小波分析等数学工具在故障信息分析和检测领域的应用逐渐成熟,利用故障的高频暂态信息中的行波进行故障测距的方法在电力系统中得到了广泛的应用。电气化铁道牵引网采用的是工频单相 25 kV 交流供电制式,其供电原理和结构与电力系统中的高压传输线有很多相似之处,但也有其自身的显著特点。本文分析了行波法应用于电气化铁道牵引供电系统的可行性,以期能够通过行波法在电气化铁道牵引网中应用行波测距,达到缩短抢修时间,提高运输效率的目的。

2 行波测距理论

电力系统的高压传输线和电气化铁道中的牵引网的作用都是传输电能,实际的输电线路一般可以看作是均匀分布参数电路,由于存在着分布电感和分布电容,当线路上发生故障时,故障点会产生向线路两端传播的行波。如果在传输过程中输电线的参数和波阻抗发生变化,那么行波就将发生反射和折射现象。行波法就是利用波在故障点与母线以及其他波阻抗之间的传播(发生反射和折射现象)来实现对故障点的快速精确测距的。

传统的行波法测距装置根据实现方法的不同可以分为 3 种类型^[1]。

A 型装置利用故障点产生的行波,根据波在故障点和测量点(一般设在母线处)往返一次的时间和行波的波速利用公式 $D_F = \frac{l}{2}$ 来确定故障点的位置(式中 t 表示行波在故障点与测量点之间传播所用的时间)。这种类型的测距装置实现的关键在于识别反射波是来源于故障点还是对端母线。这种装置适用于单端供电的线路。

B 型装置利用故障点产生的行波到达线路两端的时间,借助于两端的通信实现测距,由于不需要识别行波的性质,因此实现起来困难较小。近年来随着 GPS 技术的发展,使得基于 GPS 的精确对时双端行波法(D 型装置)得以实现^[2],其原理与 B 型装置一样。当 F 点发生故障后,将产生向两端母线 m 和 n 传播的行波(如图 1 所示,其中箭头方向为行波传播的方向),母线 m 和 n 处的行波测距装置记录下行波波头信号到达的时刻,然后利用公式 $D_F = \frac{(t_m - t_n) + l}{2}$ 即可得到故障点距两端的距离。这种装置适用于双端供电的线路,由于 GPS 可以精确获得行波到达的时刻,使得这种方法计算故障距离是精确并且稳定的。

The study in protection theory, disposition and realization of TCSC device

HU Yü-feng, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, ZHANG zhe

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)

Abstract: Aim at the protection system of TCSC device and based on the introduction of its primary fault type, this paper analyzes the basic disposition and structure, explains the basic theory and realization method of the protection system detailedly, at the same time, expatiates their functions and effects. Hoping the paper can provide a full-scale reference in this research field.

Key words: unbalance protection; overload protection; high-temperature protection; energy protection; capacitor discharge function; insulated platform flashover protection; three-phases un-identical protection