

串联补偿装置在超高压交流输电线路中的研究

洪志鹏

(四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610016)

摘要:主要研究在超高压远距离交流输电线路中, 串联补偿装置的应用及其在系统中的作用, 并且详细解析串联补偿装置的原理及结构; 重点引入了串联补偿装置的新技术, 论述新技术的可靠性及优势。新技术应用涉及如下, 串联补偿装置中电容器推荐采用无熔丝电容器, 其接线宜采用双桥差接线; 低海拔地区推荐采用复合外套 MOV, 其技术经济优势明显, 高海拔及工业高污染地区由于紫外线辐射、酸雨等因素会导致复合外套出现老化现象, 推荐采用瓷外套 MOV; 电抗+MOV 串电阻型虽然结构和设计复杂, 但其不受当地环境影响, 为密闭结构, 可靠性高, 推荐采用电抗+MOV 串电阻型阻尼回路; 通过对固定串补(FSC)与可控串补(TCSC)的分析比较, 可控串补它既保持了固定串补的所有优点又弥补了固定串补的不足, 具有潮流控制、阻尼线路功率振荡、提高系统暂态稳定和抑制次同步振荡等多种功能, 是目前柔性交流输电系统技术中实用性强的一项技术, 随着今后设备制造成本的进一步降低, 本文推荐采用可控串补(TCSC)替代固定串补(FSC)。本文还论述了放电间隙(GAP)、旁路断路器(BPS)、保护及控制系统的基本原理和应用。

关键词:固定串补(FSC); 可控串补(TCSC); 复合外套 MOV; 电抗+MOV 串电阻型阻尼回路; 放电间隙(GAP); 旁路断路器(BPS)

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)S2-028-07

对于超高压远距离交流输电线路, 其输电能力主要取决于线路的稳定极限, 功角稳定性使输送功率、输电距离受到限制, 必须采取补偿措施; 在输电线路中加入串联补偿电容器(简称串补), 能有效减小线路电抗, 缩小线路两端的相角差, 从而有效地提高输电线路的输电能力和系统稳定性。随着国内超高压线路输送容量及长度不断提高, 500 kV 及上超高压交流输电线路已经广泛引入串联补偿电容器, 着重研究固定串补(FSC)和可控串补(TCSC)的基本原理及在系统中的作用, 串补内电容器、金属氧化物限压器(MOV)、放电间隙(GAP)、阻尼装置和旁路断路器(BPS)等最新技术的应用。

1 固定串补(FSC)

1.1 固定串补在系统中等效分析

固定串补^[1]其补偿度为原始设计值, 此值为固定不可以调节。固定串补串入输电线路中, 其等效电路可由图 1 表示, 串联电容器容抗 X_C , 线路等效

电抗为 X_L , 串补度 $K = X_C / X_L$ 。



图 1 串联补偿线路等效图

其线路的传输功率可由下面公式(1)表示

$$P = \frac{U_A U_B}{(1-K)X_L} \sin \delta \quad (1)$$

式中, δ 为两端线路电压之间的相角差, 线路传输有功功率 P 随着补偿度 K 的增加, 线路的传输能力增加, 串联补偿提供的无功功率也迅速增加。

1.2 固定串补典型接线

固定串补设备组成部分, 概括来讲固定串补装置由电容器组 C、金属氧化物限压器 MOV、放电间隙 GAP、阻尼装置 D、旁路断路器 BPS、绝缘平台、保护和控制系统组成, 接线如图 2 所示。

根据固定串补接线(图 2), 下节将分开论述固定串补各主要设备特性及作用, 并且对新技术的应

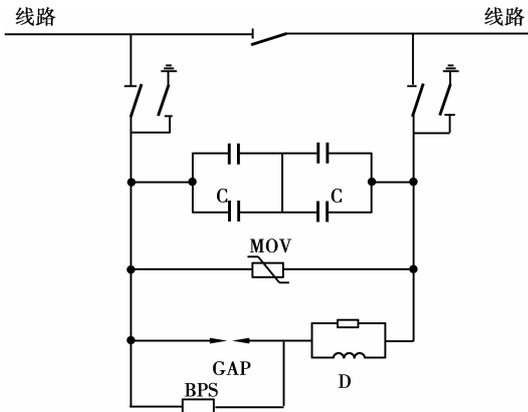


图2 固定串补典型接线

用做出分析比较。

1.3 串补中电容器组

1) 电容器的结构型式

电容器组是固定串补的核心设备,电容器单元主要是以串联或并联的连接结构,串补中电容器主要分内熔丝和无熔丝2种型式。内熔丝型式电容器广泛用于各级电网,产品成熟,国内绝大部分串补工程中均采用内熔丝型式电容器。但随着无熔丝电容器制造工艺水平的提高,并且无熔丝电容器结构简单、体积小等优点,使得在欧美发达国家,无熔丝电容器组广受青睐,在市场上占有主导地位,因此本次着重介绍无熔丝电容器组在串补中的应用。

2) 电容器的接线型式

内熔丝与无熔丝电容器结构的区别,决定了其单元接线及保护方式的不同,通常内熔丝电容器采用H型接线(图3);但对于无熔丝电容器不宜采用H形接线,因其串联的电容元件数多,有元件故障时,其他正常的元件上的过电压小,若采用H形接线,则相当把串联元件数减半,这就导致过电压扩大1倍,所以无熔丝电容器不采用H形接线,而是采用双桥差接线(图4),通常是将每相的并联段分为2大组,然后测其差分电流。

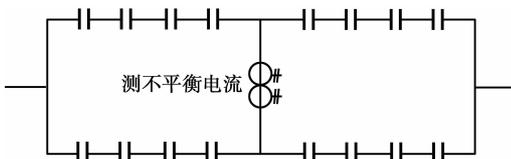


图3 内熔丝的H型接线

3) 无熔丝电容器 [2]

所谓无熔丝电容器是指在电容器组和电容器单

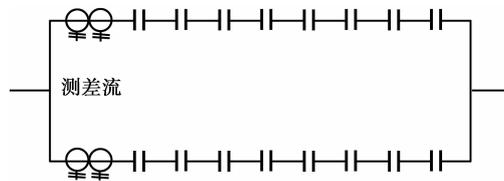


图4 无熔丝的双桥差接线

元中,不装外、内熔丝,每个电容器单元内部由多个电容元件串并联组合,电容器内部元件故障时,绝缘介质击穿将故障元件短路。绝缘介质采用全膜介质,全膜介质击穿会使两极板形成牢固的熔接,ABB公司曾经对全膜介质的故障电容器单元进行相关验证试验,证明介质击穿后极板能可靠连接。

无熔丝电容器内部接线型式分为先串后并(图5)和先并后串(图6)两种,从电容器安全要求考虑,对于无熔丝电容器要求流过击穿元件的故障电流尽可能小,远离10%外壳爆裂曲线,为达到此要求,特别对于大容量电容器宜采用了先串后并接线。其实际工作原理为当某一个电容器元件故障时,该元件被短路,相应该串的阻抗减少,导致流过该电容器单元和对应串的电流增加,该串上其他正常电容器单元的电压则会相应增加。如果在同一串内多个电容器元件发生故障,该串的阻抗就会进一步减少,导致流过该串的电流接着增加。所以在实际设计中必须保证增大的电流/电压在电容器的承受能力范围内。

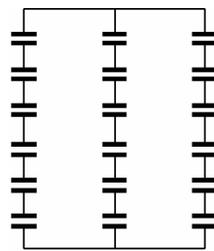


图5 先串后并

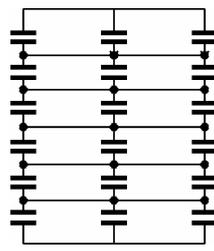


图6 先并后串

4) 无熔丝电容器优点

无熔丝电容器能隔离故障元件、使电容器在容量仅发生微小变化的条件下保持正常运行,能达到内熔丝电容器所具有的保护功能。相比之下,无熔丝电容器优点如下:

与内熔丝电容器相比,无熔丝电容器单元和内部元件并联储能较小,元件击穿时不易损伤临近元件或对壳绝缘,有利于防止故障的扩大或外壳爆炸。

由于内熔丝电容器的每个元件上串联了一根内熔丝,电流流过内熔丝会产生一定的损耗,而无熔丝电容器不存在此部分损耗,所以无熔丝电容器的整体损耗较低。

与内熔丝电容器相比,成本较低、结构简单、元件容量大,生产效率较高。

从检修的角度,无熔丝电容器可以非常快速方便地检测出故障的电容器单元。

随着电容器介质材料和制造技术不断发展,无熔丝电容器将会在特高压串补中广泛应用。

1.4 串补中金属氧化物限压器(MOV)

在电力系统中比较通用的限压措施是在电容器组两端并联金属氧化物限压器(简称 MOV),对串补的主设备电容器进行保护。

1) MOV 工作原理及参数确定

它的工作原理是利用 MOV 优越的非线性伏安特性,将电容器组的工频过电压直接限制在可以接受的水平以内。由于这里的 MOV 用于限制工频过电压,MOV 动作持续时间相对较长,工频续流大,能耗巨大,因此 MOV 需要采取多柱并联的方式。

MOV 额定参数是由串补装置区内外故障条件或区内过电压水平来决定。MOV 必须能承受串补正常及过负荷运行条件下电压的作用,并留有适当的裕度;能承受通过串补摇摆电流的作用;能将串补两端的过电压限制在正常范围内;并且 MOV 应有足够容量以吸收系统故障过程中增加的能量;MOV 必须要承受来自内外部故障的应力。根据以上要求给出参数,并且最终定出与保护水平相配合的避雷器组额定能量参数值(考虑一定裕度)。

2) MOV 外绝缘材质的选择

MOV 作为串联电容器组的主保护设备,对于整套串补装置起着十分重要的作用,目前 MOV 外绝缘材质主要有瓷外套与复合外套两种。

中国国内的串补工程中绝大部分 MOV 采用瓷外套作为外绝缘,复合外套 MOV 应用相对较少,但由

国外厂家供货的串补工程中大部分的 MOV 采用复合外套作为外绝缘。在相同机械要求的情况下,瓷的壁厚要比复合材料厚得多,也就是说在相同机械性能要求下的瓷外套的重量要比复合外套的重量大;MOV 内部出现短路故障且防爆措施不当时瓷套会爆炸,危及周围设备,影响整个系统的稳定运行;瓷外套在输运及安装过程中很容易发生损坏,抗破坏性较差;瓷外套耐污性能略差。

3) 复合外套 MOV 优点

复合外套是以高分子硅橡胶材料为主,复合外套 MOV 由硅橡胶复合外套、环氧管、阀片、连接金具等组件构成的综合体,其工作机理与传统瓷外套 MOV 是一致的,只是在外绝缘的选择上有所不同,复合外套优点如下:

复合外套的比重为瓷外套的 1/3,在相同的几何尺寸下复合外套 MOV 的重量可以减少到瓷外套 MOV 的 30%左右,很大程度上方便了设备的运输和安装,从另一角度来看由于复合外套 MOV 本身重量更轻,更有利于降低串补绝缘平台的重量,从而降低了对串补绝缘平台抗震性能的要求。

硅橡胶表面具有耐污性和自洁性,当表面有污秽时,雨水的冲刷可起到一定的清洁作用。

硅橡胶材料表面具有憎水性,即排斥水珠的性能,水在硅橡胶表面上呈珠状,不易形成连续的水膜,因此,不像其他物体表面一样能形成连续水膜使电流容易传导,即使表面沉积污秽,憎水性可转移至污秽层上。这样,又提高了耐污性能,减少了设备维护的工作量。

复合外套的导热系数小于瓷外套的导热系数,在相同几何尺寸下,其散热性能要比同样结构的瓷外套 MOV 略差。但经试验验证,复合外套 MOV 的降温特性能满足串补工程的应用需求。

由于串补装置中 MOV 属于户外安装设备,采用复合外套做外绝缘的 MOV 在紫外线辐射、酸雨等因素影响下会导致复合外套出现老化现象,而瓷外套就不存在老化现象。因此就特别要求在高海拔及工业高污染地区采用瓷外套 MOV,其他一般地区采用复合外套 MOV 优势明显,值得今后工程推广。

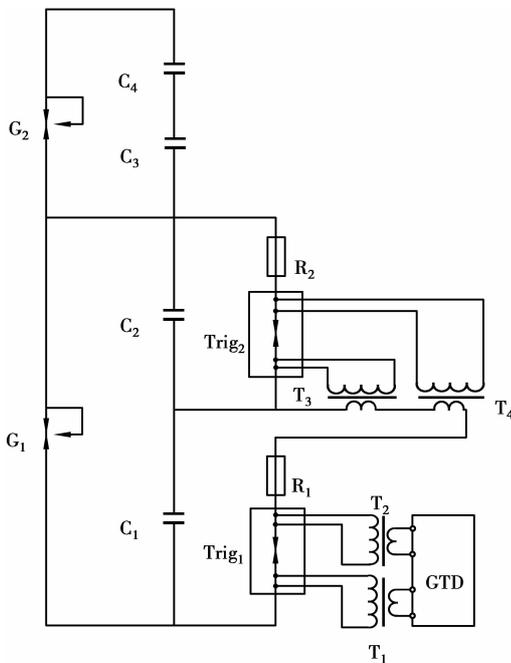
1.5 火花放电间隙

火花间隙系统在串补系统中起着保护 MOV 的重要作用,是 MOV 的主保护和电容器组的后备保护。当线路出现接地故障或其它故障时,流过 MOV 的电流或吸收的能量将超过定值,需要迅速将 MOV

旁路,防止 MOV 过热损坏,同时保护电容器组免受电压过大的损害。一般采用强制电压闪络触发方式,闪络间隙的自击穿电压整定为比 MOV 残压高 10%,因此线路故障时不会自放电,只有通过强制触发才能使间隙放电。为使 MOV 能够迅速被旁路,从保护发出火花间隙强制触发命令到火花间隙完全导通的时间不超过 1 ms。

1) 火花间隙导通原理

常见串补用火花间隙系统接线^[3]见图 7,串补正常运行时,4 个均压电容 C 将串联电容器组上的电压平均分配在 2 个火花间隙上,整个火花间隙上下两端并接在旁路开关上。



$C_1 \sim C_4$ 均压电容器, $T_1 \sim T_4$ 脉冲变压器
 $C_1 \sim C_2$ 主间隙, $R_1 \sim R_2$ 限流电阻
 $Trig_{1,2}$ 密封间隙

图 7 火花间隙系统接线

G_1 、 G_2 为主间隙,内部有闪络间隙和续流间隙,近似看作 3 个电极; $Trig_{1,2}$ 为密封间隙(Triggered gap),分别包括 2 个相对的电极及电极中的火花塞; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为 4 个规格相同的均压电容器,其中 C_1 、 C_2 各自并联在密封间隙的两端, C_3 、 C_4 串联后并联在主间隙 G_2 两端。触发信号通过控制箱(GTD, Gas triggering Device)经脉冲变压器升压后通入密封间隙。火花间隙的完整工作过程:串联补偿装置正常运行时,2 个主间隙(G_1 、 G_2)各承担串联电容器组额定电压的 0.5 U_p 。当输电线路出现接地故障时,由限压器(MOV)将电容器组的过电压

限制在 2.3 U_p 。主间隙的闪络间隙通过整定不能自主击穿,因此在接收触发命令前,2 个主间隙各承担 1.15 U_p 。线路发生故障后,与采样电容串联的 cT 将故障信号通过光纤传到触发控制系统,接收到触发命令时,触发控制箱将同时向脉冲变压器 T_1 和 T_2 的一次绕组发出脉冲信号,经变压器升压后密封间隙 $Trig_1$ 的 2 个球面电极上的火花塞对球面放电,产生的小火花将迅速促使密封间隙 $Trig_1$ 击穿。 $Trig_1$ 击穿后,均压电容器 C_1 相当于被 T_3 和 T_4 的一次绕组以及限流电阻 R_1 短路,迅速放电使电压降低。同时在脉冲变压器 T_3 和 T_4 的二次绕组产生的高压脉冲将使密封间隙 $Trig_2$ 像 $Trig_1$ 一样被击穿,并使 C_2 对限流电阻 R_2 放电。 C_1 和 C_2 的电压迅速降低,进而使 C_3 和 C_4 电压迅速升高,带动主间隙 G_2 上的电压迅速升高到自放电水平并被击穿。 G_2 短路,则过电压都施加在了主间隙 G_1 上, G_1 电压迅速升高击穿 G_1 。至此,2 个串联连接的主间隙全部放电,将串联电容器组和 MOV 经阻尼回路旁路。

火花间隙击穿过程的重点是,在密封间隙的两端设置了触发脉冲箱,电极上设置了火花塞,当触发箱将高电压突然施加在火花塞上时,就会在火花塞头部与电极外表面之间产生电火花,在均压电容器提供的强电场下,该电火花将促使密封间隙立即放电击穿。

2) 火花间隙结构型式的选择

目前应用较广泛的是双间隙结构,铝质外壳,石墨电极。当用于过电压保护时,可以采用“强制触发”和“自动触发”有 2 种不同的方式。该设备主要特点是触发间隙是密封的,其击穿特性与气候因素无关。

1.6 旁路断路器

用于投入和退出串联电容器组,同时也为火花间隙灭弧及去游离提供必要条件。由于火花间隙是非自熄灭型的,自身没有灭弧能力,放电电弧要在旁路断路器合闸或线路断路器分闸后才能熄灭。旁路断路器只用于投入或退出串联电容器组,并不需要其开断短路电流,所以不要求断路器具有很大的遮断容量。不过作为电容器、MOV、火花间隙的最后一级保护设备,旁路断路器要在紧急情况下将串补退出运行,对其合闸时间要求比较严格,通常小于 50 ms。

1.7 阻尼回路

1) 阻尼回路工作原理

一般由阻尼电阻和阻尼小间隙串联后再与阻尼电抗器并联组成。作用是在间隙和旁路开关动作时,限制电容器组放电电流的幅值和频率,减小放电过程对电容器寿命及保护间隙和旁路断路器的动热稳定性的影响,同时又能及时释放电容器组残余电荷,避免其对线路断路器恢复电压和操作过电压、线路潜供电弧以及对系统的过电压产生不利的影 响。工作原理是,放电电流频率高,则流过阻尼电抗器产生的电压也较高,使阻尼小间隙击穿,将阻尼电阻接入回路,迅速减小电容器组的放电电流,减轻了电容器组、火花间隙和旁路断路器的负担。

火花间隙动作或旁路断路器合闸,流过电容器、火花间隙或旁路断路器的放电电流可能很小,为了限制该电流幅值。确保串联电容器、旁路断路器和火花间隙的安全运行,在串补站中一般都有阻尼装置。

2) 4 种阻尼回路的特点

目前,在串补站中使用的阻尼装置主要有电抗型、电抗+电阻型、电抗+间隙串电阻型、电抗+MOV 串电阻型

电抗型:阻尼回路由单台电抗器构成,利用较低的品质因数,可以加速放电电流的衰减。这种类型的阻尼装置结构简单,造价低,但放电电流衰减慢,但系统短路电流较大时电抗器吸收的能量可能比较大。

电抗+电阻型:阻尼回路由空心电抗器和并联电阻构成。其特点是电路衰减比较好,但长时间运行时电阻损耗较大,对电阻的热容量要求比较高。

电抗+间隙串电阻型:阻尼回路由空心电抗器和带间隙的并联电阻构成。其特点是设计简单,电容器放电电流的衰减特性比较好,长时间运行时阻尼回路损耗较低,当系统短路电流较大时阻尼回路吸收的能量减少。

电抗+MOV 串电阻型:阻尼回路由空心电抗器和带 MOV 的并联电阻构成。其特点是长时间运行时阻尼回路损耗较低,但结构和设计较为复杂。

3) 阻尼回路的选择

根据以上 4 种阻尼回路的特点,虽然电抗+间隙串电阻型设计简单,但在国内外实际工程中,出现过很多故障,造成了系统的不稳定。而电抗+MOV 串电阻型虽然结构和设计复杂,但其不受当地环境影响,为密闭结构,可靠性高,所以推荐采用电抗+MOV 串电阻型阻尼回路。

1.8 控制保护系统

串补装置控制和保护系统完成对串补设备的主要电气量和运行状态的测量、操作和运行状态的控制、主设备的监控保护。包括完整的控制、保护、监视、测量、录波和信号设备,串补控制保护系统采用双重化原则配置,并具有对自身和对外接口回路的自检和自诊断功能,两套系统完全独立、互为冗余。

串补的监控系统采用双层网络结构,由站控层和间隔层两个部分组成,间隔层控制设备按每套串补设备双重化配置,以实现 对串补装置的全面监视、控制、闭锁和保护等功能。

保护系统的作用是在发生故障和其他非正常工作情况下保护串补平台上的设备及旁路断路器不被损坏,通过控制触发火花间隙,合旁路断路器来保护一次设备。

2 可控串补(TCSC)

2.1 可控串补在系统中等效分析

可控串联补偿装置^[4](thyristor controlled series compensation,简称 TCSC)是柔性交流输电系统(Flexible AC transmission system,简称 FACTS)的重要分支,它是利用对可控串补阻抗的平滑控制来提高电力系统的输送能力和稳定性。将电容器串接于输电线路中,同时在电容器两端并联一晶闸管阀控电抗器,通过调节与串联电容器并联的相控电抗器支路的晶闸管触发角度,控制流过相控电抗器的电流,改变电容器电压,达到控制串补等值阻抗 $X_{C可调}$ 值大小,从而改变串补度 $K_{可调} = X_{C可调} / X_L$ 。

其等效电路可由图 8 表示,串联电容器容抗 $X_{C可调}$,线路等效电抗为 X_L ,串补度 $K_{可调} = X_{C可调} / X_L$ 。



图 8 可控串联补偿线路等效图

其线路的传输功率可由下面公式(2)表示

$$P = \frac{U_A U_B}{(1 - K_{可调}) X_L} \sin \delta, \quad (2)$$

式中, δ 为 2 端线路电压之间的相角差,线路传输有功功率 P 随着补偿度 K 值的调整而灵活变化。

2.2 可控串补典型接线

可控串补设备组成部分,由一个串联电容器 C

和一个双向晶闸管控制的电抗器 L (即 thyristor controlled reactor, 简称 TCR 支路) 并联组成。TCSC 还包括保护用的金属氧化物限压器 MOV、放电间隙 GAP、阻尼装置 D、旁路断路器 BPS、绝缘平台、保护和控制系统等组成。接线如图 1.2 所示。

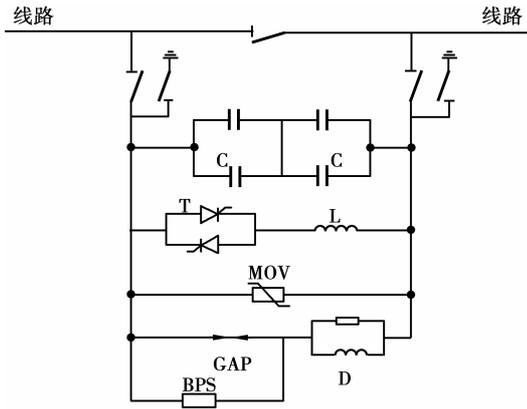


图 2.2 可控串补典型接线

2.3 可控串补各主要元件特性及作用

在此着重研究可控串补中 TCR 支路元件,其他部分(包括金属氧化物限压器 MOV、放电间隙 GAP、阻尼装置 D、旁路断路器 BPS、绝缘平台等)前节已做了详细论述。TCR 支路元件由串联电容器 C+双向晶闸管+电抗器 L 组成。

晶闸管阀:通过控制晶闸管阀的触发角可以控制流过相控电抗器的电流,达到调节可控串补装置的等效容抗,从而改变线路阻抗的目的。同时,合适的触发策略,还可以较大降低串补装置对 MOV 容量的要求。

相控电抗器:相控电抗器一般采用空心电抗器,其工频电抗值小于电容器组的工频容抗值,两者之比约为 0.12~0.2。相控电抗器和晶闸管串联,通过晶闸管阀调节流过相控电抗器的电流实现调节可控串补装置电抗的大小和性质。

2.4 可控串补的运行模式

根据晶闸管触发角的不同,可控串补可以运行在晶闸管闭锁、晶闸管旁通、容性微调及感性微调 4 种模式。

1) 晶闸管闭锁模式

在这种模式下,晶闸管触发角 $\alpha=180^\circ$,其导通角 $\beta=0^\circ$ 。此时,晶闸管处于截止状态,流过 TCR 支路的电流零,电容器电流就等于线路电流。整个 TCSC 的运行特性相当于常规固定串补,对应的容抗值称之为基本容抗值,即串联电容器的容抗 X_C 。

TCSC 在此状态下的线路补偿度称为基本补偿度。

2) 晶闸管旁通模式

在这种模式下,晶闸管触发角 $\alpha=90^\circ$,其导通角 $\beta=180^\circ$ 。晶闸管处于全导通状态,流过 TCR 支路的电流为连续的正弦电流。TCSC 装置等效为串联电容器与电抗器并联运行,但由于所选择的电抗器感抗比电容器容抗要小的多,线路电流全部从晶闸管控制的电抗器支路流过,整个 TCSC 呈现为一小值感抗。

3) 晶闸管容性微调模式

晶闸管部分导通模式下的一种情况是容性微调模式。在该模式下,晶闸管的触发角 $\alpha_{Cmin} < \alpha < 180^\circ$ 。TCSC 装置的电容器与 TCR 的并联电路中存在一环路电流。该电流与线路电流 I_{Line} 共同流过电容器,导致电容器两端电压增加,相位滞后线路电流,其效果是增加了 TCSC 的基波等效容抗。TCSC 通常都运行于该模式,在其允许范围内通过改变触发角 α 的大小,可使 TCSC 的基波等效容抗在最小值(基本容抗值)与最大值(通常是基本容抗值的 1.7~3.0 倍之间,主要取决于线路电流和串补的短时过载能力等条件)之间连续可调。

4) 晶闸管感性微调模式

晶闸管部分导通模式下的另一种情况是感性微调模式。此时,晶闸管的触发角 $90^\circ < \alpha < \alpha_{Lmax}$ 。TCSC 装置的电容器与 TCR 的并联电路中环路电流方向与容性微调时相反,导致电容器电流的基波分量与线路电流方向相反,电容器电压超前线路电流,TCSC 呈现为可调感性电抗。

2.5 可控串补的优缺点

1) 相对固定串补,可控串补的优点如下。

能灵活的调整线路阻抗以适应系统运行条件的变化。

可控串补装置和固定串补装置相比,在相同的补偿度下,在提高系统的稳定性和线路输送功率方面能力更加突出,在抑制次同步谐振,抑制系统功率摇摆和低频震荡,降低对 MOV 能量的要求,减少线路三相不平衡度方面有固定串补所不能的功能。

提高系统稳定水平。如果安装位置合适,串联补偿装置能够减少机组间电气距离,增加同步力矩,提高稳定水平。可控串补由于可以利用电容器的短时过载能力,因而对提高系统暂态稳定水平的能力比常规串补更强。

在网状电网中,可控串补可用于控制线路潮流。

如果控制得当,可降低网损,消除潮流迂回,改善潮流分布,防止过负荷,提高输送能力。

增强系统阻尼,地区电网之间常因输送功率大,而存在弱阻尼或负阻尼现象,利用可控串补可以改善阻尼,提高静态稳定极限。

2)同时也存在以下几点弊端。

可控串补成本比固定串补昂贵很多,此项技术原基本由国外公司所垄断,目前国内也仅一家能生产,要求制造厂家具有全面的专业技术背景和很强的综合实力。可控串补设备保护系统复杂,集成难度大,可控串补设备的组件类型较多,系统构成复杂,不仅涉及传统的电力元器件,还包括新型的电力电子设备。国内可控串补装置目前运行很少,运行时间较短,应用的案例较少,目前可控串补的运行、检修、实验技术规范不完善。但是由于可控串补是通过改变晶闸管阀的触发角度,可以在大范围内快速、平滑地调节可控串补的阻抗值,不仅能显著提高输电线路传输容量,而且还灵活控制系统潮流,增强系统阻尼,抑制次同步谐振(SSR)。技术优势明显,因此,随着今后技术的发展,可控串补技术会越来越成熟,设备制造成本也会相应降低,可控串补(TCSC)可逐步替代固定串补(FSC)。

3 结论

主要研究超高压远距离交流输电线路,串联补偿装置的应用及其在系统中的作用,通过对串联补偿装置原理和结构的详细论述与比较,得出如下结论:

1)串联补偿中电容器推荐采用无熔丝电容器,其接线宜采用双桥差接线。

2)通过对瓷外套与复合外套的金属氧化物限压

器(MOV)分析比较,低海拔地区采用复合外套MOV优势明显,值得今后工程推广,高海拔及工业高污染地区由于紫外线辐射、酸雨等因素会导致复合外套出现老化现象,推荐采用瓷外套MOV。

3)通过对四种阻尼回路分析比较,电抗+MOV串电阻型虽然结构和设计复杂,但其不受当地环境影响,为密闭结构,可靠性高,推荐采用电抗+MOV串电阻型阻尼回路。

4)放电间隙(GAP)推荐采用双间隙结构,该设备主要特点是触发间隙是密封的,其击穿特性与气候因素无关。

5)通过对固定串补(FSC)与可控串补(TCSC)的分析比较,可控串补它既保持了固定串补的所有优点又弥补了固定串补的不足,具有潮流控制、阻尼线路功率振荡、提高系统暂态稳定和抑制次同步振荡等多种功能,是目前柔性交流输电系统技术中实用性强的一项技术,随着今后技术的发展,可控串补技术会越来越成熟,设备制造成本也会相应降低,可控串补(TCSC)可逐步替代固定串补(FSC)。

参考文献:

- [1] 周孝信. 电力系统串联补偿[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 周存和. 无熔丝电容器[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(3): 18-20
- [3] 周启文, 潘勇斌, 王德昌, 等. 500kV 串补系统中火花间隙系统研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 40-44.
- [4] 周孝信, 郭剑波, 林集明, 等. 电力系统可控串联电容补偿[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

(编辑 侯 湘)