

TCSC 与 FSC 对线路保护影响的对比分析

孔永科,王增平,刘青,吴烽,彭谦

(华北电力大学 电力工程系,河北 保定 071003)

摘要: 在分析可控串联电容补偿器 TCSC(Thyristor-Controlled Series Capacitor)的运行模式、故障后的动作行为和动态基频阻抗特点的基础上,对比常规串联电容补偿器 FSC(Fixed Series Compensation),分析了 TCSC 对距离保护、方向元件及纵联保护的影响,认为:与 FSC 的线路相比,在 TCSC 线路上保护的性能不会降低,在 FSC 线路上运行的保护,可以在 TCSC 线路上很好地运行。

关键词: 可控串联电容补偿器; 常规串联电容补偿器; 距离保护; 方向元件; 纵联保护

中图分类号: TM 773

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)04-0036-04

可控串联电容补偿器 TCSC(Thyristor-Controlled Series Capacitor)是一个重要的 FACTS 元件,由于其潜在的性能效益,在各国 FACTS 实践中均为首选的实用化装置,应用越来越广泛。因此,有必要深入研究 TCSC 对现有继电保护的影响,考察现有继电保护在 TCSC 线路上的适应性。

本文从分析 TCSC 的运行模式、故障后动作行为和动态基频阻抗特点出发,对比常规串联电容补偿器 FSC(Fixed Series Compensation),针对 TCSC 对线路保护的影响,从距离保护、方向元件和纵联保护方面进行分析。

1 TCSC 基本结构和运行模式

TCSC 的基本结构如图 1 所示,主要由串联补偿电容器 C 、旁路电感器 L 、双向晶闸管 V_{Th} 以及氧化锌限压器(MOV)四部分组成。

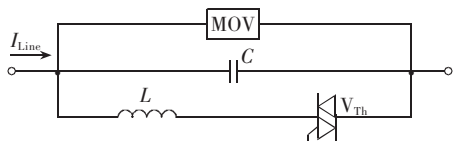


图 1 TCSC 的基本结构图

Fig.1 The configuration of TCSC

根据文献[1]可知,TCSC 通过对触发脉冲的控制改变晶闸管的触发角,继而改变由其控制的电感支路中电流的大小,连续改变总的等效电抗。通常触发角在 $145^\circ \sim 180^\circ$ 时,其等效电抗呈容性;在 $90^\circ \sim 140^\circ$ 时,其等效电抗呈感性,这段特性使其在系统故障时具有限制短路电流的作用。

TCSC 模块有全关断、旁路和微调三种基本运行模式。

a. 在全关断模式时,晶闸管门极没有触发信号,晶闸管开关一直不导通,触发角 $\alpha = 180^\circ$,整个模块阻抗等于电容器容抗。

b. 在旁路模式时,晶闸管门极连续触发,晶闸管开关全导通,触发角 $\alpha = 90^\circ$ 。由于晶闸管支路中电抗的存在,模块成小感抗性质。

c. 在微调模式时,晶闸管门极触发信号采用相控,晶闸管开关处于部分导通状态,触发角 $\alpha < 180^\circ$ 。整个模块性质取决于晶闸管导通程度。当晶闸管导通程度较低时,模块呈容性;当晶闸管导通程度较高时,模块呈感性。

2 TCSC 在故障时的动作行为

文献[2]指出,控制系统在从故障发生到故障切除、最后到系统稳定的整个过程中,控制策略一般是:故障前,TCSC 正常执行系统要求的控制命令,一般为潮流控制;从故障发生到故障切除期间,TCSC 的动作需依据短路电流的大小及 MOV 的保护水平和通流容量而定,通常的控制是当线路上的短路电流越限、MOV 过流或其上的累积能量过时,TCSC 控制器动作使晶闸管触发角 $\alpha = 90^\circ$,即 TCSC 由微调方式迅速转到旁路方式,以便将串联电容器短接,同时减轻 MOV 的负担。

需要指出的是,由于目前的 TCSC 一般按相配置,且存在单模块、多模块以及与固定串补公用等几种模式,其旁路的方式不尽相同。以 GE 公司的多模块 TCSC 为例,当线路过流时,其控制系统对称地将三相 TCSC 旁路,直到线路电流返回允许值同时延时一段时间,TCSC 才重新投入。当 MOV 过流时,控制系统仅仅将受影响相的 TCSC 旁路,直到电流恢复正常才重新工作。当 MOV 发现累积能量超标时,控制系统同样将受影响相的 TCSC 触发旁路,不同的是触发后要根据 MOV 的温度决定其是否复位。

从以上分析可知 TCSC 与 FSC 相比,其在故障过程中的动作行为更复杂,因此,有必要分析 TCSC 对线路保护的影响。

3 TCSC 动态基频阻抗的特点

与 FSC 的动态基频阻抗相比,故障条件下,如果 TCSC 的电容被旁路时,TCSC 很快变成感性,与 FSC 完全不同。但如果 TCSC 的电容不被旁路,在相同补偿度的条件下,根据文献[3],对同一条输电线路相同时刻和相同地点短路时进行的仿真研究表明,TCSC 与 FSC 的动态基频阻抗相比,具有以下几个特点:

- a. TCSC 比 FSC 的阻抗曲线变化缓慢;
- b. TCSC 的阻抗曲线到达稳态阻抗的时间比 FSC 长;
- c. TCSC 的稳态阻抗比 FSC 的稳态阻抗小。

但它们也有相似之处:TCSC 的电抗部分在旁路运行时的感抗与正常运行时的容抗之间变化;FSC 测量阻抗的电抗部分在正常运行时的容抗和被击穿后的阻抗之间变化。从这方面讲,两者的变化规律是一致的。

4 TCSC 与 FSC 对线路保护影响的比较

4.1 对距离保护影响

4.1.1 对方向阻抗距离元件影响

对于图 2 所示系统(图中□为继电保护装置,下图同),在固定串补的条件下,正向电容外近区短路时,如果不考虑过渡电阻,继电保护安装 1 和 2 处的电压反向必然会发生。

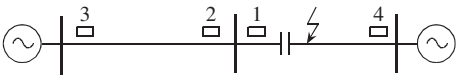


图 2 电容及继电器位置图
Fig.2 The location of relaying and series capacitor

但对于 TCSC,电压反向是否发生则与工况和故障后 TCSC 是否旁路等因素有关。当故障发生后 TCSC 被旁路时不会发生电压反向。如果 TCSC 不被旁路,则一般会发生电压反向。

对于 FSC,电压反向会使距离保护失去方向性,使距离保护在正向电容外短路时拒动,反向电容外短路时误动。这一问题采用带记忆的极化电压得到了解决。由以上分析可知,TCSC 的反向不总是发生,即使发生,也因为 TCSC 动态基频阻抗变化的特点,比 FSC 发生的时间长。如果采用带记忆的极化电压,配合适当的闭锁措施,这一特性对于防止拒动或误动极为有利。

4.1.2 对故障分量距离保护的影响

对于工频故障分量距离继电器,当整定值末端电压变化量 ΔU_{OP} 大于整定门坎电压 U_Z 时,继电器动作,否则不动作。根据文献[4],对于图 3 所示的系

统,当采用常规串补电容时,如果按 $K(Z_{zd}-jX_c)$ 整定保护范围,正向区外 F_3 短路,反向 F_2 短路及区内近端 F_4 短路时,继电器都能正确作出反应。但对于区内 F_1 短路,继电器能否正确动作,与短路电流、补偿度及 F_1 与保护装置的距离等因素有关。如果按 Z_{zd} 整定,反向区外 F_2 短路及区内 F_4 短路,继电器可正确作出反应。但正向区外 F_3 短路,则有可能产生超越动作。

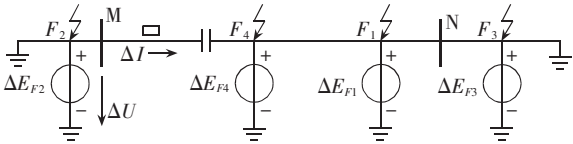


图 3 故障分量距离元件特性分析系统图
Fig.3 System diagram for distance element faulty component analysis

当输电线路采用 TCSC 补偿时,文献[5]指出,如果按 $K(Z_{zd}-jX_c)$ 整定保护范围,无论 TCSC 旁路与否,同 FSC 相似,正向区外 F_3 短路,反向 F_2 短路及区内近端 F_4 短路时,继电器都能正确作出反应。但对于区内 F_1 短路,继电器能否正确动作,与 TCSC 是否旁路、短路电流、补偿度及 F_1 与保护装置的距离等因素有关。当 TCSC 旁路时,保护范围大大缩小,这时区内远端短路,继电器将拒动;即使 TCSC 不旁路,由文献[3]的研究可知,不管 TCSC 的阻抗如何变化,其容抗模值始终小于故障前 TCSC 容抗模值。所以对距离保护 TCSC 一侧的故障,比故障前相同补偿度的 FSC 的保护范围要小。

如果按 Z_{zd} 整定,当故障后 TCSC 旁路时,保护可正确动作,保护范围不受影响;但当故障后 TCSC 不旁路时,区外短路时进入稳态后极可能误动作。

虽然,TCSC 的动态基频阻抗特性与 FSC 的动态基频阻抗特性存在一些差别,对距离保护的影响也稍有不同,但 TCSC 与 FSC 对距离保护的影响在主要方面是相似的,对保护的不利影响不如 FSC 大。所以,TCSC 不会给距离保护带来根本性的影响,在 FSC 线路上运行的距离保护在 TCSC 线路上仍然能很好地运行。

4.2 对方向元件影响

4.2.1 对负(零)序方向元件影响

当采用 FSC 时,概括而言,对于图 4 所示的负序网络,文献[4]认为,无论是保护正方向不对称短路,还是反方向不对称短路,也不论 FSC 在继电器与短路点之间,还是在短路点的反方向,只要 FSC 不存

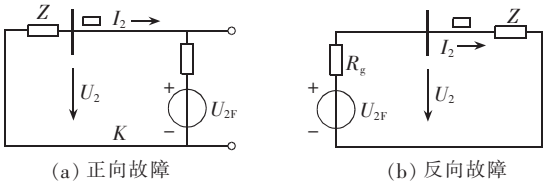


图 4 负序分量计算用网络图
Fig.4 Net diagram for negative sequence component calculation

在不对称击穿现象,且其容抗 X_C 小于系统感抗 Z_s , 负序功率方向继电器都能正确作出反应。在实际系统中,通常能够满足上述约束条件,所以负序功率方向都能正确作出反应,继电器不会有误动作。

当采用 TCSC 补偿且补偿度相同的条件下,根据 TCSC 的动态基频阻抗特性,这一条件更易满足,因此继电器更不会有误动作。

对于零序网络,当母线接有大容量变压器且中性点接地时,在 FSC 线路上,容抗 X_C 有可能大于系统感抗 Z_s ,零序功率方向元件可能拒动。但在 TCSC 线路上,如果故障后 TCSC 的电容器被旁路,TCSC 只会朝感性方向转化,故障初期短时的容性阻抗最多只会引起延时动作,不会发生拒动现象。如果 TCSC 不被旁路,零序网络上的拒动现象仍有可能发生,但由于其动态基频阻抗的原因,发生拒动的可能性比 FSC 线路上小。

但另一方面,根据文献[6],当采用 FSC 时,如果串补电容不对称短接,无论是负序网络还是零序网络,在短路条件下都有可能发生拒动或误动现象。在 TCSC 线路上三相 TCSC 控制可能不一致,同样会引起三相不对称,使短路条件下负序或零序功率方向保护误动作。

4.2.2 对故障分量方向继电器影响

故障分量方向继电器测量电压、电流故障分量,反相时动作。

根据文献[4],对于图 5 所示系统,反应故障分量 3 个正方向动作的方向元件 $\Delta F_{\varphi\varphi}$ + 测量的相角为

$$\varphi + = \arg \frac{\Delta U_{\varphi\varphi} - \Delta I_{\varphi\varphi} CZ_d}{+ \Delta I_{\varphi\varphi} Z_d}$$

式中 $\varphi\varphi = AB, BC, AC$; CZ_d 是补偿阻抗,为线路阻抗的 35%~45%; Z_d 为模拟阻抗。

反应故障分量 3 个反方向动作的方向元件 $\Delta F_{\varphi\varphi}$ - 测量的相角为

$$\varphi - = \arg \frac{\Delta U_{\varphi\varphi}}{- \Delta I_{\varphi\varphi} Z_d}$$

当输电线路采用 FSC 时,文献[4]认为,只有当 $|X_C| < \min(|Z_{s1}|, |Z'_{s1}|)$ 时,故障分量方向元件才不受串补电容的影响。 $|Z_{s1}|$ 和 $|Z'_{s1}|$ 分别为正向和反向短路时电源正序阻抗。当输电线路采用 TCSC 补偿时,如果故障后 TCSC 旁路,TCSC 将迅速变成感性,只是在故障初期的极短时间内呈现容性电抗,而且比正常运行时的容抗小得多。因此,对提高继电器

性能很有利。如果故障后 TCSC 不旁路,由文献[3]的研究可知,不管 TCSC 的阻抗如何变化,其容抗模值始终小于故障前 TCSC 容抗的模值。因此,在相同补偿度的情况下,TCSC 线路比 FSC 线路更容易满足 $|X_C| < \min(|Z_{s1}|, |Z'_{s1}|)$ 这个条件,TCSC 线路上继电器性能更加可靠。而且从 TCSC 阻抗变化特性还知道,TCSC 暂态时的容性阻抗比稳态时的更小。因此,利用 TCSC 的暂态阻抗特性,将更有利于提高方向继电器性能。

5 对纵联保护影响

纵联保护主要有纵联距离保护、纵联方向保护及纵联相差保护。

方向阻抗元件是纵联距离保护的核心元件之一。在串补线路(含 TCSC 与 FSC)上,纵联距离保护的性能取决于方向阻抗元件的性能。同样,纵联方向保护的性能取决于方向元件的性能,所以,TCSC 与 FSC 对方向阻抗元件和方向元件影响的区别就构成了对相应高频保护的区别。

纵联相差保护一般受串补电容(含 TCSC 与 FSC)的影响较小。在被保护线路外部发生短路时,其动作特性与是否有串补电容、串补电容是否被全部或部分短接无关,相位测量元件不会误动作。当被保护线路内部短路而且有串补电容一例的综合阻抗成容性时,则相差纵联保护会拒动。但由于一般情况下,补偿电容阻抗的模值小于保护反方向等效系统阻抗,在 TCSC 线路中内部故障一般会旁路,这种情况在 TCSC 线路的运行中更是不容易发生。

6 结论

综合以上分析,可以得出结论:虽然 TCSC 的动态基频阻抗特性与 FSC 的动态基频阻抗特性存在一些差别,对各种线路保护的影响也稍有不同,但 TCSC 与 FSC 对线路保护的影响在主要方面是相似的,这一点在文献[7]中也有论述。总之,TCSC 不但不会给保护带来根本性的影响,而且与 FSC 对线路保护带来的影响相比较,TCSC 在一定程度上有了改善。即在 FSC 线路上运行的保护在 TCSC 线路上仍然能很好地运行。

参考文献:

- [1] 田杰,尹建华.可控串联补偿(TCSC)的分析研究[J].电力系统自动化,1997,21(10):43-47.
TIAN Jie, YIN Jian-hua. Investigation of the thyristor controlled series compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(10): 43-47.
- [2] 胡玉峰,尹项根,陈德树,等. TCSC 的继电保护数字仿真研究[J]. 电力系统自动化,2002,26(16):39-44.
HU Yu-feng, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, et al. Digital simulation of protective relaying based on TCSC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(16): 39-44.

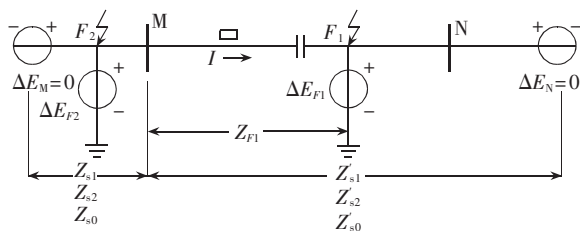


图 5 故障分量方向元件特性分析系统图

Fig.5 System diagram for direction element faulty component analysis

[3] 余江,段献忠,王为国,等. TCSC 动态基频阻抗特性分析[J]. 电力系统自动化,1999,23(14):21-23.
YU Jiang, DUAN Xian-zhong, WANG Wei-guo, *et al.* Analysis of TCSC dynamic power frequency impedance [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1999, 23 (14):21-23.

[4] 王为国,尹项根,余江,等. 固定串补电容对工频故障分量继电保护的影响[J]. 电力系统自动化,1998,22(12):31-33.
WANG Wei-guo, YIN Xiang-gen, YU Jiang, *et al.* The effect of fixed series capacitor on fault component protective relaying [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1998, 22(12):31-33.

[5] 王为国,尹项根,余江,等. TCSC 动态基频阻抗对故障分量保护的影响[J]. 电力系统自动化,1999,23(20):9-11.
WANG Wei-guo, YIN Xiang-gen, YU Jiang, *et al.* The influence of TCSC dynamic fundamental frequency impedance on component protection relay [J]. **Automation of**

Electric Power Systems, 1999, 23(20):9-11.

[6] 许正亚. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社, 1997.

[7] DASH P K, PRADHAN A K, LIEW A C, *et al.* Digital protection of power transmission lines in the presence of series connected FACTS devices[A]. **Power Engineering Society Winter Meeting [C]**. [s.l.]:IEEE, 2000. 1967-1972.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

孔永科(1977-),男,河北沙河人,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:kongyk@sina.com);
王增平(1964-),男,河北辛集人,科技处处长,教授,研究方向为变电站综合自动化;
刘青(1974-),女,河北无极人,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

Comparative analysis of influences of TCSC and FSC
on protective relaying for transmission line

KONG Yong-ke, WANG Zeng-ping, LIU Qing, WU Feng, PENG Qian
(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstracts: Based on the analysis of running mode, action after fault, dynamic power frequency impedance of TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor) and compared with FSC (Fixed Series Compensation), the influence of TCSC on distance protection, direction component and pilot protection are analyzed. Protective relaying for lines with FCS may run well on lines with TCSC, and its protective performance will not become worse.

Key words: TCSC; FSC; distance protection; direction component; pilot protection