

复合开关投切时电容上的能量分析

海 涛, 辛 鹏, 骆武宁, 陈丽敏, 湛亮书, 齐红伟

(广西大学, 广西南宁 530004)

摘 要: 基于复合开关投切电容器的无功补偿装置采用过零投切的复合开关模块投切电容器, 晶闸管在电压过零时导通, 电流过零时关断, 避免了合闸涌流的冲击。本文对晶闸管投切时电容器上的能量分布进行了详细的分析, 找出晶闸管最佳开通和关断时间, 确保晶闸管导通时无合闸冲击电流。

关键词: 复合开关; 晶闸管; 残压

中图分类号: TM761.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-7598(2007)11-0027-04

0 引言

早期的无功补偿器在投入电力电容时, 往往产生极大的浪涌电流, 会在接触器触点上产生很大的飞弧, 致使接触器的寿命缩短, 同时造成电网污染^[1]。采用双向晶闸管和继电器的并联结构可避免上述情况的发生。若需投入补偿装置, 在适当的时刻触发晶闸管, 由于晶闸管的导通时刻可以精确的控制, 故避免了合闸涌流的冲击, 可替代传统电力器件完成快速、无冲击的投切电容。但是由于电容是储能元件, 且两端电压不能突变, 电网电压和电容器电压的差值较大时, 晶闸管要承受很高的电压, 触发晶闸管会产生很大的电流冲击, 所以在晶闸管投切时分析电容器上的能量是很有必要的。

1 基本公式推导^[2]

设三相线电流分别为 i_A 、 i_B 、 i_C , 相电流为 i_{AB} 、 i_{BC} 、 i_{CA} , 则由克希霍夫电流定律可知:

$$\begin{cases} i_A = i_{AB} - i_{CA} & (1) \\ i_B = i_{BC} - i_{AB} & (2) \\ i_C = i_{CA} - i_{BC} & (3) \end{cases}$$

式(1)、(2)、(3)相加得:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (4)$$

如果在电容器两端加一正弦电压 $u = U_m \sin \omega t$, 则

$$i = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (5)$$

式中: C 为电容; U_m 为线电压最大值; i 也是一个同频率的正弦量。

由式(5)可知, 在相位上电流比电压超前 90° 。所以当电容上的电流 $i=0$ 时, 电压 U 为最大值。

2 晶闸管投切

复合开关投入时刻的选取原则应是投入过程没有冲击电流。软开关最大的特点就是零电压开通, 零电流关断。晶闸管的控制是软开关控制的重要环节。由于电容器两端电压不能突变, 很可能破坏晶闸管或给电源带来高频振荡等不利影响^[3]。晶闸管投入时需要考虑电容器上的电压和触发时的电网电压, 这一冲击主要体现在开关投入时的电流突变率和冲击电流最大值上, 有

$$L \frac{di}{dt} = U_{V(t)} - U_{C(t)} \quad (6)$$

式中: L 为电源内电感; $U_{V(t)}$ 为晶闸管触发时的电网电压; $U_{C(t)}$ 为晶闸管触发时的电容电压。

晶闸管开通的时刻必须是电网电压与进行投切的电容器两端的电压相等的时刻, $U_{C(t)}$ 为零时, 选择晶闸管在电网电压过零时刻触发, 可使 $di/dt=0$, 也就是解决了投切对晶闸管和接触器可能造成的电流冲击。

晶闸管投切电容器时, 晶闸管自然过零关断, 即

在 $i=0$ 时关断。由于电容上的电流 $i=C\frac{du}{dt}=0$,则 $\frac{du}{dt}=0$,所以这时电容上的残压为最大值。当有一相关断时,其它两相构成一个回路,所以三相电容不可能同极性。总共有6种可能,如表1所示。

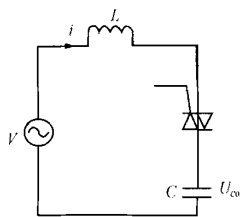
表1 三相电容的极性

相别	极性					
A相	+	+	-	-	-	+
B相	+	-	+	+	-	-
C相	-	+	+	-	+	-

在进行无功补偿的电容器运行期间,根据负载感性无功功率的变化切除或投入电容器组。当该组电容器的电流自然过零时,若没有触发脉冲作用于晶闸管,晶闸管就保持在关断状态,该组电容器向电力系统送出的无功功率突然中断,由式(5)可知, $i=0$ 时电容器上残压为最大值。电容器上的残留电荷使其端电压保持在切除前的电源电压幅值(+ U_m ,- U_m),加在晶闸管两端的电压便在零至两倍峰值电压之间变化,晶闸管重新触发而又不至引起过渡过程的惟一时刻是当两端电压为零的瞬间,这正好与峰值电压相吻合。

3 单相晶闸管投切分析

晶闸管投切电容(继电器未作用)时的近似模型如图1所示。



i —流过晶闸管的电流; V —加在晶闸管上的电压;

C —电力电容; U_{c0} —电容器上的初始电压

图1 晶闸管投切电容近似模型

图中 L 是系统等效电抗之和,模型忽略了电阻。

对图1,用拉普拉斯变换表示的电压方程式是:

$$U(S)=\left(L(S)+\frac{1}{C(S)}\right)I(S)+U_{c0}/S \quad (7)$$

设电源电压 $u=U_m\sin(\omega_0 t+\alpha)$,电容器上初始电压为 U_{c0} ,系统等效电抗 L 初始电流为零,经过简单的变换和逆变换后得到的瞬时电流 $i(t)$ 的表达式为:

$$i(t)=I_m\cos(\omega_0 t+\alpha)-I_m\cos\alpha\cos(\omega_0 t)-\omega_n C\left[U_{c0}-\frac{\omega_n^2}{\omega_n^2-\omega_0^2}U_m\sin\alpha\right]\sin\omega_n t \quad (8)$$

式中: ω_0 为系统工频角频率; ω_n 为电路的自然角频率($\omega_n=\frac{1}{\sqrt{LC}}$)。

电流有一基频分量 i_{acm} ,它领先于电源电压 $\pi/2$ 弧度,其幅值为:

$$I_{acm}=\frac{U_m\omega_0 C}{1-\omega_n^2 LC} \quad (9)$$

它与串联电容和电感的基频电纳 $B_c n^2/(n^2-1)$ 成正比, B_c 为电纳,系数 $n^2/(n^2-1)$ 是涉及L-C电路的局部串联谐振的放大系数。如果有相当大的电抗,则 n 可能比较小,其值为2.5甚至更小些,而放大系数则可能达到1.2或更大。

以上两式忽略了回路电阻的影响,在实际电路中,衰减式中的后两项振荡分量通过回路中的电阻衰减,所以以上两式只是用来分析投切点附近的瞬时电容电流值。

式(8)右侧的最后两项代表预期的电流振荡分量,要使系统真正实现无涌流投切,必须使后两项为零,即同时满足以下两个条件:

$$(1) \cos\alpha=0(\text{即}\sin\alpha=\pm 1) \quad (10)$$

$$(2) U_{c0}=\frac{\omega_n^2}{\omega_n^2-\omega_0^2}U_m \quad (11)$$

这两个条件意味着电容器组必须要预先充电到 $\frac{\omega_n^2}{\omega_n^2-\omega_0^2}U_m$,当 $1\gg\omega_0 LC$ 时可以认为电容器预充电至电源峰值电压;晶闸管必须在正弦电压到达峰值时导通,且导通时电源电压与电容电压极性相同。同时满足无过渡过程投入的两个条件,在实际中是很困难的。由于系统电压波动变化,以及电容上的残压泻放等因素,在实际中很难保证无过渡投入条件中的电容预充电条件。但是满足投入电容器瞬间“晶闸管两端压差为零”这个条件总是可以做到的^[4]。

同时,由于 $\omega_n\gg\omega_0$,所以式(8)简化为:

$$i(t)=I_m\cos(\omega_0 t+\alpha)-I_m\cos\alpha\cos(\omega_0 t)-\omega_n C(U_{c0}-U_m\sin\alpha)\sin\omega_n t \quad (12)$$

晶闸管重新触发不至于引起大涌流的时刻是 $U_{c0}=U_m\sin\alpha$ 的瞬间,此时投入电容器瞬间晶闸管两端压差为零,所以应在电网电压与电容器上预充电电压极性相同且大小相等的时刻投入电容器组。

4 晶闸管耐压值分析

由于电容是储能元件,晶闸管在 $i=0$ 时关断,电容上的残压值最大为峰值 $U'_1=537\text{ V}$ 。

当三相开关阀作为整体三相开关做“投入”动作

时,因为要保证各相阀都是端电压过零投入,所以三相不可能同时投入,整个三相投入过程是一个短暂的三相不平衡过程。但这个三相不平衡过程远不足以启动系统中的零序保护,同时对系统的扰动也是可以忽略的。同时还要保证三相投入不产生冲击电流,所以无任何限制条件的顺次投入A、B、C三相仍然可能会产生冲击电流。

三相投入过程中,由于某种原因可能发生其中某相因不能检测到过零点,而不能投上的故障。为避免出现长时间的三相不平衡负荷情况,应立即中断整个三相投入过程,经短暂延时后切除三相中已投入相。

如图2所示,假设A相晶闸管先开通,而B相电容器的残压最高,则这时B、C两相开关承受电压为:

$$U_{BJ}=U_{Cj}=380\text{ V}$$

式中:J为A、B、C间的节点。

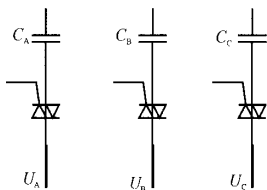


图2 三相电容投切简单模型

由于电网电压为正弦电压, U_L 为线电压,则其峰值为:

$$U_i = \sqrt{2} U_L = \sqrt{2} \times 380 = 537\text{ V}.$$

所以B相晶闸管可能承受的最大电压为:

$$U_m = U_i + (-U_i) = 2U_i = 1\ 074\text{ V}$$

该值超过了晶闸管的耐压值。所以,在电网欠补的情况下,应该先投入残压最高的电容器以防止晶闸管被击穿。若残压最高相能投上,则其他两相接着投;反之,则中断三相投入过程。

电容器投切时的波形如图3~6所示。图3为正常投入电容成功时的波形图,图4为正常切除电容成功时的波形图,图5、图6为投切失败时的波形图。

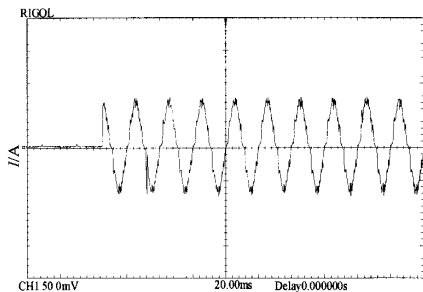


图3 投入电容时波形图

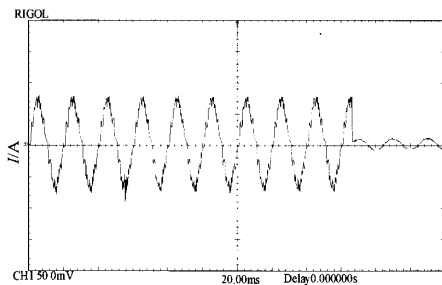


图4 切除电容时波形图

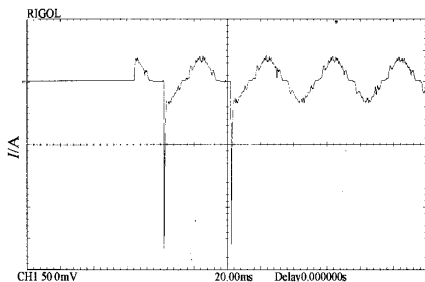


图5 开通电容器残压最小的一相时的冲击 (两次开通间隔时间为0)

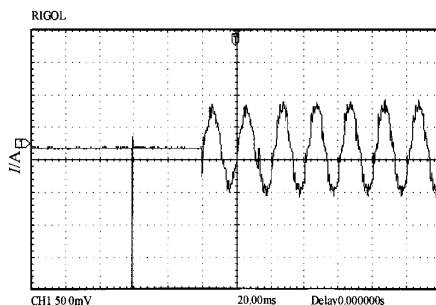


图6 开通电容器残压居中的一相时的冲击 (两次开通间隔时间为0)

5 结论

复合开关可用于分组投切装置中,它具有合闸速度快、无合闸涌流、电应力小的优点,其投入时刻的选取原则应是投入过程没有冲击电流。晶闸管开通的时刻电网电压与进行投切的电容器两端的电压相等,即晶闸管两端压差为零,且电容残压高所对应的晶闸管先投,电容残压低对应的晶闸管后投。这样才能避免合闸涌流,且晶闸管使用寿命也变长,可满足无功动态补偿的要求。

参考文献

- [1] 王云玲,曾杰,张步涵,等.基于超级电容器储能系统的

动态电压调节器[J].电网技术,2007,31(8):58-62.

- [2] 江 和,吴功祥,张培铭.新型无涌流投切的无功补偿器设计[J].低压电器,2007(9):13-14,24.
- [3] 王玉鹏,李贞晓.变电站无功补偿装置分组自动投切的应用分析[J].电气应用,2007,26(4):0011-0013.
- [4] 张 伟,隋青美,常天英,等.基于71 M6515H和双CPU的智能动态分相无功补偿控制器 [J]. 继电器,2007,35

(10):56-58,63.

- [5] 李 平.基于低压中频炉谐波治理和无功补偿[J].低压电器,2007(9):51-52.
- [6] 杨 惠.无功补偿技术对低压电网功率因数的影响[J].继电器,2007,35(3):34-36,60.

(责任编辑 张 健)

Energy Analysis on Capacitor When Switching Compound Switchgear

HAI Tao, XIN Peng, LUO Wu-ning, CHEN Li-min, CHEN Liang-shu, QI Hong-wei
(Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The device of reactive power compensation based on the compound switchgear of switching capacitor adopts the module-switched capacitor with cross zero switching. The thyristor turned on when the voltage crossing zero, turned off when the current crossing zero, avoiding the shock of close inrush current. This article analyzes in detail the energy distribution of capacitor when the thyristor switching, finds out the best time for thyristor turning on and off, ensures that there is no close inrush current when thyristor turning on.

Key words: compound switchgear; thyristor; residual voltage

