

改进式晶闸管串联调压电容 无功补偿装置的断态过电压仿真

王世蓉, 李民族, 唐晓玲

(贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 改进式晶闸管串联调压电容无功补偿装置的晶闸管开关带电断开时, 要承受危险的断态过电压, 为保证装置的安全运行, 阐述了晶闸管断开时过电压产生的原理及状态。对装置投入、换级以及故障等各种工况下断态过电压的大小进行了理论分析, 用电磁暂态分析 PSCAD/EMTDC 软件对典型工况的断态过电压进行了仿真分析。采用氧化锌压敏电阻过压保护后, 重新对严重故障时的断态过电压进行了仿真。结果表明, 装置投入、换级等正常操作时, 晶闸管开关断态过电压不高; 但在装置故障时, 会出现严重过电压, 若过压保护动作后, 断路器在 0.1 s 内跳闸, 压敏电阻通流容量不很大。

关键词: 串联调压; 无功补偿装置; 晶闸管开关; 断态过电压; 压敏电阻; EMTDC

中图分类号: TM 761⁺.12

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0034-05

0 引言

文献[1]提出的改进式晶闸管串联调压电容无功补偿装置(简称改进 CKY)与技术性能相当的其他静止无功补偿装置 SVC(Static Var Compensator)^[2-4]装置和静止无功发生器 SVG(Static Var Generation)^[5-6]装置相比, 晶闸管工作电压低。但是, 晶闸管开关在投入和换级操作时, 要带电断开一段时间; 装置短路故障撤掉脉冲、触发控制故障消失脉冲, 也使晶闸管开关处于带电断开状态。当断路器未跳, 晶闸管开关处于带电状态断开时, 均要承受过电压。

本文重点分析了装置断态过电压产生的各种工况, 并采用 EMTDC 仿真分析断态电压的变化特性, 以此为依据, 合理选择了压敏电阻的参数, 重新仿真分析加压敏电阻后过电压大小。仿真结果表明, 在正常投入、换级时, 晶闸管开关断态电压均不高, 故障时, 特别是触发脉冲消失后, 断态过电压十分严重, 但采用压敏电阻保护后, 可使断态电压降低到允许范围内, 且所需压敏电阻的容量和一般氧化锌避雷器^[7]容量相当。

1 改进 CKY 装置断态过电压分析

1.1 晶闸管开关断态电压

图 1 为装置单相接线图, 图中, $u(t)$ 为电源电压, C 为并联电容, L 为限流电感, QF 是机械开关断路器, w_1 为变压器一次绕组(W_1)匝数, w_{21} 、 w_{22} 、 w_{23} 为 3 个二次绕组(W_{21} 、 W_{22} 、 W_{23})各自匝数, W_{21} 为固定绕组, W_{22} 、 W_{23} 为调节绕组, 通过 1~8 号正、反向并联

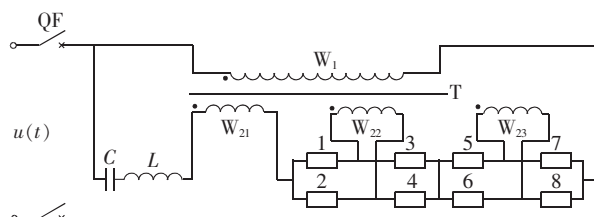


图 1 装置单相接线图

Fig.1 Single-phase connection diagram of device

联结的晶闸管开关构成 2 个桥式接线, 分别将 2 个调节绕组接入主回路中, 并通过桥接晶闸管开关的通、断组合实现调节绕组的正接、反接或不接, 以改变变压器 T 二次绕组的等效匝数, 从而改变变比 K 。装置正常运行时, 每个桥的 4 个晶闸管开关, 必有 2 个晶闸管开关接通, 另外 2 个晶闸管开关断开, 断开的晶闸管开关要承受所连调节线圈的端电压, 这个电压在各级工作状态不变, 也为晶闸管开关正常工作电压, 晶闸管的电压定额据此确定。

当所有的晶闸管开关都处于断开状态, 例如换级调节操作, 前级晶闸管开关断开, 下一级晶闸管开关未接入前, 这时辅助变压器二次回路断开, 1~8 号晶闸管开关要承受一定的电压, 不仅要承受所连调节线圈的端电压, 此时电源电压及电容电压也将全部施加于断态晶闸管开关, 更严重的是晶闸管断开时, 电容电压正好充电到最大值。当晶闸管都处于断开状态时, 2 个桥之间的电压称为晶闸管开关串的断态电压, 而每个晶闸管开关所承受的电压称为晶闸管开关的断态电压。

将所有调节绕组等效为一个桥, 且所有晶闸管开关处于断态时的等效图用图 2 表示, 图中固定绕组和等效调节绕组的变比均为 $0.5 K_{\max}:1$, 其中 $K_{\max}$ 指 T 的最大变比。不难看出各晶闸管开关串所承受的断态电压不同。1、4 号晶闸管开关串接通时, 调节

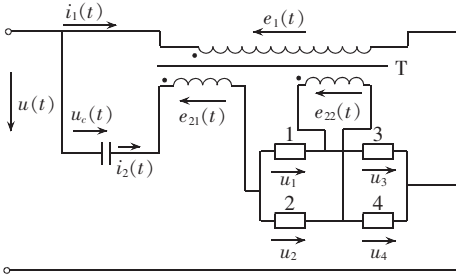


图 2 求晶闸管开关串断态电压的等效图

Fig.2 Equivalent diagram for evaluating off-state voltage of thyristor switch series

绕组正接,故称之为正接晶闸管开关串,相似地称 2、3 号为反接晶闸管开关串。对于正接晶闸管开关串,根据线性电路的叠加原理,其承受的断态电压为

$$u_z = u_1 + u_4 = u(t) - U_{C(0)} - e_{21}(t) - e_{22}(t) = u(t) - U_{C(0)} - 0.5 K_{\max} u(t) - 0.5 K_{\max} u(t) = (1 - K_{\max}) u(t) - U_{C(0)} \quad (1)$$

同样,根据线性电路的叠加原理,对于反接晶闸管开关串,其断态电压为

$$u_f = u_2 + u_3 = u(t) - U_{C(0)} - e_{21}(t) + e_{22}(t) = u(t) - U_{C(0)} - 0.5 K_{\max} u(t) + 0.5 K_{\max} u(t) = u(t) - U_{C(0)} \quad (2)$$

显然, $u_f(t) > u_z(t)$, 即反接晶闸管开关串承受的断态电压最高,以下只分析反接晶闸管开关串断态过电压。

1.2 晶闸管开关串断态过电压产生分析

晶闸管开关串断态过电压现象在以下的情况产生,大小不同,虽然作用时间极短,若过高,足以使晶闸管损坏,必须认真分析,加以抑制。

1.2.1 装置投入时

改进 CKY 装置投入、切除是采用机械断路器,但真正的投入或者切除时刻是晶闸管开关接通或者断开时刻。机械断路器合闸时,如果待通晶闸管开关立即触发导通,晶闸管开关基本不出现断态过电压;如果断路器在电源电压刚过零时合闸,再经过 $5\pi/6$,晶闸管开关才电压过零接入,这种接入条件会导致所有的晶闸管开关断开时间接近半个周期。此时,由于电容并未充电 $U_{C(0)} = 0$,反接晶闸管开关串断态过电压 $u_f = u(t)$,断态过电压较严重。

1.2.2 装置换级操作时

换级时要本着先断后通的原则,否则,会出现调节绕组被短接现象。换级时,先撤掉前级导通晶闸管开关的控制脉冲,前级导通晶闸管开关在电流过零时自然断开,在极短时间内 ($< \pi/2$) 接入后级待通晶闸管,以确保所有的晶闸管开关断开时间不长,同时使换级冲击电流较小^[1]。由于前一级晶闸管开关在电流过零时断开,电容电压 $U_{C(0)} = \pm U'_{cm}$ (U'_{cm} 指前级电容电压幅值),则反接晶闸管开关串断态过电压 $u_f = u(t) - (\pm U'_{cm})$ 。据文献[1]分析,在前级晶闸管开关断开后的 $1/4$ 周期内, U'_{cm} 的极性和 $u(t)$ 极性相同,故 $u_f < u(t)$,其最大值按下式确定。

$$U_{mf} = U_m - U'_{cm} \quad (3)$$

式中 U_m 为电网电压幅值,出现在前级晶闸管开关电流过零断开瞬间。

由式(3)看出无论后级是立即接入还是电压过零接入,换级操作断态过电压无危险。

1.2.3 电容器击穿短路后

电容器被击穿后,二次电流急剧上升,在 1 个周期内保护动作并闭锁所有导通的晶闸管,此时反接晶闸管开关串断态电压 $u_f = u(t)$,其幅值按下式确定。

$$U_{mf} = U_m \quad (4)$$

此断态过电压将持续到断路器跳开,时间约 0.1 s。

1.2.4 晶闸管开关失掉脉冲

晶闸管开关在正常运行的过程中突然失掉触发脉冲后,在电流过零时自然断开,电容电压 $U_{C(0)} = \pm U'_{cm}$,为最大值,反接晶闸管开关串断态电压 $u_f = u(t) - (\pm U'_{cm})$,持续时间较长。此种情况断态过电压最严重,其幅值按下式确定。

$$U_{mf} = U_m + U'_{cm} \quad (5)$$

此断态过电压将持续到断路器跳开,时间约 0.1 s。

必须指出,上述断态过电压实指稳态值。

2 仿真模型简介

为了对晶闸管串联调压电容无功补偿装置的断态过电压进行精确的分析,采用电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC 对装置进行仿真^[9]。装置单相仿真模型如图 3 所示。

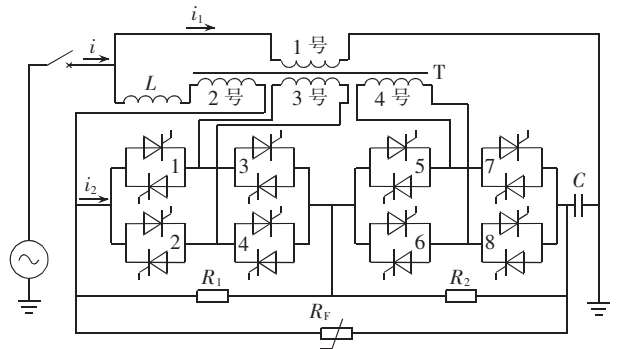


图 3 装置单相仿真模型

Fig.3 Single-phase simulation model of device

图 3 所示为正在研制的 10 kV 级小容量工业样机的单相结线,图中,1~8 是晶闸管开关,T 为辅助变压器, R_F 为氧化锌压敏电阻, R_1 、 R_2 是两桥晶闸管开关的分压电阻,且 $R_1:R_2 = 25000:8000 \approx K_2:K_3$, K_2 、 K_3 分别为 3 号、4 号调节绕组同一次绕组的匝数比,且每个晶闸管开关均有静态均压电阻和动态均压电阻。该样机为三角形接线,三相完全独立。

装置电源电压为 $U_N = 10$ kV; 电容器参数 $U_{CN} = 10$ kV, $I_{CN} = 20$ A, $Q_{CN} = 200$ kvar, $X_C = 500 \Omega$, $C = 6.37 \mu\text{F}$; 变压器参数 $S_{TN} = 66.7$ kvar, $U_{TN} = 10$ kV, $U_s\% = 7\% \sim 10\%$, $I_0\% = 3\%$, $P_s = 3.6$ kW, $P_0 = 0.58$ kW, $K_1 = 0.314$, $K_2 = 0.2038$, $K_3 = 0.0648$ (K_1 为 2 号绕组同一次绕组匝数比); 限流电抗 $X_L = 0.03 X_C$, $L = 0.0478$ H。

3 未接压敏电阻时断态电压仿真结果及分析

3.1 投入时

设电源电压刚过零($t=0$ s)时合上断路器,大约经过 $5\pi/6$ 后,晶闸管开关才电压过零接入。装置投入后运行在第1级状态,此时正接晶闸管开关(1、4、5、8)导通,反接晶闸管开关(2、3、6、7)断开。仿真波形如图4所示,图中 t_1 为晶闸管开关接入时刻, u_{f2} 为2号晶闸管开关的断态电压, u_f 为反接晶闸管开关串的断态电压, $u_f=u_{f2}+u_{f3}+u_{f6}+u_{f7}$ 。从图4看出,断态过电压均出现在晶闸管开关接入前的半个周期内, u_{f2} 最大幅值为4.10 kV, u_f 最大幅值为13.05 kV,均超过晶闸管开关接入后断态电压(正常工作电压)幅值的1.47倍和1.78倍。而它们的正常工作断态电压可由图中 t_1 时刻后的波形看出,其稳态幅值分别为2.78 kV和7.33 kV。

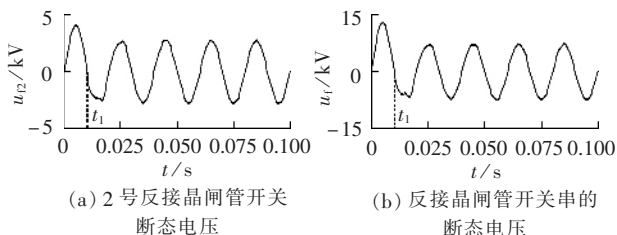


图4 装置投入时的波形

Fig.4 Waveforms during device put-in

3.2 换级时

由分析得出,换级时的断态过电压是出现在升级调节且前级为第1级时,因此种情况 U'_{cm} 最小,断态过电压最高,且有一段持续时间($<\pi/2$)。以1级直接升至7级为例,在 $t=0.1$ s时撤掉第1级导通晶闸管的触发脉冲,该级晶闸管开关电流过零断开后,向第7级的待通晶闸管发出控制脉冲,则待通晶闸管开关在两端电压过零时自动接入^[1]。断态电压仿真波形如图5所示。图中, t_0 为前级断开时刻, t_1 为后级接入时刻。由仿真波形可看出,无论 u_{f2} 还是 u_f ,其断态电压均出现在 $t_0\sim t_1$ 极小的断开期间,其幅值分别是2.78 kV和7.33 kV,均未超过正常工作电压幅值,无过电压危险。必须说明,当 t_1 时刻后级(7级)接入后, $u_{f2}=0$, $u_f=0$ 。这是因为7级时所有反接晶闸管开关都处于导通状态。

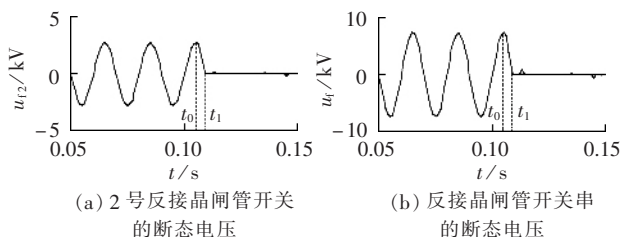


图5 换级操作时的波形

Fig.5 Waveforms during tap change

3.3 电容器击穿短路后

假设电容器在 $t=0.3$ s时刻被击穿,击穿前装置工作在第7级,正接晶闸管开关断开,反接晶闸管开关导通,保护动作,在1个周期后($t=0.32$ s)闭锁导通的反接晶闸管开关。断态电压的仿真波形如图6所示,由仿真波形看出,2号晶闸管开关及反接晶闸管开关串的断态过电压均出现在 $t_1=0.337$ s时刻,即晶闸管开关闭锁一小段时间后,这是因为电容器击穿后,二次回路的电流含有一小部分直流分量,引起电流过零点发生偏移,而晶闸管开关的真正断开时间又是电流过零时刻。从波形还可看出,断态过电压要持续至断路器跳开,时间较长。图中, u_{f2} 和 u_f 的暂态最大峰值分别为4.35 kV和16.03 kV,是正常运行时最大工作电压幅值的1.56倍和2.19倍。

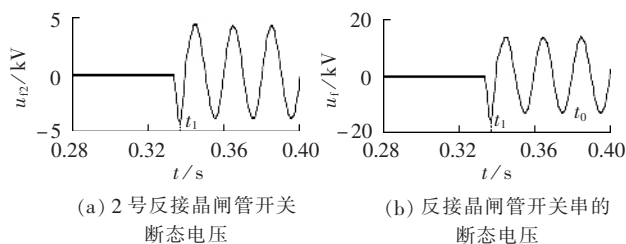


图6 电容器击穿短路时的波形

Fig.6 Waveforms during capacitor breakage

3.4 晶闸管开关失掉脉冲

设装置运行在第7级,此时, $U'_{cm}=U_m$ 最大,根据式(5),断态过电压幅值最高。在 $t=0.32$ s时一个导通的晶闸管开关突然失掉触发脉冲,该导通晶闸管开关在电流过零时会自然断开,导致装置二次回路断开。此时2号反接晶闸管开关及反接晶闸管开关串的断态电压和电容电压的仿真波形见图7。

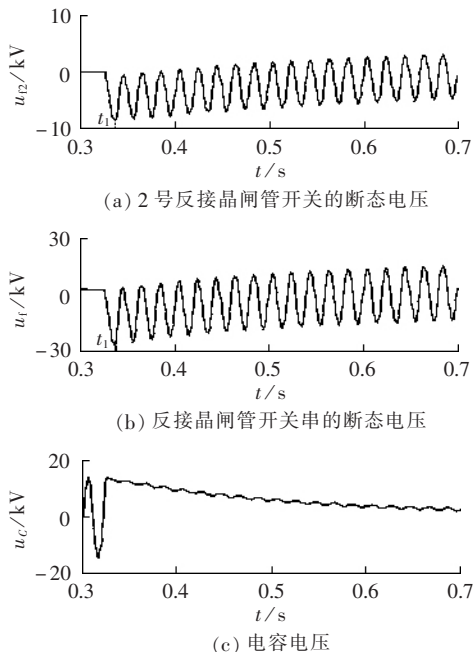


图7 晶闸管开关失掉脉冲时的波形

Fig.7 Waveforms during thyristor switch pulse loss

从图 7 波形可以看出,无论是 u_{f2} 还是 u_f ,其断态过电压均出现在 $t_1=0.335\text{ s}$ 时刻,且波形向下严重偏移,出现了一个很大的直流分量,但是随着时间的推移,直流分量逐渐减小,最后衰减为零,波形的偏移程度也随之减弱,直至完全恢复正常。这是因为晶闸管开关断开瞬间,电容器中电流经过零点,电容电压充电到最大值,二次回路断开后,此电压最大值仍留在电容器上,使得断态电压中含有很高的直流分量,引起晶闸管开关串断态电压波形发生严重偏移,随后电容电压沿着晶闸管均压电阻回路开始放电,电容电压不断减小,一直到衰减为零。从曲线还可看出,断态过电压的持续时间较长,且最大偏移时, u_{f2} 和 u_f 的最大峰值分别高达 8.57 kV 和 26.25 kV ,大大超过了正常工作的最大电压。此种情况下过电压较为严重,必须采取有效的保护措施,以抑制晶闸管开关的过电压,保护晶闸管元件不受损坏。

必须指出,上述仿真分析所得最大断态过电压幅值均超过式(3)~(5)所确定的断态过电压幅值,这是因为仿真分析幅值含有暂态分量。

4 装设氧化锌压敏电阻后的断态过电压

4.1 氧化锌压敏电阻参数选择

由前面的仿真分析得出,在电容器击穿短路与晶闸管开关失掉脉冲这 2 种情况下断态过电压现象较为严重,其幅值已经超过晶闸管开关额定电压,且持续时间较长,必须采取有效的保护措施,以抑制故障情况下的断态过电压。本文采用给晶闸管开关串配备氧化锌压敏电阻过压保护来保证晶闸管开关安全和稳定地工作。如图 3 所示,将压敏电阻直接并接在 2 个桥接晶闸管串之间,每个桥的电压由 R_1 、 R_2 分配,保证晶闸管两端的电压维持在一定的范围内,当电压超过保护水平,压敏电阻动作将晶闸管两端的电压限制在保护水平以内;当电压低于保护水平,压敏电阻相当于无穷大电阻,近似认为是开路。其保护水平取决于晶闸管开关串允许的最大工作电压;其容量取决于系统故障电流及容许的持续时间。

压敏电阻的主要参数^[9]为 U_{1mA} (漏电流为 1 mA 时额定电压值), U_{1mA} 选取按下式计算。

$$U_{1mA} \geq 1.3\sqrt{2} U$$

其中, U 为压敏电阻两端最大正常工作电压的有效值, $U=1.1 U_g$, U_g 为晶闸管开关正常工作电压。根据装置正常运行时,断开的晶闸管开关要承受所连调节线圈的端电压,此电压即为晶闸管开关正常工作电压。对于 10 kV 系统,根据调节绕组的变比,可以确定 $U_g=2.686\text{ kV}$,于是取 $U_{1mA}=5.432\text{ kV}$ 。

压敏电阻通流容量的选定应使其所吸收的过电压能量小于其通流容量,主要按故障情况确定。

4.2 接入氧化锌压敏电阻后断态电压的仿真

前面已经分析了装置在故障情况下,且未接入氧化锌压敏电阻时的断态电压,现在将氧化锌压敏

电阻接入,对故障情况下的断态电压进行仿真。

4.2.1 电容器击穿

电容器在 7 级($t=0.3\text{ s}$)发生击穿短路,晶闸管开关在 1 个周期后($t=0.32\text{ s}$)闭锁,5 个周期后($t=0.42\text{ s}$)断路器跳开,此时的晶闸管断态电压、压敏电阻电流以及吸收能量曲线如图 8 所示。图中, I_y 为压敏电阻电流, E 为压敏电阻消耗的能量,从仿真波形可以得到 u_{f2} 和 u_f 的暂态最大峰值分别为 4.15 kV 和 12.77 kV ,分别小于 2 号反接晶闸管开关和反接晶闸管开关串电压定额(5.8 kV 和 15.2 kV)。压敏电阻电流的暂态最大峰值为 31 A ,稳态峰值为 28 A ,吸收的最大能量为 8.4 kJ ,与 5 kA 的氧化锌避雷器的通流容量相当。

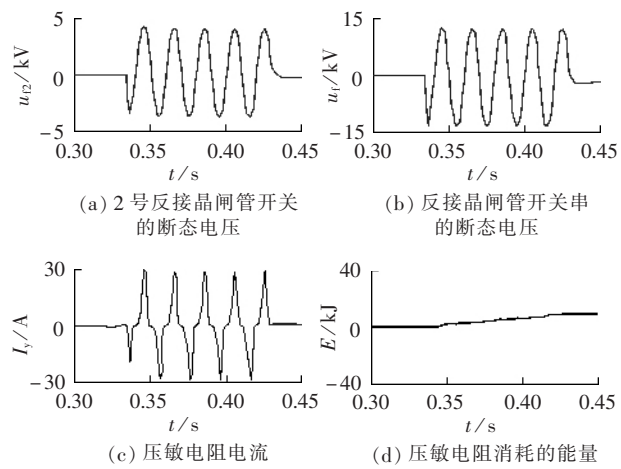


图 8 投入过压保护后电容器击穿时的波形

Fig.8 Waveforms during capacitor breakage with over-voltage protection equipped

4.2.2 晶闸管失掉脉冲

在 7 级失掉脉冲($t=0.32\text{ s}$),晶闸管开关在 1 个周期后($t=0.32\text{ s}$)闭锁,5 个周期后($t=0.42\text{ s}$)断路器跳开,此时的晶闸管串断态电压、电容电压,压敏电阻电流以及吸收能量曲线如图 9 所示。从仿真曲线看出,晶闸管过零断开后,压敏电阻立刻动作,使得电容器迅速放电,很快达到一定稳态值,晶闸管开关

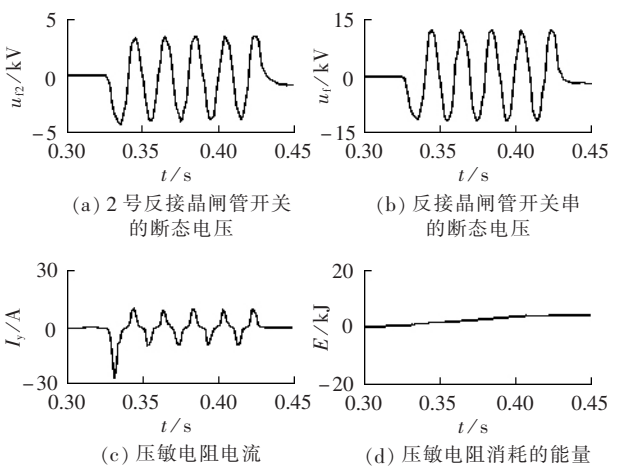


图 9 投入过压保护后失掉脉冲时的波形

Fig.9 Waveforms during thyristor switch pulse loss with over-voltage protection equipped

串的断态电压波形基本上无偏移现象。从仿真波形可以得到 u_{f2} 和 u_f 的最大峰值分别为 4.36 kV 和 12.16 kV, 分别小于 2 号反接晶闸管开关和反接晶闸管开关串的电压定额(5.84 kV 和 15.2 kV)。 I_y 暂态最大峰值为 27 A, 稳态峰值为 10 A, 吸收的最大能量为 4.04 kJ。

5 结论

利用 EMTDC 对改进 CKY 装置的断态过电压进行仿真分析得出 4 点结论。

a. 装置投入时, 如果采用电压过零投入方式有较高的断态过电压, 虽然持续时间较短, 仅为半个周期, 但是过压保护仍会动作。因此, 不宜采用这种投入方式, 应该采用立即投入方式, 即在断路器合闸时, 立即触发导通晶闸管, 虽会产生冲击电流, 若在第 1 级投入, 据分析冲击电流幅值仍小于最大正常工作电流幅值。

b. 换级操作时, 断态电压不高, 在允许范围之内。由此证明换级调节控制策略正确, 装置在正常工作运行时暂态性能较好。

c. 在故障情况下, 改进 CKY 装置的断态过电压比较严重, 且持续时间较长, 足以损坏晶闸管, 必须采取一定的保护措施。

d. 装置加装氧化锌压敏电阻过压保护后, 在故障情况下, 装置的断态过电压被限制在允许的范围之内。若保护动作后, 断路器在 0.1 s 内跳闸, 压敏电阻通流容量不很大, 和普通氧化锌避雷器容量相当。

参考文献:

- [1] 李民族, 唐晓玲, 李颖, 等. 新型电容无功补偿方法及其接线[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 64-68.
- LI Min-zu, TANG Xiao-ling, LI Ying, et al. A novel capacitor

reactive power compensation method and its circuit connection [J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 64-68.

- [2] MATHUR R M, VARMA R K. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 林海雪. 静止无功补偿装置在输电系统中的应用[J]. 电力设备, 2005, 6(10): 17-20.
- LIN Hai-xue. SVC application in power transmission systems[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(10): 17-20.
- [4] 苏玲, 宋珊, 陈建业. 静止无功补偿器(SVC)应用的最新进展[J]. 国际电力, 2004, 8(1): 44-49.
- SU Ling, SONG Shan, CHEN Jian-ye. The newest project of SVC implemented worldwide[J]. International Electric Power for China, 2004, 8(1): 44-49.
- [5] 高航, 陈希正, 许沛丰. ASVG 工业化装置在电力系统中的应用[J]. 中国电力, 2000, 33(2): 33-35.
- GAO Hang, CHEN Xi-zheng, XU Pei-feng. Practical application of ASVG industrial installation in power system [J]. Electric Power, 2000, 33(2): 33-35.
- [6] 程汉湘, 尹项根, 刘建. SVG 控制系统的稳定性研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 8-11.
- CHENG Han-xiang, YIN Xiang-gen, LIU Jian. Research of SVG control system stabilization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4): 8-11.
- [7] 蓝元良, 印永华, 周孝信. 大功率电力电子装置过电压保护技术综述[J]. 电力电子技术, 2005, 39(3): 123-125.
- LAN Yuan-liang, YIN Yong-hua, ZHOU Xiao-xin. Overview of over-voltage protection of power electronic equipment[J]. Power Electronics, 2005, 39(3): 123-125.
- [8] 林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65-66.
- LIN Liang-zhen, YE Lin. An introduction to PSCAD/EMTDC[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 65-66.
- [9] 杨威, 张金栋. 电力电子技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1995.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

王世蓉(1978-), 女, 贵州黔南人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail: wsrwsrwsr@tom.com);

李民族(1943-), 男, 四川宣汉人, 副教授, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

Simulation of thyristor off-state over-voltage in improved capacitor var compensation device of thyristor series voltage regulation

WANG Shi-rong, LI Min-zu, TANG Xiao-ling

(Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: The thyristor in the improved capacitor var compensation device of thyristor series voltage regulation endures unsafe off-state over-voltage when it switches off on line. To ensure its safe operation, the principle and conditions of the over-voltage generated under off-state of thyristor are explained. States of off-state over-voltage is analyzed theoretically under different device working conditions, such as put-in, tap change and faults. Simulation results with PSCAD/EMTDC software are presented for typical working conditions. For serious fault conditions, the simulation is redone with ZnO varistor over-voltage protection being adopted. Results show that the off-state over-voltage of thyristor is not high for normal operations, such as put-in and tap change, but when there is fault in the device, serious off-state over-voltage will occur. If circuit breaker trips within 0.1 s after the over-voltage protection acted, the current passing ZnO varistor is not high.

This project is supported by the Key Scientific Foundation of Guizhou Province[GY(2005)3019].

Key words: series voltage regulation; reactive power compensation device; thyristor switch; off-state over-voltage; varistor; EMTDC