

晶闸管变压式电容无功补偿装置暂态特性仿真分析

唐晓玲, 李民族, 刘景远, 王世蓉

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 笔者提出了晶闸管变压式电容无功补偿装置投入和换级过程的控制过程,建立了单相试验装置各过程的状态变量方程,采用数字积分对试验装置投入和换级过程的暂态电流及晶闸管断态电压进行了仿真分析,分析结果和试验结果基本吻合。分析结果表明,装置暂投入和换级过程暂态性能良好,也为换级控制提供了设计依据。

关键词: 变压式电容无功补偿装置; 晶闸管开关装置; 换级过程; 暂态电流特性; 晶闸管断态电压

中图分类号: TM531.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0057-05

Simulation and Analysis of Transient Characteristics of Capacitor Reactive Power Compensation by Adjusting Voltage with Thyristors

TANG Xiao-ling, LI Min-zu, LIU Jing-yuan, WANG Shi-rong

(Department of Electric Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: The authors proposed controlling processes of capacitor reactive power compensation by adjusting voltage with thyristor in operating and grade-changing situations, set up state parameter equations of various processes for single-phase test device, stimulated and analyzed the transient current of the device and the disconnected voltage on thyristor switches in operating and grade-changing processes with digital integral. The simulation results are in accordance with the test ones, indicating that the device perform well in operating and grade-changing processes. This research may offer a reference for grade-changing control design.

Key words: capacitor reactive power compensation by adjusting voltage; thyristor switching equipment; grade-changing process; characteristics of transient current; disconnected voltage on thyristor switches

0 引言

文[1]提出了一种新型电容无功补偿方法和原理接线,按照此方法和原理接线构成的无功补偿装置称之为晶闸管变压式电容无功补偿装置,它是对俄罗斯类似 CKY 装置^[2]进行重大改进提出的,故文[1]及笔者又称之为改进 CKY 装置。与现代的基于晶闸管的各种快速无功补偿装置比较,如 TSC^[3]、STATCOM^[4]、TCR 等,改进 CKY 装置的最大特点是:晶闸管工作电压低,只达到网络额定电压的 20% 左右;只需使用 32% 补偿装置容量的辅助变压器,就可直接接入 35~110 kV 母线,根据我国目前晶闸管串联技术水平,还有可能直接接入 220 kV 母线,不仅可取消目前国内快速补偿装置所需的中间变压器,220~500 kV 变电站主变压器接补偿装置用的第 3 绕组仅供站用电和隔离高、中压侧的零序电流

用,其容量非常小,近乎于将第三绕组取消;除此之外,若采用两套容量匹配的 8 级改进 CKY 装置,可产生 64 级不同的补偿容量,电压调节精度相当高,有的变电站可取消变压器带负荷调整分接开关。其综合工程造价不仅比目前国内快速补偿装置显著降低,而且有可能和真空断路器投切电容器组持平。

但是该装置也存在一些缺点:它是利用晶闸管开关的频繁通断来换级调节电容无功,断开时要产生过电压,接通时要产生过电流,它们的大小是否满足要求,需要认真研究;换级过程中电流自由分量的大小、衰减的快慢直接影响暂态过程,而暂态过程的长短又直接影响换级控制的快速性,因此,需要对换级暂态过程进行研究和仿真分析,对快速控制也需要提供数据依据;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。机械断路器投入后,晶闸管接通前,要产生过电压。要了解晶闸管什么时刻接入装置的

收稿日期:2008-05-23; 修回日期:2008-09-11

作者简介:唐晓玲(1979-),女,硕士,讲师,研究电力电子技术在电力系统及工业中的应用。

冲击电流最小及若随机接入冲击电流最大值是多少,就需要对投入时的暂态过程进行研究。笔者按照电路原理基本理论^[3]建立了改进 CKY 装置的暂态过程数学模型,通过数字仿真,对投入和换级时的暂态过程的电流、电压变化进行了分析,并和试验特性相比较,基本吻合,证明了装置暂态性能良好,为控制系统的设计提供了依据。

1 改进 CKY 装置原理

改进 CKY 装置接线原理见图 1, 图中 TB 是一个辅助变压器,其一次绕组直接接于装置工作母线,二次绕组通过晶闸管开关装置 VT 和电容器组 C 串联后再接入同一工作母线。晶闸管开关装置 VT 的作用是改变 TB 二次绕组的等效匝数以改变 TB 一、二次绕组变比 K 。当变比 K 改变时, TB 二次绕组附加电势的 ΔE 大小改变,方向不变,从而改变电容器组端电压。

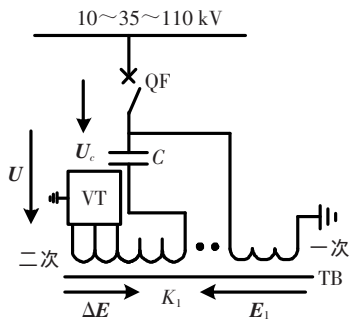


图 1 原理接线

根据文^[1]推导,电容器组发出无功为

$$Q_c = \frac{U_c^2}{X_c} = \frac{U^2}{X_c} (1-K)^2 \quad (1)$$

式(1)中, $K=w_1/w_2$, w_1, w_2 为 TB 一、二次绕组等效匝数; U 为工作母线电网电压; X_c 为电容器组容抗。

从式(1)中看出,当 w_1 不变时, w_2 改变,变比 K 改变,则电容器组发出的无功 Q_c 可调。

装置单相具体接线见图 2。图中 $u(t)$ 为电源电压; C 为并联电容; L 为限流电感; J 是机械开关断路器; w_1 是变压器一次绕组匝数; w_{21}, w_{22}, w_{23} 是 3 个二次绕组匝数; w_{21} 为固定绕组; w_{22}, w_{23} 为调节绕组,通过 1~8 号晶闸管开关对调节绕组进行正接、反接或不接来改变 BT 二次绕组的等效匝数,从而改变变比 K 。

2 暂态过程状态方程的建立

根据图 2 所示的单相接线,装置的单相暂态等效电路见图 3^[5,6]。图中 R_1, R_2 为装置自身内阻; $u(t)$ 为电源电压; $i_1(t), i_2(t)$ 分别为变压器一次绕组回路和二次绕组回路的电流; C 为主电容; L 为变压器漏感与限流电感之和; L_1, L_2 为变压器一、二次绕组忽略漏感后的自感; M 为变压器绕组互感。

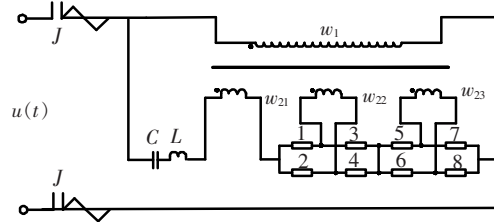


图 2 装置单相具体接线图

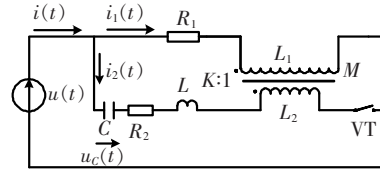


图 3 装置暂态特性试验单相等效电路

根据电路原理的基本知识^[7],变比与自感、互感值的关系如下

$$L_2 = K^2 L_1 \quad (2)$$

$$M = K L_1 \quad (3)$$

在调节过程中, K 变化, L_2 和 M 都变化,因此该电路称为变参数电路。装置投入过程是这样的:当断路器合闸后,在适当时刻某级晶闸管开关接通;换级过程是:当前级晶闸管开关断开后,在适当时刻接入新级的晶闸管开关。分析这两个过程可以看出,随着晶闸管开关的通、断,电路结构存在两种状态:当辅助变压器二次绕组断开时,回路只接通一次线圈回路,称为断开状态;当二次绕组接通时,称为闭合状态。所以装置在投入和调节过程中,又是一个变结构电路,根据不同电路的拓扑结构,可以写出不同的状态方程。

2.1 断开状态方程

当二次侧开路时,根据图 3 的等效电路,断态方程为

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} = u(t) \quad (4)$$

其状态方程为

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_1} u(t) - \frac{1}{R_1} i_1 \quad (5)$$

式(4)、(5)中, $u(t) = \sqrt{2} U_N \sin(\omega t + \psi)$ 。

此时二次绕组回路中,加在待通闸管开关两端电压 u_T 为

$$u_T = (1-K)u(t) - U_c(0) \quad (6)$$

根据晶闸管开关接入时的 u_T 可得到接入时刻 t_1 。

所有调节绕组可用一个等效绕组来代替,断态时图 3 可等效为图 4, 1、2、3、4 表示晶闸管开关串。

经分析得出,正接晶闸管开关串的断态电压为

$$u_+ = u_1 + u_4 = u(t) - U_c(0) - 0.5K_{\max}u(t) - 0.5K_{\max}u(t) = (1-K_{\max})u(t) - U_c(0) \quad (7)$$

式(7)中, K_{\max} 为调节过程中 BT 的最大变比。

反接晶闸管开关串的断态电压为

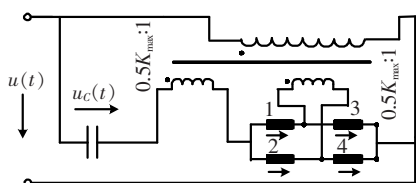


图4 断开状态等效电路

$$u_- = u_2 + u_3 = u(t) - U_C(0) - 0.5K_{\max}u(t) + 0.5K_{\max}u(t) = u(t) - U_C(0) \quad (8)$$

显然, $u_-(t) > u_+(t)$ 。

2.2 闭合状态方程

当晶闸管开关导通接通二次回路后, 根据图3等效电路, 可得到闭合状态的微分方程组为

$$\begin{cases} R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = u(t) \\ R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + u_c(t) + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = u(t) \\ \frac{1}{C} \int i_2 dt + U_C(0) = u_c(t) \end{cases}$$

根据式(2)、(3), 该方程组可表达为

$$\begin{cases} u(t) = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + KL_1 \frac{di_2}{dt} \\ u(t) = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + u_c(t) + K^2 L_1 \frac{di_2}{dt} + KL_1 \frac{di_1}{dt} \\ u_c(t) = \frac{1}{C} \int i_2 dt + U_C(0) \end{cases}$$

经化简可得状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \left[\frac{1}{L_1} - \frac{K(1-K)}{L} \right] u - \left(\frac{R_1}{L_1} - \frac{K^2 \cdot R_1}{L} \right) i_1 + \frac{KR_2}{L} i_2 + \frac{K}{L} u_c \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{1-K}{L} u + \frac{KR_1}{L} i_1 - \frac{R_2}{L_1} i_2 - \frac{1}{L_1} u_c \\ \frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_2 \end{cases}$$

采用四阶、五阶的 Runge-kutta 变步长方法^[8], 根据投入或换级过程有序求解两个状态方程组, 可得装置暂态特性。

3 投入过程仿真分析

投入过程的暂态特性和下面两个因素有关: 断路器合闸时的电源电势初相位 ψ ; 晶闸管开关的接入时刻。观察图3等效电路不难发现, 当断路器合闸后晶闸管开关接入前, 所有断态晶闸管都要承受严重的断态过电压。当断路器合闸后立即接入晶闸管开关, 则不存在断态过电压, 当 $\psi = \pi/2$ 晶闸管开关和断路器同时投入时, 冲击电流最大, 所以当断路器合闸后, 待通晶闸管开关选择最佳时刻接入, 此时过电流最小, 晶闸管承受断态过电压的时间也不太长^[9]。

仿真装置系该课题单相试验模型, 其接线见图2。仿真参数如下: $U_N = 230 \text{ V}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$, $R_1 = 5 \text{ } \Omega$, $R_2 = 4 \text{ } \Omega$,

$X_{L1} = 1.095 \text{ } \Omega$, $X_{L2} = 4.4 \text{ } \Omega$, $X_C = 32 \text{ } \Omega$ 。

(1) 投入时 $\psi = \pi/2$, 晶闸管开关最佳时刻接入

此过程电路结构变化, 先是断开状态, 然后是闭合状态。断开状态的初始条件是: $i_{1(0)} = 0$ 。闭合状态的初始条件是 $u_{C(t_0)} = 0, i_{2(t_0)} = 0, i_{1(t_0)}$ 为上一状态的末值, 由晶闸管开关接入时刻 t_0 确定。有序求解两个状态方程可得到此过程的电流特性曲线, 见图5。

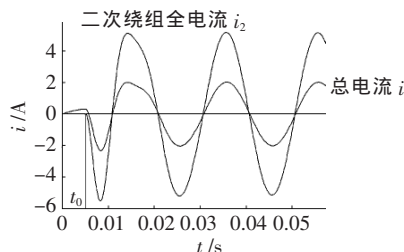


图5 $\psi = \pi/2$ 时最佳时刻投入的总电流 i 及二次绕组全电流 i_2 曲线

由图5可看出, 装置在机械开关合闸后, 只经过一个周波就进入稳定状态, 总电流的冲击电流是投入后的稳态正常工作电流的1.15倍, 若以最小级投入 ($K = 0.553$), 则投入总电流远小于装置的最大工作电流。

(2) 投入时 $\psi = \pi/2$, 且晶闸管开关和断路器同时接入时

同时接入时为闭合状态。因为投入时的电容电压 $u_{C(0)} = 0$, 所以晶闸管开关是在两端电压为最大值时接入的, 此时冲击电流最大。据状态方程和初始条件: $u_{C(0)} = 0, i_{1(0)} = 0, i_{2(0)} = 0$, 可得投入时的总电流仿真曲线见图6。由曲线可以看出, 投入后两个周波以内, 电流已经趋向稳定。但冲击电流的幅值较最佳时刻投入时要大, 达到稳态值的2.03倍, 若在最小级投入, 冲击电流的幅值仍远小于最大工作电流, 但此情况还是应该尽量避免。

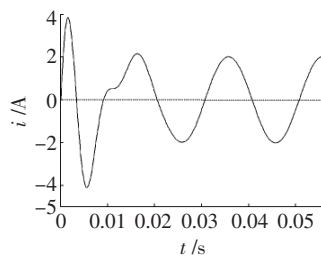


图6 $\psi = \pi/2$ 时立即投入的总电流 i 曲线

(3) 投入时 $\psi = \pi/6$, 晶闸管开关在端电压第1个最佳时刻接入

这种情况是当电源电压刚过零后, 断路器合闸, 再经过 $(5/6)\pi$, 晶闸管开关才过零接入。这种接入条件导致辅助变压器的二次绕组断开时间接近一个周波, 晶闸管开关的断态电压比较严重。根据断路器投入时刻的初始条件: $u_{C(0)} = 0, i_{1(0)} = 0$, 求解状态方程5, 再根据式(8)求解反接晶闸管开关串的最大断态电压仿真曲线, 直到待通晶闸管为最佳时刻时, 以后则为正常工作电压。

从图7所示曲线可以看出, 反接晶闸管开关串

断态电压幅值大大超过了其最大工作电压幅值 U_{mg} ，达到 1.8 倍左右。如果装置不能在第一个过零点正常投入，这个幅值较高的过电压就又要持续半个周波。因此，给晶闸管开关装置配备的压敏电阻过压保护不仅要考虑能避免幅值较高的过电压，还必须考虑第一次过零点不能正常投入、过电压持续时间较长的情况，要充分考虑压敏电阻的通流容量。

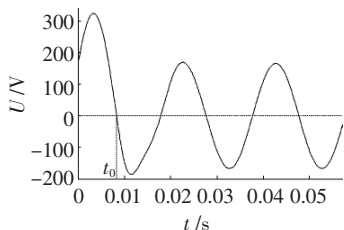


图 7 $\psi=\pi/6$ 且晶闸管在端电压第 1 个最佳时刻接入的反接晶闸管断态电压

4 换级过程仿真分析

改进 CKY 装置的升降级调节都是通过晶闸管开关有序换接来实现的，设原来状态为 K' (调节参数为 K')，换接到要求参数为 K 的状态，一般要经过中间状态。经过分析，换级操作的时序是：撤掉 K' 状态的晶闸管开关的触发控制脉冲，使之待断晶闸管开关在电流过零时自然断开；选择合适时刻施加触发控制脉冲，接通 K 状态待通晶闸管开关。 K' 状态 and K 状态拓扑结构相同，即闭合状态。

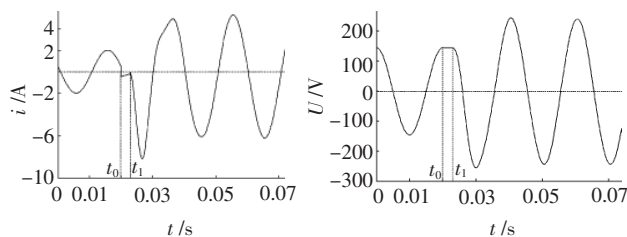
K 状态接入的合适时刻的条件是：换级时二次绕组电流自由分量最小。为达到这一目的，根据 TSC 原理^[10]可在晶闸管开关两端电压为零或最小的时候加上控制脉冲，接通晶闸管。

前级导通管电流过零断开后，立即接入下一级，文[1]据此原则分析得出降级调节的控制策略是：新级晶闸管开关是在前级晶闸管开关断开后立即接入，升级调节的控制策略是前级晶闸管电流过零断开后，在新级待通晶闸管开关两端电压时刻自动接入。

换级过程的初始条件由前级状态末值确定，即 $u_{C(0)}=\pm U_{Cm}, i_{2(0)}=0, i_{1(0)}=i_1(t_3), t_3$ 为中间状态结束时刻。

4.1 升级调节过程仿真

按换级控制过程有序求解状态方程可得各换级电流特性。如图 8(a)所示，装置的第 1 级 ($K'=0.553$) 直升到第 4 级 ($K=0.277$) 时的暂态电流波形的冲击电流幅值较稳态值大，约为 1.36 倍，自由分量在 2 个周波左右就已经衰减到 3% 以下，装置暂态性能良好。图 8(b)为第 1 级直升到第 4 级时的电容电压波形，可看出在换级过程中，电容电压近似正弦变化，无过电压存在。图中， t_0 为前级断开时刻， t_1 为新级接入时刻， $t_0 \sim t_1$ 间电容电压有一平顶，因为此时间段二次绕组断开， $t_2=0, u_c=U_{Cm}$ 不变。同理，图 8 中，总电流 $i(t)$ 在 $t_0 \sim t_1$ 段 $i(t) \approx 0$ 。



(a) 暂态电流波形 (b) 电容电压波形

图 8 第 1 级直升到第 4 级时的暂态电流和电容电压波形

装置从第 1 级 ($K'=0.553$) 直升到第 7 级 ($K=0.0004$) 的仿真曲线，见图 9。此时的冲击电流幅值较稳态值大，约为 1.43 倍，也是可以承受的。自由分量在 2 个周波左右就已经衰减到 3% 以下，暂态性能良好。

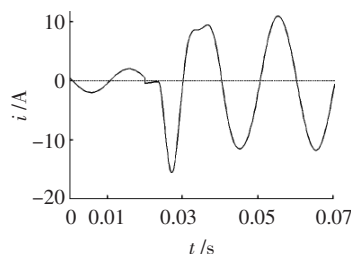


图 9 第 1 级直升到第 7 级时的暂态电流

由以上仿真分析看出，大跨级升级调节暂态性能较好，完全允许，逐级升级调节的暂态性能更乐观估计。

4.2 降级调节过程仿真分析

降级调节的新级晶闸管在前级晶闸管断开后立即接入，换级时为了保证后级晶闸管是在前级晶闸管断开后才投入，不造成桥接开关对调节绕组的短接，设从断开状态到 K 状态有一个 $0.1 \text{ ms} (1.8^\circ)$ 的时延。这种换级方法使待通晶闸管开关接入时，晶闸管两端存在一定的电压差，必产生较大的冲击电流，因此需要定量仿真确定。分别以三级到二级、六级到五级的调节过程为例，按照与升级调节过程相似的仿真分析，可得该降级过程的电流曲线见图 10、11。图中 t_0 为换级时刻。从仿真得到的总电流和二次绕组上的全电流曲线可以看出，降级调节过程产生的冲击电流情况要比升级过程大，但衰减过程都很短，均能在 2 个周波左右衰减到 3% 以下。若在降级过程中采用跨级调节，晶闸管开关两端存在的较大压差产生的冲击电流情况更突出，如图 12 所示的从七级降到四级的电流曲线。二次电流的冲击电流幅值超过了稳态值的 2 倍，衰减周期在 3 个周波左右。尽管如此，冲击电流作用时间短，不会引起晶闸管过热。降级调节，经计算、试验，降级时跨少级调节还是允许的。换级过程中只要进入断开状态，晶闸管均要承受断态过电压，其大小取决于前级。最大断态电压值出现在前级为第 1 级时，为 $0.447 U_{m0}$ 。但承受时间极短，压敏电阻通流能力能承受。

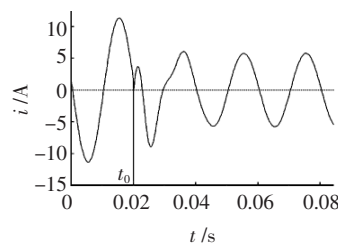
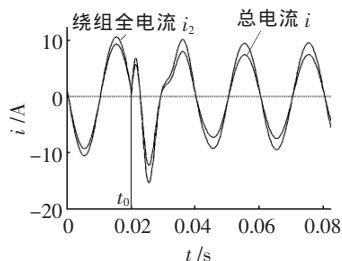
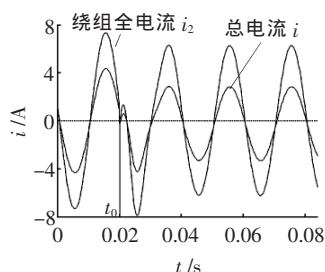


图10 第3级降到第2级时的暂态电流波形 图11 第6级降到第4级时的暂态电流波形 图12 第7级降到第4级时的暂态电流波形

5 仿真特性和试验结果比较

为检验仿真特性的正确性,现将仿真结果和试验结果^[10]进行比较,见表1。

级数	K	试验值	仿真值
1	0.553 0	1.72	1.43
2	0.461 0	2.41	2.17
3	0.369 0	3.24	3.06
4	0.277 0	4.15	4.03
5	0.183 0	5.18	4.83
6	0.091 7	6.38	5.99
7	0.000 4	7.90	7.53

(1) 各级稳态电流值比较

由表1看出,仿真值和试验值相近,说明仿真的正确性。但此仿真值偏小,其原因有二:实际装置辅助变压器二次绕组,接有阻容保护,据实测,二次回路断开时,一次电流为0.25 A,应为容性;随着级数增加,电源电压有所上升,而仿真时此值不变。

(2) 换级暂态特性比较

图13为实测一级至四级时总电流 $i(t)$ 和电容电压 $u_c(t)$ 波形,和图8、9的波形比较可以看出:电容电压 $u_c(t)$ 波形基本相同,其幅值是:一级时,仿真值为145.6 V,实测值为155 V;四级时,仿真值为228.8 V,实测值为240 V,仿真值偏小;总电流 $i(t)$ 仿真波形换级后与实测值比较,冲击电流偏大,波形畸变较严重,这也是因为仿真参数 R 和 X_L 比实际值小,实际装置晶闸管通态电阻均没有充分估计。

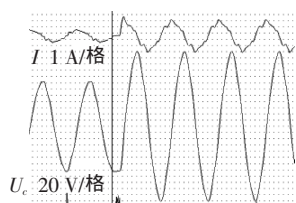


图13 实测1~4级时总电流 $i(t)$ 和电容电压 $u_c(t)$ 波形

6 结语

通过对单相试验装置仿真分析有如下结论:

(1)装置在最小级投入,无论晶闸管开关在最佳

时刻接入还是随机接入,即使断路器在最严重情况合闸,投入时的冲击电流只是最小级工作电流的1.15~2.01倍,远小于装置的最大工作电流;

(2)装置在最小级随机投入,若晶闸管开关在断路器合闸后第一个半周波内最佳时刻接入,反接晶闸管开关串要承受网络电压,晶闸管开关装置必须并接压敏电阻进行断态过电压保护,且压敏电阻的通流量要充分考虑;

(3)升级调节,换级过程冲击电流不大,可实现大跨级调节,降级调节冲击电流偏大,经过计算和试验也可实现跨少级调节;

(4)无论升、降级调节,换级后在1~2个周波后,二次电流过零点均为基波过零点,为快速控制换级提供了条件;

(5)无论稳态电流还是暂态电流波形,均和实测值有点差异,但变化规律相同,且误差不很大,仿真结果可信度仍然较高。

参考文献:

- [1] 李民族,唐晓玲.新型电容无功补偿方法及其接线[J].电网技术,2004,28(8):64-68.
- [2] ТУМАНОВ И М (俄), ЕВСТИГНЕЕВА Т А (俄). Тиристорные Установки Для Повышения Качества Электро-энергии[М]. М.: Энергоиздат, 1994.
- [3] 石新春,杨梅玲,喻德忠,等.一种采用零压型开关的TSC低压无功补偿装置[J].电网技术,2000,24(12):41-44.
- [4] 朱永强,刘文华,邱东刚,等.基于单相STATCOM的不平衡负荷平衡化补偿的仿真研究[J].电网技术,2003,27(8):42-45.
- [5] 林集明.伊冯可控串联补偿阻抗控制暂态特性的数字仿真[J].电网技术,1997(7):1-5.
- [6] 葛俊,童陆园,耿俊成.基于电容电压同步方式的TCSC暂态特性的数学描述[J].中国电机工程学报,2001,21(3):1-5.
- [7] 邱关源.电路(第4版)[M].北京:高等教育出版社,1999.
- [8] 王沫然.MATLAB6.0与科学计算[M].北京:电子工业出版社,2001.
- [9] 李民族,朱国荣,李颖,等.变耦式可控电抗特性、机理及应用[J].电网技术,2004,28(10):50-54.
- [10] 李民族.《晶闸管控制变压器式电容无功补偿方法关键技术特性的测试》结题报告,黔科合GY字(2005)3019[R].贵州大学,2006.