

晶闸管控制串联电容换级特性研究

刘景远, 李民族, 唐晓玲, 王世蓉

(贵州大学 电工学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 研究了晶闸管控制的分级串联电容换级时的暂态过程。采用编程仿真的方式, 对单级电路和多级电路分析后, 提出了晶闸管开关最佳接入时刻为被短接电容电压为零时; 分析了阻尼电阻、电感对暂态过程的影响以及它们之间的参数配合; 采用电容分级式可控串补策略可大大降低可调电感容量及成本。高压输电线路分级电容可控串补的应用可提高系统的稳定性。

关键词: 晶闸管开关; 分级串联电容; 可控串联补偿; 变耦式可控电抗; 暂态分析

中图分类号: TN 344

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)06-0026-05

0 引言

在现代电力系统中, 如何提高现有交流线路传输能力^[1], 提高系统稳定性, 一直是电力工程界的热点之一。柔性交流输电技术为其提供了有效手段^[2]。在诸多解决方案中, 比较简单、经济的方法就是在线路中串联可调容抗^[3], 构成可控串联补偿 TCSC (简称可控串补)。当前国内讨论较多的是晶闸管控制电抗器 TCR (Thyristor Controlled Reactor) 式可控串补^[4], 也有文章提出变耦电抗式可控串补^[5,6]。TCR 式可控串补, 为降低谐波污染, 通常采用 TCR 与电容并联构成可调部分再串联固定电容的接线方式^[7,8]。变耦电抗式可控串补通常采用变耦式可控电抗串联固定电容的接线方法^[5]。特别是 TCR 式可控串补, 所需电抗器和电容器容量十分大^[6]。

可用晶闸管开关的通断短接或串接电容器进行串补电容^[6]。本文对用晶闸管开关进行串补电容换级的暂态过程作了较详细的分析, 提出了最佳接入时刻、限制暂态过程的措施以及各元件参数对暂态过程的影响等。

1 单级电路分析

1.1 电路模型

在所有电容分级中, 最简单、基本的是单级电路, 即电容器只有一组。采用的操作方法为: 晶闸管开关 V_T 与电容器并联, 当线路不需要补偿时, 晶闸管开关接通, 将电容器短接; 需要补偿时, 晶闸管开关断开, 电容器自然串入线路中, 如图 1 所示。

图中, R, L 为高压线路的等值集中参数电阻和电感, C 为串补电容, 考虑到在晶闸管开关接通过程

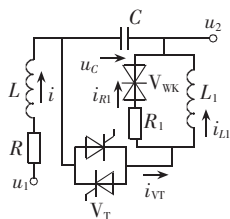


图 1 单级电路接线图
Fig.1 The single-grade circuit wiring

中, 会有较大的通态电流变化率, 损坏晶闸管, 因此回路串接了阻尼电感 L_1 , 用于限制晶闸管开关接通时的通态电流变化率 di/dt 。另外, 为了阻尼 C, L_1 构成的并联振荡, 电感 L_1 并联了阻尼电阻 R_1 。但是, 考虑到此电阻在正常工作时不应接入, 以免增加损耗和增加线路阻抗, 采用了经稳压管开关 V_{WK} 串接, 在电感 L_1 电压较高时击穿接入, 暂态过程结束后退出。

1.2 电容器短接过程暂态特性分析

电容器被晶闸管开关短接后, 其暂态过程分为两个过程, 即阻尼电阻 R_1 接入和退出。因此, 等值电路也分为两个, 如图 2 所示。图中, 晶闸管开关和稳压管开关分别用理想开关 S_{VT} 和 S_{WK} 表示。

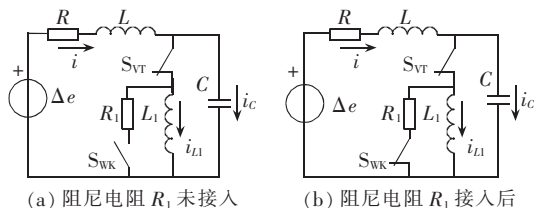


图 2 晶闸管开关接通后等值图

Fig.2 The equivalent circuit after thyristor switch-on (single-grade circuit)

当晶闸管开关短接电容时, 设线路两端电压不变, 因此可以将线路两端的电压差等效成恒定的正弦交流电压源 Δe 。

根据等值电路图 2(a), 可得阻尼电阻 R_1 未接入时的电路方程为

$$Ri + L \frac{di}{dt} + u_C = \Delta e$$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} - u_C = 0, C \frac{du_C}{dt} + i_{L1} = i$$

取 U_B 为线路额定电压 U_N , S_B 为装设前线路传输功率 S_0 , 经化简其变成标么值的状态方程为

$$\frac{di^*}{dt} = -\frac{\omega R^*}{L^*} i^* - \frac{\omega}{L^*} u_{C^*} + \frac{\omega}{L^*} \Delta e^* \quad (1)$$

$$\frac{di_{L1}^*}{dt} = \frac{\omega}{L_1^*} u_{C^*} \quad (2)$$

$$\frac{du_{C*}}{dt} = \frac{\omega}{C*} i_* - \frac{\omega}{C*} i_{L1*} \quad (3)$$

同理,根据阻尼电阻接入后系统的等值电路图 2(b)可列出标么值状态方程为

$$\frac{di_*}{dt} = -\frac{\omega R_*}{L_*} i_* - \frac{\omega}{L_*} u_{C*} + \frac{\omega}{L_*} \Delta e_* \quad (4)$$

$$\frac{di_{L1*}}{dt} = \frac{\omega}{L1*} u_{C*} \quad (5)$$

$$\frac{du_{C*}}{dt} = \frac{\omega}{C*} i_* - \frac{\omega}{C*} i_{L1*} - \frac{\omega}{R1* C*} u_{C*} \quad (6)$$

式中的 ω 为电源角频率。对方程组(1)~(3)和(4)~(6)按 R_1 接入与否有序采用数值求解,对整个暂态过程进行仿真,以此分析晶闸管开关接入时刻以及阻尼电感 L_1 、阻尼电阻 R_1 参数对暂态过程影响。

1.2.1 晶闸管接入时刻的选取对暂态过程影响^[3]

为使控制简单,选取两种典型情况:在电容电压 $u_C=0$ 和电容电压 $u_C=U_{Cm}$ 峰值时刻接入晶闸管开关。以此确定初始条件,并以一条线路参数 $R_*=0.079\ 3\ \text{p.u.}$, $X_*=0.312\ 6\ \text{p.u.}$, $U_N=500\ \text{kV}$ 、传输功率 $\tilde{S}_0=200+\text{j}97\ \text{MV}\cdot\text{A}$ 为背景,求解晶闸管开关接入后,线路电流自由分量 i_{ZY} 和电容电压 u_C 及晶闸管通态电流变化率 δ 随时间 t 的变化曲线 ($\delta=\text{d}i_{VT}/\text{d}t$),如图 3 所示。

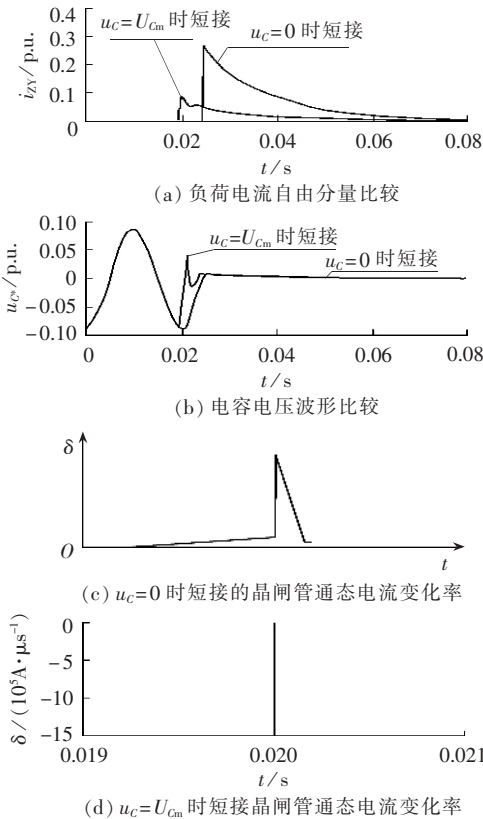


图 3 晶闸管开关不同接入时刻暂态特性比较图
Fig.3 Comparison of transient characters for different thyristor switch-on time

图 3 各曲线是在 $R_1=0.2R$; $X_{L1}=0.02\ X_C$ 情况下仿真分析计算得出的,图中 $u_C=U_{Cm}$ 时为 $t=0.02\ \text{s}$, $u_C=0$ 时为 $t=0.025\ \text{s}$ 。从图中可以看出:

a. 无论哪种时刻,线路电流自由分量 i_{ZY} 的幅值均小于正常传输电流,且在 3 周期内很快衰减为零,电容电压幅值均未超过正常电压值;

b. 但在电容电压 $u_C=U_{Cm}$ 时刻接入,晶闸管电流变化率 $\delta=15\times10^5\ \text{A}/\mu\text{s}$,远大于在 $u_C=0$ 时刻接入的通态电流变化率($40\ \text{A}/\mu\text{s}$),这会恶化晶闸管工作条件,造成晶闸管的损坏。

因此,选择在 $u_C=0$ 时接通晶闸管开关为宜。在 $u_C=U_{Cm}$ 时接通, δ 很大,这是接通瞬间,电感 L_1 的电压 $u_{L1}=U_{Cm}$,电阻 R_1 支路稳压管导通立即接入 R_1 ,电容 C 经 R_1 放电,晶闸管电流发生剧烈突变。在 $u_C=0$ 时接通, u_{L1} 从零上升, R_1 经一定时间才接入。虽然晶闸管开关接通时,晶闸管要通过线路电流最大值,但 L_1 的阻碍作用,使 δ 较小,直到 R_1 接入瞬间,晶闸管通态电流才发生突变, δ 较大,但远小于 $u_C=U_{Cm}$ 时接通。从数据分析看出,通态电流变化率的突变值都是发生在 R_1 接入时,这是因为流过晶闸管电流从较小的 i_{L1} 突变到十分大的 i_{R1} 。

1.2.2 对于阻尼电感 L_1 的选择

对于阻尼电感 L_1 的取值要适中,过大,当晶闸管接通后,电容 C 和电感 L_1 构成的等效感抗较大,要增加 C, L_1 的总容量,增加投资,还有可能离并联谐振区太近;过小,限制晶闸管通态电流变化率能力太弱,同时,暂态过程持续时间太长,不能很快进入稳态。在此仿真中,取补偿容抗的 2% 和 20%,作为晶闸管通态电流变化率和线路电流自由分量的波形比较,如图 4 所示。

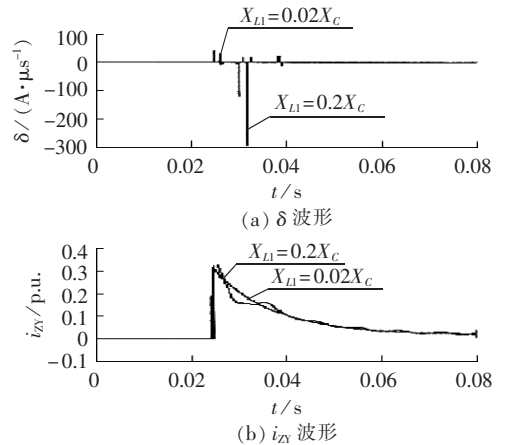


图 4 $R_1=0.2R$ 时不同 L_1 的波形比较

Fig.4 Comparison of waves for different L_1 with $R_1=0.2R$

从图中看出,当 R_1 一定值后,若 L_1 增大,可使 R_1 接通频率增高,这是由于暂态 u_{L1} 增加;线路电流自由分量 i_{ZY} 的幅值 i_{ZYm} 增加,这是因为在接通时刻前,线路电流 i_{L0} 为幅值 I_m 与接通时刻后线路电流幅值 I'_m+i_{ZYm} 相等,而 I'_m 随 L_1 增加而下降缘故。由此可得, i_{ZYm} 必随 L_1 增加而增大,但必小于 I_m ;晶闸管开关接通后约 1/4 周期通态电流变化率突然增加,这是因为 L_1 大, i_{L1} 小,且稳压管阈值电压高,当晶闸管接通

后,接近 1/4 周期时 u_L 大,一旦 R_1 接入后, i_{R1} 很大,此时晶闸管通态电流由 i_{L1} 突变到 i_{R1} ,故此时 δ 很大。

1.2.3 阻尼电阻 R_1 的影响

图 5 示出了不同 R_1 时的晶闸管通态电流变化率 $\delta(t)$ 和线路电流自由分量 $i_{ZY}(t)$ 曲线。

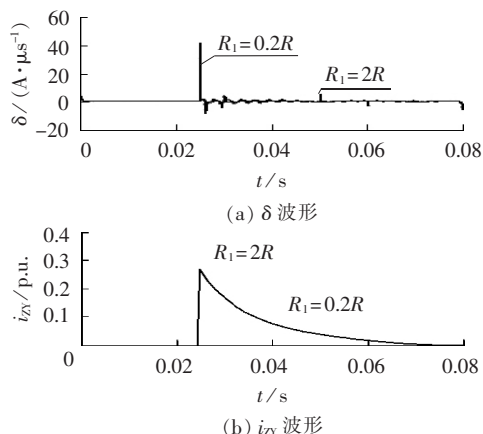


图 5 $X_{L1}=0.02X_C$ 不同 R_1 时波形图

Fig.5 Comparison of waves for different R_1 with $X_{L1}=0.02X_C$

从图 5 可看出, R_1 越大, δ 越小, 这是 R_1 大, i_{R1} 小, R_1 接入时, 由 i_{L1} 变到 i_{R1} 突变小。另外从图中可以看出, R_1 的不同对自由分量 i_{ZY} 基本没有影响。

因此, 阻尼电感和阻尼电阻除了适中取值以外, 还要考虑相互配合。在此, 通过仿真分析, 确定较合理的阻尼参数值为 $X_{L1}=0.02X_C$; $R_1=0.2R$ 。还必须说明, 晶闸管通态电流变化率有正有负, 那是因为不同方向电流突变所致。

1.3 电容器自然接入时的暂态分析

晶闸管开关断开, 电容器自然接入。晶闸管开关需要断开时, 首先由控制系统撤出

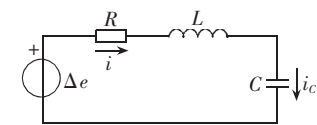


图 6 晶闸管开关断开后等值电路
Fig.6 The equivalent circuit after thyristor switch-off

根据等值图可列出状态方程, 其标么值形式为

$$\frac{di_*}{dt} = -\frac{\omega R_*}{L_*} i_* - \frac{\omega}{L_*} u_{C*} + \frac{\omega}{L_*} \Delta e_* \quad (7)$$

$$\frac{du_{C*}}{dt} = \frac{\omega}{C_*} i_* \quad (8)$$

利用前述线路和装置的参数对状态方程组 (7) (8) 求解, 计算出负荷电流自由分量和电容电压波形如图 7 所示 ($X_{L1}=0.02X_C$, $R_1=0.2R$)。由图看出, 暂态过程中线路电流自由分量幅值和电容电压幅值均不大, 暂态过程也不太长 (4~5 个周期)。

2 多级电路分析

2.1 电路模型

高压线路在进行串补时, 一般都是容性补偿, 因

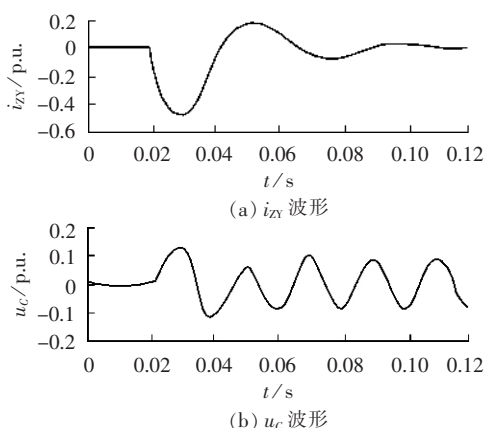


图 7 晶闸管断开后 i_{ZY} 和 u_C 波形

Fig.7 The waveforms of i_{ZY} and u_C after thyristor switch-off (single-grade circuit)

此单级接线意义不大, 只作为基础研究。在实际应用中, 一般采用多级, 即一个固定电容器组串联多个调节电容器组。对每个具体调节电容暂态过程进行分析时, 其他已被短接, 可等效成电感, 与线路电感合在一起用 L 供替; 自然接入的, 等效成一个总电容, 与固定电容合在一起用 C_1 代替。

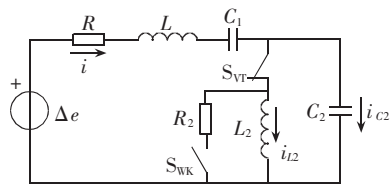
其电路模型如图 8 所示。仿照上述单级电路分析方法, 对其作出等值电路并列写微分方程, 进行仿真。

图 8 多级电路接线图

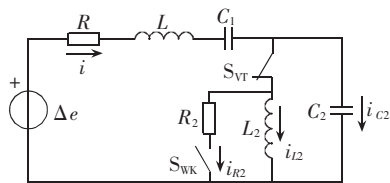
Fig.8 The multi-grade circuit wiring

2.2 等值电路及状态微分方程

图 9 为 C_2 短接后阻尼电阻 R_2 接入前/后的等效电路。式 (9)~(12) 及 (13)~(16) 为分别对应的状态微分方程。



(a) 阻尼电阻接入前



(b) 阻尼电阻接入后

图 9 晶闸管开关接通前/后等值图

Fig.9 The equivalent circuit before and after thyristor switch-on (multi-grade circuit)

2.2.1 阻尼电阻接入前电路的状态微分方程

$$\frac{di_*}{dt} = -\frac{\omega R_*}{L_*} i_* - \frac{\omega}{L_*} u_{C1*} - \frac{\omega}{L_*} u_{C2*} + \frac{\omega}{L_*} \Delta e_* \quad (9)$$

$$\frac{di_{L2^*}}{dt} = \frac{\omega}{L_{2^*}} u_{C2^*} \tag{10}$$

$$\frac{du_{C1^*}}{dt} = \frac{\omega}{C_{1^*}} i^* \tag{11}$$

$$\frac{du_{C2^*}}{dt} = \frac{\omega}{C_{2^*}} i^* - \frac{\omega}{C_{2^*}} i_{L2^*} \tag{12}$$

2.2.2 阻尼电阻接入后电路的状态微分方程

$$\frac{di^*}{dt} = -\frac{\omega R^*}{L^*} i^* - \frac{\omega}{L^*} u_{C1^*} - \frac{\omega}{L^*} u_{C2^*} + \frac{\omega}{L^*} \Delta e^* \tag{13}$$

$$\frac{di_{L2^*}}{dt} = \frac{\omega}{L_{2^*}} u_{C2^*} \tag{14}$$

$$\frac{du_{C1^*}}{dt} = \frac{\omega}{C_{1^*}} i^* \tag{15}$$

$$\frac{du_{C2^*}}{dt} = \frac{\omega}{C_{2^*}} i^* - \frac{\omega}{C_{2^*}} i_{L2^*} - \frac{\omega}{C_{2^*} R_2} u_{C2^*} \tag{16}$$

2.3 电容器组短接过程暂态分析

在对多级电容电路的数值仿真中发现,各元件参数对暂态过程的影响与单级电路基本相同,晶闸管开关投入时刻对电容电压和晶闸管通态电流变化率影响也有相同的结论。因此,对于多级电路,晶闸管开关接通时刻的选取,最佳为被短接的电容电压为零的时刻。此时短接,晶闸管通态电流变化率 δ 的最大值较小。

2.4 电容器自然接入(晶闸管开关断开)暂态分析

与单级电路相同,晶闸管开关断开、电容自然接入时刻,只能是在晶闸管开关撤出脉冲后,电流过零时实现。图 10 示出了此暂态过程的线路电流自由分量和被操作电容器的电压变化波形。从图 10 可知,暂态过程时间和电容电压峰值都在一定范围内。

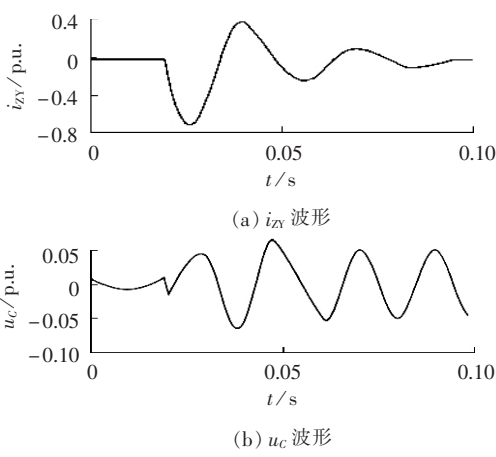


图 10 多级电路晶闸管断开后 i_{ZN} 和 u_C 波形
Fig.10 The waveforms of i_{ZN} and u_C after thyristor switch-off(multi-grade circuit)

3 晶闸管控制串联电容分级应用前景

以一条实际 500 kV 线路为背景,对其进行电容分级式可控串补接线方案设计。其中线路参数(p.u.值) $U_{n^*}=1.0, R^*=0.079\ 3, X_{L^*}=0.312\ 6$,装设前线路传输功率 $\bar{S}_{0^*}=0.9+j0.44$ 。串补度要求为:最大串补度

取 50%(即容抗等于线路电抗值的一半, $X_c=0.5X_L$),可控部分为 37.5%。

采用分级策略为:将电容分为三级, C_1 固定, C_2, C_3 可调,可调电感 L_T 采用变耦式可调电抗。其接线方案如图 11 所示。

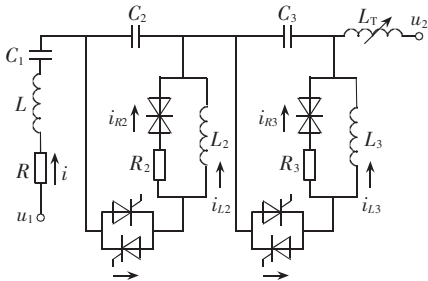


图 11 多级电路应用实例接线图

Fig.11 Example of multi-grade circuit wiring

实现的串补目标:电容全部投入时串补度为 50%; C_1 或 C_2 短接一组时串补度为 37.5%; C_1 和 C_2 全部短接时串补度为 25%。以线路电阻 R 和感抗 X_L 为基准,经过计算选取各元件参数如表 1 所示。

表 1 接线方案各元件参数

Tab.1 The component parameters for given example

元件名	参数值	元件名	参数值
X_{C1}	$0.255X_L$	X_{L2}	$0.02X_{C2}$
X_{C2}	$0.122\ 5X_L$	X_{L3}	$0.02X_{C3}$
X_{C3}	$0.122\ 5X_L$	X_{LT}	$0.125X_L$
R_2	$0.2R$	R_3	$0.2R$

从表中数据可以看出,采用电容分级式可控串补策略,实现上述串补目标,所用电容为 $X_c=0.5X_L$,可调电感为 $X_{LT}=(0\sim0.125)X_L$,且分级可达 20~40 级;若采用电容 C 串联变耦式可调电抗接线方式^[4],实现同样的串补目标,所需电容为 $X_c=0.5X_L$;可调电抗为 $X_{LT}=(0\sim0.375)X_L$,且分级只达 10~20 级,与之相比可调电感容量大大降低,级数成倍增加,还可以降低变耦电抗器二次侧晶闸管开关总体容量。初步估计,其总体节约的投资,足可大大超过本策略多用的电容器组的两套晶闸管开关造价。

同样,多级串联电容也可和 TCR 式可调容抗相配合,后者作为级间调节。因调节范围小,可显著降低其所需设备容量,且利用电容器短时过负荷能力,TCR 式可调电抗可短时实现超正常范围的较高容抗值,有利于提高系统稳定。

4 结论

- a. 当晶闸管开关短接电容时,在被短接电容电压 $u_c=0$ 时接入,晶闸管开关通态电流变化率小,暂态性能好。
- b. 电阻和阻尼电感的参数选取对装置元件容量和晶闸管开关接入时的暂态过程影响很大,为获

取较合适的综合效应,表1中所选用的阻尼电阻和阻尼电感值有一定参考价值。

c. 晶闸管控制分级电容和TCR式可调电抗或和变耦式可调电抗相配合,有利于降低可控串补综合造价。

d. 文中分析所得各暂态特性曲线符合物理解释。

参考文献:

- [1] 周孝信,郭剑波,胡学浩,等. 提高交流 500 kV 线路输电能力的实用化技术和措施[J]. 电网技术,2001,25(3): 1-6.
ZHOU Xiao-xin, GUO Jian-bo, HU Xue-hao, *et al.* Engineering technologies and measures for improving the transmitting capability of 500 kV transmission lines [J]. **Power System Technology**, 2001, 25(3): 1-6.
- [2] 顾晓荣,方勇杰,薛禹胜. 柔性交流输电系统稳定控制综述[J]. 电力系统自动化,1999,23(12):50-53.
GU Xiao-rong, FANG Yong-jie, XUE Yu-sheng. A survey on stability control in flexible AC transmission systems [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1999, 23(12):50-53.
- [3] 赵炳良,马维新,陈建业. 晶闸管控制的串联电容[J]. 电网技术,1995,19(5):65-69.
ZHAO Bing-liang, MA Wei-xin, CHEN Jian-ye. Series capacitor controlled by thyristor [J]. **Power System Technology**, 1995, 19(5):65-69.
- [4] 雷宪章. 串联补偿技术在远距离高电压交流输电系统中的应用[J]. 电网技术,1998,22(11):32-35.
LEI Xian-zhang. Series compensation technology application in HV & long distance lines systems [J]. **Power System Technology**, 1998, 22(11):32-35.
- [5] 李民族,朱国荣,刘晓东,等. 新型可控电抗潮流调节方法[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):56-59,65.
LI Min-zu, ZHU Guo-rong, LIU Xiao-dong, *et al.* A method

about power flow regulation with a novel controllable reactance[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2001, 21(4):56-59,65.

- [6] 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):49-54.
LI Min-zu, ZHU Guo-rong, LI Ying, *et al.* Characteristics, mechanism and application of thyristor controlled reactance series compensation by adjustable coupling [J]. **Power System Technology**, 2004, 28(10):49-54.
- [7] 林集明,郑健超,刘长悒,等. 伊冯可控串补主要器件基本工作条件及总体工作能力探讨[J]. 电网技术,1997,21(9):1-6.
LIN Ji-ming, ZHENG Jian-chao, LIU Chang-yi, *et al.* Capabilities and stresses on main components of Yi-Feng TCSC [J]. **Power System Technology**, 1997, 21(9):1-6.
- [8] 闫冬,赵建国,武守远. 考虑电抗器支路电阻影响时的 TCSC 稳定运行区域内的双解现象 [J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):67-72.
YAN Dong, ZHAO Jian-guo, WU Shou-yuan. Dual solutions phenomenon of TCSC in steady operation area considering resistance influence of reactor branch [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2004, 24(5):67-72.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

刘景远(1970-),男,辽宁朝阳人,讲师,硕士研究生,研究方向为电力电子技术在系统中的应用(E-mail:ljy20021976@126.com);

李民族(1943-),男,贵州贵阳人,副教授,长期从事电力电子技术在系统中应用的研究;

唐晓玲(1979-),女,贵州贵阳人,硕士研究生,研究方向为电力电子技术在系统中的应用;

王世蓉(1978-),女,贵州贵阳人,硕士研究生,研究方向为电力电子技术在系统中的应用。

Study on grade change characteristics of series capacitor controlled by thyristor

LIU Jing-yuan, LI Min-zu, TANG Xiao-ling, WANG Shi-rong
(Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: The transient process of graded series capacitor during grade change controlled by thyristor is studied. By programming simulation, the single-grade and multi-grade circuits are analyzed, and it is the best moment for thyristor to switch on when the voltage of capacitor to be shorted is zero. The influences of the damping resistance and reactance on transient process are researched, as well as the proper match of their parameters. The graded series capacitor in TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation) lowers the adjustable inductance capacity and the cost. Its application in high-voltage transmission lines may improve system stability.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China (50477056).

Key words: thyristor switch; graded series capacitor; TCSC; adjusting couple controllable reactance; transient analysis