

## 串联谐振式限流器的仿真研究

江道灼<sup>1</sup>, 毛航银<sup>1</sup>, 敖志香<sup>2</sup>, 吴兆麟<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州临安市供电局, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 串联谐振式限流器具有工作原理、拓扑结构简单等优点, 且对于高压系统, 其一次回路参数能够做到合理配置; 但在电网发生短路故障进入短路限流工况过程中, 其电容器及并联转换开关将工作在相当恶劣的条件下。应用 Matlab 软件对上述情况进行了建模仿真研究, 得出如下结论: ①闭合转换开关短接电容器使限流器从正常运行模式切换到短路限流模式过程中, 将在电容与转换开关之间产生电压(电流)的高频振荡, 且振荡电压(电流)的幅值与转换开关的动作速度成振荡增幅关系; ②当转换开关采用功率半导体器件构成时, 要求控制系统快速响应短路故障闭合转换开关, 否则极易因振荡过流(过压)而损坏; ③在限流器进入短路限流模式但继电保护尚未动作于断路器切断故障回路期间, 转换开关将承受全部短路电流以及振荡电流, 采用电力电子型转换开关时, 其功率半导体器件的容量必须按这种工况进行选择。

**关键词:** 电力系统; 短路; 串联谐振式限流器; 高频振荡

### Simulation study of series resonance type fault current limiter

JIANG Dao-zhuo<sup>1</sup>, MAO Hang-yin<sup>1</sup>, AO Zhi-xiang<sup>2</sup>, WU Zhao-lin<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;  
2. Linan Power Supply Bureau, Linan 311300, China)

**Abstract:** The series resonance type fault current limiter has the advantages of simple operating principle and topological structure, etc. The primary parameter of series resonance type fault current limiter for high-voltage system is reasonable. However, in the process of restraining fault current after a fault occurrence in electrical network, the capacitor and parallel inverter switch will confront poor working condition. This paper studies the above condition by simulation using the software Matlab. Proceeding from the study, we arrive at the conclusions: 1) in the process of closing the inverter switch short circuit capacitor to make the current limiter work in short circuit current limiting mode switching from normal operation mode, there is higher-order of voltage (current) oscillation between capacitor and parallel inverter switch, and the peak value of voltage (current) increases and oscillates with the growing of the speed for closing the inverter switch; 2) when the inverter switch is composed of semiconductor device, control system must respond to short circuit and close the inverter switch quickly, otherwise, the semiconductor device may be damaged by over current (voltage); 3) during fault current limiter working in current limiting mode to short circuit loop being shut off by relay protection device, the inverter switch will bear the full fault current and oscillation current. If using semiconductor device as inverter switch, the capacity of semiconductor device must be chosen according to the working condition.

**Key words:** power system; short circuit; series resonance type fault current limiter; higher-order of oscillation

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0153-06

## 0 引言

近年来随着我国电力建设的迅速发展, 电网结构和系统容量不断扩大, 许多地区特别是经济较发达地区的系统短路电流水平已经直逼甚至超过国家有关电力规程所规定的允许范围。如有资料计算表明, 三峡电站可能的最大短路电流周期分量高达 300 kA<sup>[1]</sup>, 一些大型发电厂出口或厂站高压变电站

出口的最大短路电流也高达 100~200 kA。目前国际上只能制造最大遮断电流 100 kA 的 GIS 断路器, 我国尚无此类断路器生产能力。可以采用分层、分区甚至解列运行, 或者串联普通电抗器等措施限制系统短路电流, 但这些常规限流措施一般都受系统网架结构、运行方式、安全稳定性等因素的制约, 限流效果有限, 且存在负面影响(如降低系统正常运行时的供电可靠性与运行灵活性、存在压降损耗

和操作过电压隐患等)。因此,研发新型限流技术与装置,确保电力系统正常运行时尽量减小或消除不利影响,发生短路故障时能够有效抑制系统短路容量(短路电流),从而减轻断路器等系统电气设备的负担,提高其工作可靠性和使用寿命,进而提高电力系统运行安全可靠,已成为当前电力系统及进一步发展中急需解决的迫切问题。

早在上世纪 70 年代,国际上就有人提出了“短路限流器”方案<sup>[2-3]</sup>;美国电力科学研究院 EPRI (Electric Power Research Institute) 曾在上世纪 90 年代初组织专家组对配电网的各种限流技术进行了专门的调研,认为应用电力电子技术发展固态限流器(Solid State Fault Current Limiter, SSFCL)是较现实的技术途径,并给出一种建议的基于 GTO 的固态限流器实现方案<sup>[4]</sup>。在 EPRI 调研报告的推动下,全球兴起了研究短路电流限流技术、特别是应用电力电子器件研发固态限流器的热潮,出现了串联谐振式(简称串谐式,下同)限流器<sup>[5]</sup>、带固定串补及可控串补功能的谐振式限流器<sup>[6-7]</sup>、以及其他类型的固态限流器<sup>[8-11]</sup>。这些故障限流器各有特点,本文仅对串谐式限流器及其在系统发生短路时的运行工况进行较为深入的仿真研究。

## 1 串谐式限流器

### 1.1 工作原理

已有不少文献研究讨论串谐式限流器方案<sup>[5-7,12]</sup>,图 1 给出了几种典型拓扑。

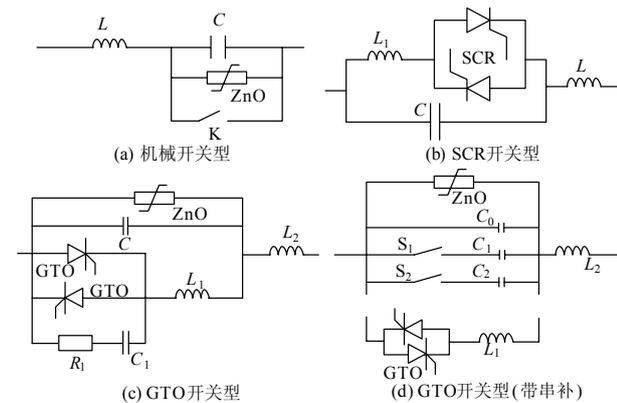


图 1 串谐式限流器

Fig.1 Series resonant fault current limiter

尽管串谐式限流器的拓扑结构不尽相同,但其工作原理相似。以图 1 (a) 为例,工作原理简介如下:正常运行时,开关 K 断开,选择合适的 L 与 C,使其发生串联谐振,限流器的等效阻抗接近于零;线路发生短路故障时,开关 K 导通使 C 短接, L 串

入线路限流故障电流(L 值决定故障限流水平)。

### 1.2 串谐式限流器适用范围

串谐式限流器在不同电压等级系统中应用时,其所需的电容量从而占用空间体积差别很大。表 1 给出了串谐式限流器应用在 35、110、220、500 kV 系统中,且要求稳态短路限流值分别为 10、20、30 kA 时,其所需的电容、电感值(忽略系统内感)。

由表 1 可以看出:限流要求不变时,串谐式限流器所需电容量与电压等级成反比关系(电感量成正比关系),亦即电压等级越低所需电容量越大(电感量越小);电压等级相同时,其所需电容量则与要求的短路限流值成正比关系(电感量成反比关系),亦即限流值越高所需电容量越大(电感量越小)。以限流要求值 20 kA 为例,串谐式限流器在 500 kV 系统中应用时  $C_{500} \approx 220.5 \mu\text{F}$ ,若在 35 kV 系统中则  $C_{35} \approx 3150.5 \mu\text{F}$ ,  $C_{35}/C_{500} \approx 14.3$  倍(若限流要求值增大到 30 kA,则  $C_{500} \approx 330.8 \mu\text{F}$ ,  $C_{35} \approx 4725.7 \mu\text{F}$ ,  $C_{35}/C_{500} \approx 14.3$  倍)。可见,串谐式限流器在低电压等级(如  $\leq 35 \text{ kV}$ )系统中应用时,需配置大量电容,势必造成参数配置及安装空间等方面的困难,因此不适用于低压(如  $\leq 35 \text{ kV}$ )系统。

表 1 不同电压与短路限流水平下串谐式 FCL 所需电感、电容量值

Tab.1 Series resonant FCL for electrical inductance and capacitance value under different voltage and short-circuit current limiting level

稳态短路电流限值		10 kA	20 kA	30 kA
35 kV	L / mH	6.4	3.2	2.1
	C / $\mu\text{F}$	1 575.2	3 150.5	4 725.7
110 kV	L / mH	20.2	10.1	6.7
	C / $\mu\text{F}$	501.2	1 002.4	1 503.6
220 kV	L / mH	40.4	20.2	13.5
	C / $\mu\text{F}$	250.6	501.2	751.8
500 kV	L / mH	91.9	46.0	30.6
	C / $\mu\text{F}$	110.3	220.5	330.8

### 1.3 串谐式限流器的参数配置

以 500 kV 系统为例,说明串谐式限流器的参数配置。假设系统等效内感  $L_s=10 \text{ mH}$ ,正常运行时的额定电流有效值  $I_N=500 \text{ A}$ ,发生短路故障时要求将稳态短路电流有效值限制在 20 kA 以内,则串谐式限流器的参数(每相)配置计算如下:

$$X_{\Sigma} = \omega L_{\Sigma} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 20} \approx 14.43 \Omega \quad (1)$$

$$L = \frac{X_{\Sigma}}{\omega} - L_s = \frac{14.43}{100\pi} \times 10^3 - 10 \approx 36 \text{ mH} \quad (2)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \omega L \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{10^5}{36\pi^2} \cong 282(\mu\text{F}) \quad (4)$$

若考虑正常运行时的过压、过流系数为  $K_U = K_I = 1.2$ , 此时电容  $C$  所承受的电压为:

$$U_C = K_U K_I I_{\text{SN}} X_C = \frac{1.2 \times 1.2 \times 0.5}{314 \times 282 \times 10^{-6}} = 8.13 \text{ kV} \quad (5)$$

从以上计算可知, 对于 500 kV 系统, 串谐式限流器的  $L$ 、 $C$  参数能够实现合理配置, 且不存在安装空间等方面的困难; 在系统正常运行并考虑 1.2 倍过压、过流系数情况下, 电容器(组)所承受的电压仅为 8.13 kV 左右, 约为系统额定相电压的 1/35。

## 2 仿真结果与分析

串谐式限流器具有电路拓扑与控制方式简单、正常情况下对系统基本没有影响、发生短路故障时限流效果良好等特点, 并已有很多文献进行了研究报导。本文将以 1.3 节给出的简化系统与串谐式限流器参数为例, 应用 Matlab 软件, 对系统发生短路故障、串谐式限流器启动限流过程中, 谐振电容  $C$  与转换开关  $K$  之间的电流(流过  $C$ 、 $K$  支路的电流  $i_c$ 、 $i_k$ ) 转移过程及  $C$  两端电压 ( $u_c$ ) 变化特性等进行建模仿真和分析研究。仿真电路如图 2 所示, 图中  $RL_s$  代表等效电源  $U_s$  内阻抗参数:  $R_s = 0.1 \Omega$ ,  $L_s = 10 \text{ mH}$ ;  $RL_c$  代表谐振电容  $C$  支路的杂散参数:  $R_c = 0.1 \text{ m}\Omega$ ,  $L_c = 1 \mu\text{H}$  (谐振电感  $L$  支路的杂散参数已归并到等效电源内阻抗参数中);  $RL_k$  代表转换开关  $K$  支路杂散参数:  $R_k = 0.1 \text{ m}\Omega$ ,  $L_k = 1 \mu\text{H}$ ;  $R_{\text{load}}$  为系统负载 (577.3  $\Omega$ , 纯电阻); 转换开关  $K$  从打开状态到闭合状态表示限流器从正常运行模式进入故障限流模式, 其闭合时间反映限流器响应故障速度。

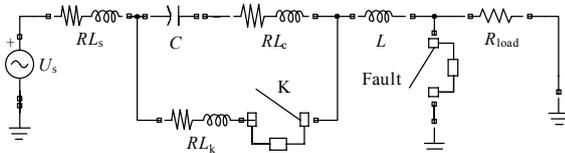


图 2 仿真电路图

Fig.2 Simulation circuit

### 2.1 电容与转换开关之间高频振荡及抑制

由文献[12]可知, 当转换开关  $K$  闭合短接电容  $C$ , 使串谐式限流器从正常运行模式切换到短路限流模式时, 由于闭合回路存在杂散电感, 将会在电容  $C$  与转换开关  $K$  之间产生高频振荡, 且振荡频率  $f$  为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_c + L_k)C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1+1) \times 282 \times 10^{-12}}} = 6705 \text{ Hz} \quad (6)$$

图 3 为假设在电源电压过峰值点时负载侧发生短路, 且故障后 2 ms 串谐限流器转换开关  $K$  闭合情况下,  $i_c$ 、 $i_k$  及  $u_c$  的仿真波形。由图可知,  $i_c$ 、 $i_k$  的最大峰值高达约 750 kA, 如此大的高频振荡电流对 SCR、GTO 等电力电子器件而言将是致命的;  $u_c$  最大峰值高达约 64 kV, 如此高的振荡电压将严重威胁甚至破坏电容器等器件的绝缘。

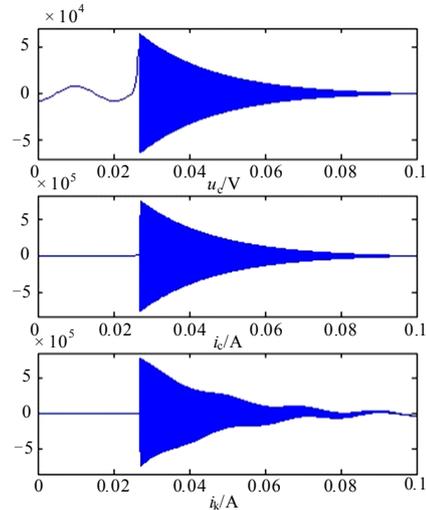


图 3 电流转移过程中的仿真波形

Fig.3 Simulation waveforms in current transfer process

可在电容支路中串入  $L_x$  来抑制上述高频振荡<sup>[12]</sup>,  $L_x$  的取值可通过仿真计算确定。

在电容支路中串入电感  $L_x$  后, 为使  $(L+L_x)$  与  $C$  满足工频串联谐振, 电容  $C$  需要按下式重新设计:

$$C = \frac{1}{\omega^2 (L + L_x)} \quad (7)$$

串入  $L_x$  后的高频振荡频率则为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_c + L_x + L_k)C}} \quad (8)$$

仍设在电源电压过峰值点时发生短路故障, 转换开关  $K$  在故障后 2 ms 闭合, 表 2 给出了电容支路串入不同  $L_x$  值时的仿真结果。可见串入  $L_x$  能够有效抑制高频振荡, 且随着  $L_x$  取值的增加,  $f$  降低,  $i_{\text{cm}}$  和  $i_{\text{km}}$  减小, 但  $u_{\text{cm}}$  增大。综合考虑各方面的因素(包括电感、电容成本等), 选择  $L_x = 1 \text{ mH}$ , 此时  $i_{\text{cm}} \approx 37.2 \text{ kA}$ ,  $i_{\text{km}} \approx 63.4 \text{ kA}$ ,  $u_{\text{cm}} \approx 71.2 \text{ kV}$  (约为系统额定运行时其所承受电压的 8.7 倍; 若转换开

关 K 闭合时间大于 2 ms, 它们将更大, 这将在下文详细讨论)。

表 2  $u_{cm}$ ,  $i_{cm}$ ,  $i_{km}$  与  $L_x$  的关系 (故障后 2 ms 转换开关 K 闭合)

Tab.2  $u_{cm}$ ,  $i_{cm}$  and  $i_{km}$  relationship with  $L_x$  (the K closed when fault occurred after 2 ms)

$L_x/\text{mH}$	$C/\mu\text{F}$	$f/\text{Hz}$	$I_{cm}/\text{kA}$	$U_{cm}/\text{kV}$	$I_{km}/\text{kA}$
0.0	282	6705	752.5	63.8	772.0
0.5	278	426	50.2	67.5	77.7
1.0	274	304	37.2	71.2	63.4
2.0	267	218	28.2	77.5	57.5
4.0	254	158	22.2	88.5	50.6

图 4 为 C 支路串入  $L_x=1\text{ mH}$  情况下 (故障时刻及故障后 K 延迟闭合时间同前), C、K 回路电流转移过程的仿真波形。

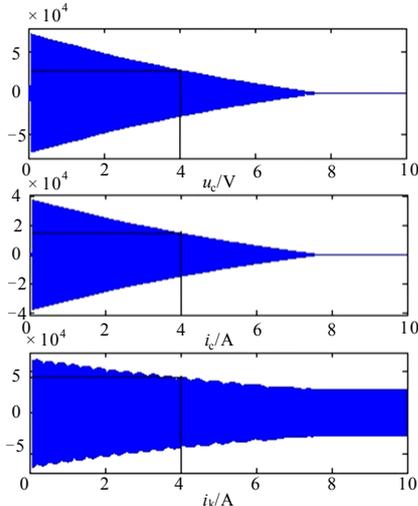


图 4 电流转移过程中的仿真波形 ( $L_x=1\text{ mH}$ )

Fig.4 Simulation waveforms of  $U_C$ ,  $I_C$ ,  $I_K$  in transfer process ( $L_x=1\text{mH}$ )

结合表 2 和图 4 可以看出, 与不串  $L_x$  相比, K 闭合后的高频振荡频率和幅值均得到了很好的抑制, 但减缓了振荡衰减过程: K 闭合约 4 s 后,  $u_{cm}$  ( $i_{cm}$ ) 才从 71.2 kV (37.2 kA) 衰减到 27.5 kV (14.4 kA)。这是因为在电容支路中串入电感  $L_x$  (同时 C 有所减小) 后, 导致 C、K 构成回路间的临界阻尼电阻  $R_{cr}$  增大 [ $=2(L_{cr}/C)^{0.5}=3.82\ \Omega$ ,  $L_{cr}=L_x+L_c+L_k$ ; 无  $L_x$  前  $R_{cr}\approx 0.168\ \Omega$ ], 从而导致回路中杂散电阻 ( $R_c+R_k=0.2\ \text{m}\Omega$ ) 与  $R_{cr}$  的比值大为减小, 即欠阻尼更加厉害所致。这意味着在限流器进入限流工况后的较长一段时间内, 始终有很大的振荡电压、电流在电容器 C 与转换开关 K 之间流动, 导致它们工

作条件恶化, 并增加了设计难度。

若要加速上述高频振荡衰减过程, 且不影响系统正常运行, 可在转换开关 K 支路中串入适当的阻尼电阻 R。图 5 为 R 分别等于  $0.4\ \Omega$  ( $\approx 1/10$  临界阻尼电阻) 和  $0.1\ \Omega$  时, 电容 C 两端电压 ( $u_c$ )、电流 ( $i_c$ ) 和阻尼电阻中电流 ( $i_R$ ) 的仿真波形。可见当  $R=0.4\ \Omega$  时, 电容与转换开关回路中的高频振荡得到了很好的抑制, 但在短路期间, 阻尼电阻将承受高达约 160 MW ( $=I^2R$ ,  $I=20\ \text{kA}$ ) 的巨大功耗。当  $R=0.1\ \Omega$  时, 阻尼高频振荡的效果差了很多, 且其所承受的功耗仍高达近 40 MW。可见若采用串入阻尼电阻加速高频振荡衰减时, 对阻尼电阻的承载容量应有充分的估算。

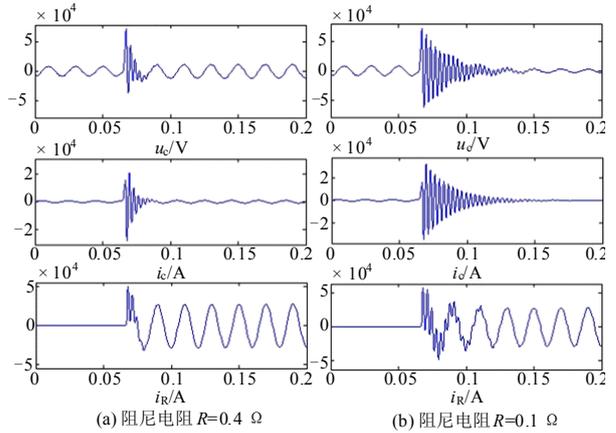


图 5 串入阻尼电阻后的仿真结果

Fig.5 Simulation results after damping resistor in series

## 2.2 转换开关响应速度对限流器工况的影响

图 6 给出了串谐式限流器 (C 支路串入  $L_x=1\text{ mH}$ ) 在投入故障限流过程中, 其转换开关 K 的响应速度 (故障后延迟闭合时间  $t$ ) 对  $i_{cm}$ 、 $i_{km}$  及  $u_{cm}$  影响的仿真结果, 仿真时假设分别在电源电压正过零点 ( $0^\circ$ )、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  (峰值点) 时发生短路。由图可知: ①  $i_{cm}$  ( $i_{km}$ ) 与  $t$  成振荡增幅关系,  $u_{cm}$  则与  $t$  成阶梯上升关系, 这种变化规律与故障发生时刻无关; ②  $t$  一定时, 故障发生时刻影响  $i_{cm}$  ( $i_{km}$ )、 $u_{cm}$  的大小与变化趋势; ③ 随着  $t$  的增大,  $i_{cm}$  ( $i_{km}$ )、 $u_{cm}$  上升速度加快。

因此, 为改善串谐式限流器从正常运行模式转换到故障限流模式过程中的工况, 应尽量提高其转换开关 K 的动作速度, 从而在线路发生短路故障后能快速闭合短接电容器 C, 以有效降低  $i_{cm}$  ( $I_{km}$ )、 $U_{cm}$ 。

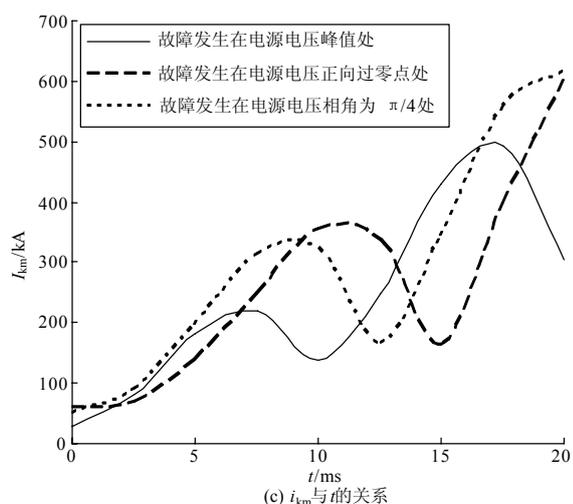
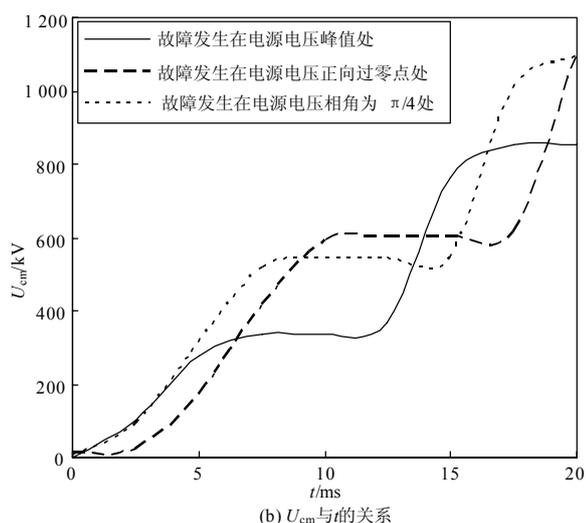
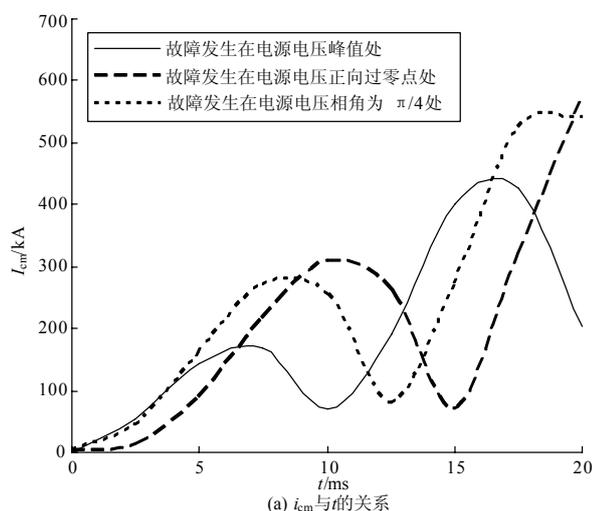
图6  $i_{cm}$ 、 $u_{cm}$ 、 $i_{km}$  与  $K$  闭合时间  $t$  的关系

Fig.6 The waveforms of  $i_{cm}$ ,  $u_{cm}$  and  $i_{km}$  relation with the  $K$ 's switch time of closed

假设串谐式限流器采用快速机械转换开关且其速度可达  $2.3 \text{ ms}^{[13]}$ , 故障检测时间为  $5 \text{ ms}$  (一般需  $4\sim 8 \text{ ms}^{[14]}$ ), 则  $t=7.3 \text{ ms}$ , 转换过程中  $u_{cm}$ 、 $i_{cm}$  ( $i_{km}$ ) 将分别高达约  $509 \text{ kV}$ 、 $265 \text{ kA}$  ( $304 \text{ kA}$ )。若没有可靠保护措施, 如此高的转换电压、电流峰值, 必将损坏电容器等设备。若采用由 SCR 或 GTO 构成的固态转换开关, 则可在微秒级内实现闭合, 但仍须故障检测时间, 因此  $t=5 \text{ ms}$ , 转换过程中的  $u_{cm}$ 、 $i_{cm}$  ( $i_{km}$ ) 仍将分别高达约  $313 \text{ kV}$ 、 $163 \text{ kA}$  ( $196 \text{ kA}$ ), 这意味着固态转换开关要用多个 SCR 或 GTO 串、并联构成, 需要解决均压、均流及限制电压、电路上升率等一系列技术问题和安全保护措施。

### 3 结论

串谐式限流器具有原理、拓扑结构简单, 正常运行模式下功耗接近于零、不影响系统运行、能实现串补功能, 故障限流模式下能够实现有效限流、便于与继电保护配合等优点。本文对串谐式限流器从正常运行模式向故障限流模式过渡过程中的转移电流等进行了仿真研究, 得出以下几点结论, 这些结论在实际应用中应引起注意。

1) 串谐式限流器从正常运行模式切换到故障限流模式过程中, 其谐振电容  $C$  与转换开关  $K$  之间会产生高频振荡转移电流, 并在  $C$  两端引起振荡过电压, 且振荡电流幅值与转换开关的闭合时间成振荡增幅关系、振荡电压幅值随着转换开关闭合时间的延迟成阶梯上升关系。

2) 在谐振电容  $C$  支路中串入适当的电感  $L_x$  可有效降低上述高频振荡的频率和幅值, 但会抬高振荡回路中的临界阻尼电阻值, 从而延长振荡衰减时间。

3) 可在转换开关  $K$  支路中串入适当阻尼电阻 (如临界阻尼电阻的  $1/10$ ) 加速振荡衰减过程, 但在短路限流期间阻尼电阻将要流过全部短路电流, 因此其功耗极大, 选择时应充分考虑承载容量。

4) 串谐式限流器应采用高速转换开关, 确保线路发生短路时能够以最快的速度短接电容器、进入故障限流模式, 否则其电容器及转换开关将工作在极其恶劣的条件下。

5) 在短路限流期间 (断路器未跳闸切断故障回路之前) 串谐式限流器的转换开关将承受全部系统短路电流与电容高频振荡电流, 当其采用功率半导体器件构成时, 应充分考虑能够承受这种运行工况。

### 参考文献

[1] 杨杰, 陈希英, 邵健雄. 三峡水电站短路电流水平及

限制措施分析[J]. 电网技术, 1997, 21 (7) : 17-20.  
 YANG Jie, CHEN Xi-ying, SHAO Jian-xiong. Analysis of short circuit current level of three gorges hydroelectric power plant and limiting measures[J]. Power System Technology, 1997, 21 (7) : 17-20.

[2] Falcome C A, Bechler J E, Mekolites W E, et al. Current limiting device—a utility’ s need[C]. //IEEE Power Engineering Society Summer Meeting and EHV/UHV Conference. Vancouver, British Columbia, Canada: 1973: 1768-1775.

[3] Slade P G, Wu J L, Stacey E J, et al. The utility requirements for a distribution fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7 (2) : 507-515.

[4] Smith R K, Slade P G, Sarkozi M, et al. Solid-state distribution current limiter and circuit breaker application requirements and control strategies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (3) : 1155-1164.

[5] King E F, Chikhani A Y, Hackam R, et al. A microprocessor-controlled variable impedance adaptive fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 15 (4) : 1830-1837.

[6] 曾琦, 李兴源, 蔡鑫贵, 等. 带串联补偿故障限流器的仿真和实验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (14) : 54-56.  
 ZENG Qi, LI Xing-yuan, CAI Xin-gui, et al. Simulation and test of fault current limiter with series compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (14) : 54-56.

[7] 袁清访, 李兴源. 具有可控串联补偿的新型故障限流器的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19 (1) : 40-43.  
 YUAN Qing-fang, LI Xing-yuan. Study of a new fault current limiter with controllable series compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19 (1) : 40-43.

[8] Karady G G. Principles of fault current limitation by a resonant LC circuit[J]. IEEE Proceedings-C, 1992, 139 (1) : 1-6.

[9] 陈刚, 江道灼, 吕征宇, 等. 一种新型固态短路限流器拓扑及其控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (3) : 32-36.  
 CHEN Gang, JIANG Dao-zhuo, Lü Zheng-yu, et al. A novel topology of solid state fault current limiter and its control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (3) : 32-36.

[10] 张鹏飞, 江道灼, 刘华蕾. 带旁路限流电感的新型固态限流器试验研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 67-71.  
 ZHANG Peng-fei, JIANG Dao-zhuo, LIU Hua-lei. Experimental study on the solid fault current limiter with bypass inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (4) : 67-71.

[11] 叶莺, 肖立业. 超导故障限流器的应用研究新进展[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (13) : 92-96.  
 YE Ying, XIAO Li-ye. New development of high temperature superconducting fault current limiter system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (13) : 92-96.

[12] 姿杰, 李庆民, 肖茂友, 等. 基于快速开关的串联谐振型故障限流器的仿真[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 80-83.  
 LOU Jie, LI Qing-min, XIAO Mao-you, et al. Simulation of an series resonant type FCL based on fast transfer switch[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (5) : 80-83.

[13] 李庆民, 刘卫东, 徐国政, 等. 高压快速转换开关的研制[J]. 高压电器, 2003, 39 (6) : 6-7.  
 LI Qing-min, LIU Wei-dong, XU Guo-zheng, et al. Research on high voltage fast transfer switch[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39 (6) : 6-7.

[14] Sugimoto S, et al. A study of a ultra high speed protevtive relay scheme for a currnet limiter with series compensation[C]. //1994 National Convention Record. IEE of Japan. Japan: 1994.

收稿日期: 2009-12-02; 修回日期: 2009-12-29

作者简介:

江道灼 (1960-), 男, 教授, 主要研究方向是交直流电力系统运行与控制技术、电力电子及柔性交流输电应用技术、电力系统现场智能测控技术及配电网自动化技术等;  
 E-mail: dzjiang@zju.edu.cn

毛航银 (1985-), 男, 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、数字控制技术。