

# 带辅助控制的TCR型SVC控制策略研究

常凤筠<sup>1</sup>,景炜<sup>1</sup>,俞海<sup>2</sup>,陈佳永<sup>2</sup>

(1. 辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114044; 2. 辽宁  
荣信兴业电力技术有限公司 研发部, 辽宁 鞍山 114000)

**摘要:** 针对TCR型SVC稳态运行时为了维持电压稳定需要不断调整输出而造成损耗较多的问题,在基本电压控制策略中加入了电压死区辅助控制:在电压允许误差范围内锁定SVC,在范围外则释放SVC调节电压至范围内。在此基础上,为了能更有效地利用SVC有限的额定容量,对应设计了可根据电压大小而变化的电压参考值,确保SVC输出一直处于可调节范围内且可具有较多的无功储备。针对当系统中含有2次谐波电压分量时会导致TCR电流中产生大量的直流分量问题,加入了TCR平衡辅助控制:通过将快速傅里叶变换和PI调节相结合调制触发角使反并联的晶闸管达到在正方向和负方向的导通时间不相同,将直流电流分量减小到零,保证装置的安全运行。仿真结果表明上述辅助控制具有可行性和有效性。

**关键词:** 基本电压控制策略;辅助控制策略;电压死区;可变电电压参考值;2次谐波电压;直流电流分量;TCR平衡控制

中图分类号:TM743 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqed21618

## Research on TCR Type SVC Control Strategy with Auxiliary Control

CHANG Fengjun<sup>1</sup>, JING Wei<sup>1</sup>, YU Hai<sup>2</sup>, CHEN Jiayong<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114044, Liaoning, China; 2. Research and Development Department, Liaoning Rongxin Xingye Electric Power Technology Co., Ltd., Anshan 114000, Liaoning, China)

**Abstract:** To solve the problem of high loss caused by constant adjustment of output in order to maintain the stability of the voltage during the steady-state operation of the thyristor controlled reactor (TCR) type static var compensator (SVC), the voltage dead zone auxiliary control was added to the basic voltage control strategy. That is, when the voltage was within the allowable error range, the SVC was locked, and outside the range, the SVC was released to adjust the voltage to the range. On this basis, in order to make more effective use of the limited rated capacity of SVC, a voltage reference value that could be changed according to the voltage was correspondingly designed to ensure that the SVC output was always within the adjustable range and could have major reactive power reserves. Aiming at the problem that a large number of DC components would be generated in the TCR current when the system contains second harmonic voltage components, the TCR balance auxiliary control was added. That is, by combining the fast Fourier transform and PI adjustment to modulate the firing angle, the anti-parallel thyristors could achieve different conduction times in the positive and negative directions, and the DC current component could be reduced to zero to ensure safe operation of the device. The simulation results show that the above auxiliary control is feasible and effective.

**Key words:** basic voltage control strategy; auxiliary control strategy; voltage deadband; variable voltage reference value; second harmonic voltage; DC current components; thyristor controlled reactor (TCR) balance control

静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)作为一种柔性交流输电设备<sup>[1-2]</sup>由于其在动态电压支撑与无功补偿方面的突出特性,在电力

系统自投入运行以来已得到了广泛的使用。而其中晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)型SVC因具有响应速度快、可连续平滑

基金项目:南方电网科技项目资助(RXSVC14090201)

作者简介:常凤筠(1964—),女,硕士,副教授,Email:cc.cjf@163.com

调节无功功率、谐波含量少、成本较低等优点而应用最广。

TCR型SVC既能提供动态电压支撑<sup>[3-5]</sup>控制母线电压,又能分相控制补偿系统不平衡负荷<sup>[6-9]</sup>。目前应用TCR型SVC补偿母线电压时,基本的电压控制策略是通过快速连续调节输出维持母线电压稳定、抑制电压波动使母线电压趋向目标电压值。本文在此基本电压控制策略中加入了电压死区的辅助控制<sup>[10-11]</sup>策略:在设定的母线电压允许误差范围内SVC输出被锁定,即不需要频繁地调节抑制母线电压的小波动,在范围外时则释放SVC快速调节母线电压至范围内;同时为了配合电压死区控制,还设计了可根据母线电压大小而变化的可变电压参考值,让SVC的输出容量一直处于可调节的范围内且具备较多的无功储备。这样既能发挥TCR型SVC快速调节电压的优点,又能减少SVC在稳态时的运行损耗,还能更有效地利用SVC有限的额定容量。

当系统电压含有2次谐波分量时,TCR的正负半波导通电流面积会不相等,导致电流中产生大量的直流电流分量影响装置的正常运行<sup>[12]</sup>。针对此问题,本文在基本控制电压策略中还加入了一种采用快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)与PI调节相结合的TCR平衡控制(TCR balance control, TCRBC)的辅助控制策略:通过调制触发角使TCR反并联的晶闸管达到在正方向和负方向的导通时间不相同,将直流电流分量减小到零,从而抑制系统2次谐波电压对TCR的影响,保障装置的安全运行。

## 1 TCR型SVC结构

TCR型SVC的结构图如图1所示,一般由一组晶闸管控制电抗器TCR和 $n$ 组固定电容器(fixed capacitor, FC)组成,通过降压变压器与母线相连接。

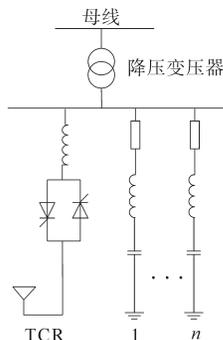


图1 TCR型SVC结构图

Fig.1 Structure diagram of the TCR type SVC

基本的单相TCR由双向反并联的一对晶闸管与一个线性空心电抗器相串联构成,反并联的两个晶闸管分别在电压的正半周和负半周导通。晶闸管的触发角 $\alpha$ 的理论可控范围是 $90^\circ \sim 180^\circ$ ,但是为了避免触发失败而损坏设备<sup>[13]</sup>,一般会施加范围限制(本文范围为 $100^\circ \sim 170^\circ$ )。因为TCR的等效电纳 $B_{TCR}$ 与触发角 $\alpha$ 存在如下关系:

$$B_{TCR}(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{X_L \pi} \quad (1)$$

式中: $X_L$ 为电抗器的感抗。

所以TCR的控制原理是通过控制触发角 $\alpha$ 改变TCR等效电纳的大小,从而达到调节无功功率输出的目的。

由于TCR的固有特性决定了其只能补偿感性无功功率且运行时会产生大量的特征谐波,所以通常TCR需要与固定电容器FC并联使用,在滤除TCR产生的特征谐波的同时提供容性无功功率,使得TCR型SVC具备从感性到容性范围的无功功率调节能力。

## 2 TCR型SVC控制策略

### 2.1 基本电压控制原理

TCR型SVC采用电压闭环控制,主要作用是:处理被测系统变量,并产生与所需补偿无功功率成比例的输出信号,调整SVC无功输出实现对目标母线电压的控制。

电压控制的被控量为220 kV母线三相电压平均值 $U_{meas\_average}$ (标幺值,以下使用 $U_{meas}$ 表示)。本文的TCR型SVC电压控制原理如图2所示,通过测量电路得到目标电压 $U_{meas}$ 与补偿器电流 $I_{svc}$ 后,根据下式求出电压误差 $U_{err}$ :

$$U_{err} = U_{ref} - U_{meas} - I_{svc} K_{sl} \quad (2)$$

式中: $U_{ref}$ 为设定的电压参考值; $K_{sl}$ 为电流调差率。然后将 $U_{err}$ 输入PI调节器输出一个电纳基准信号 $B_{ref}$ ,再通过线性化环节得到触发角 $\alpha$ 后再由触发控制形成脉冲信号控制补偿器动作。

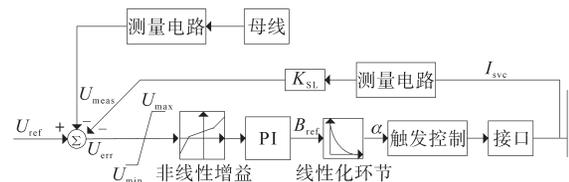


图2 电压控制原理图

Fig.2 The schematic of the voltage control

图2中, $U_{max}$ , $U_{min}$ 分别为电压死区的上限、下限值;加入的非线性增益环节是通过处于不同

范围的电压误差信号  $U_{err}$  提供不同增益系数实现对闭环电压控制稳定性的管理,以提高在电压发生大的扰动时SVC的响应速度<sup>[14]</sup>。

### 2.2 辅助控制策略

当母线电压等级越高,其抗干扰能力越强<sup>[15]</sup>,而且根据国家电能质量标准 GB/T 12325—2008,220 kV 母线电压允许偏差范围为标称电压的-10%~7%,所以本文以此为依据且结合实际项目要求设计具有可变电压参考值的电压死区辅助控制策略。

#### 2.2.1 电压死区控制

电压死区控制原理如图3所示,其允许的母线电压偏差范围是  $\pm 0.03$  (标么值):如果目标电压  $U_{meas}$  在 0.97 (标么值)~1.03 (标么值)之间且超过延时时间 20 s,则电压控制输出被偏置,SVC被锁定;如果  $U_{meas} < 0.97$  或者  $U_{meas} > 1.03$  且超过延时时间 15 s 则释放SVC,调节 220 kV 母线电压趋向目标电压值  $U_{ref}$ 。但是因为 15 s 和 20 s 的时间太长,所以分别使用 100 ms 和 300 ms 进行仿真实验。



图3 电压死区控制原理图

Fig.3 Schematic diagram of voltage deadband control

#### 2.2.2 可变电压参考值

在电压死区控制中,SVC只需要调节母线电压运行在允许的电压范围内,又考虑到SVC的额定容量有限,即能调节的电压范围有限,所以为了配合电压死区控制和保证SVC输出容量一直处于可调节的范围内且能具备较多的无功储备,设计了可根据母线电压的大小而改变的电压参考值策略,以便更有效地利用SVC有限的额定容量。

根据母线电压大小而变化的可变电压参考值  $U_{ref}$  的原理如图4所示。 $U_{ref}$  的初始值设定  $U_{set}$  为 0.971 (标么值);如果 220 kV 母线电压  $U_{meas} \leq 0.97$  (标么值)且超过延时时间 10 s 则自动



图4 电压参考值变化原理图

Fig.4 Schematic diagram of voltage reference value change

设定  $U_{ref}$  为 0.971 (标么值);如果  $U_{meas} > 1.03$  (标么值)且超过延时时间 10 s 则自动设定  $U_{ref}$  为 1.029 (标么值)。但是因为 10 s 的时间太长,所以使用 100 ms 进行仿真实验。

## 3 TCR 平衡辅助控制

### 3.1 二次谐波

在故障清除、电抗器或变压器投切、过高的电压下运行、TCR装置锁相不精确或者控制系统有噪声等情况下,系统电压中会产生大量的2次谐波分量,从而引起电压的畸变。TCR的电流因为是TCR在导通期间其两端电压的积分,所以对供电电压的畸变非常敏感。当系统电压含有2次谐波时,TCR的正负半波导通电流面积会不相等,导致大量的直流电流分量产生。在这种情况下,2次谐波的不稳定<sup>[16-17]</sup>是SVC运行面临的主要问题,而且对变压器的安全运行及电力系统的可靠性会产生较大的负面影响。

### 3.2 TCR平衡控制

TCR平衡控制的工作原理是当检测到TCR电流中含有直流电流分量时,通过调制触发角使反并联的晶闸管达到在正方向和负方向的导通时间不相同,从而将直流电流分量减小到零。TCRBC的关键问题是求取TCR电流中的直流分量,文献[12]、文献[18]提出的方法是先对TCR电流的瞬时值在每半个周期内求解积分值,然后将两个半周期的积分值相加则能计算出一个周期的直流电流分量值。虽然通过积分的方法可以计算出电流中的直流分量,但是无法同时得到电流中的2次谐波分量。所以本文运用电力系统谐波检测<sup>[19-20]</sup>中应用最广泛的快速傅里叶变换FFT算法得到TCR电流中的2次谐波和直流电流分量。

TCRBC的控制原理如图5所示。首先TCR相电流  $I_{ter}$  经过FFT环节得到其中的2次谐波分量  $I_2$  和直流电流分量  $I_{dc}$ ,  $I_{dc}$  与电流参考值  $I_{dref}$  (为0) 相减得到误差量  $I_{err}$ ,再经过PI环节得到调制角参

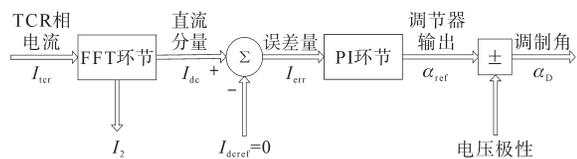


图5 TCR平衡控制原理图

Fig.5 The schematic of the TCR balance control

考值 $\alpha_{ref}$ ,然后结合TCR的电压极性得到调制角 $\alpha_D$ ,最后与电压控制输出的触发角相加得到触发角终值。同时为了避免与SVC电压控制的快速调节相冲突,TCRBC相较于电压控制具有较大的时间常数。

## 4 系统仿真

本文在PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件中根据云南省曲靖市的多乐变电站220 kV高压输电线路的部分参数搭建的系统仿真模型示意图如图6所示,LOAD<sub>1</sub>为系统原有负载;LOAD<sub>2</sub>和LOAD<sub>3</sub>分别为用于测试SVC电压控制策略的感性和容性负载;3者均为三相对称负载。

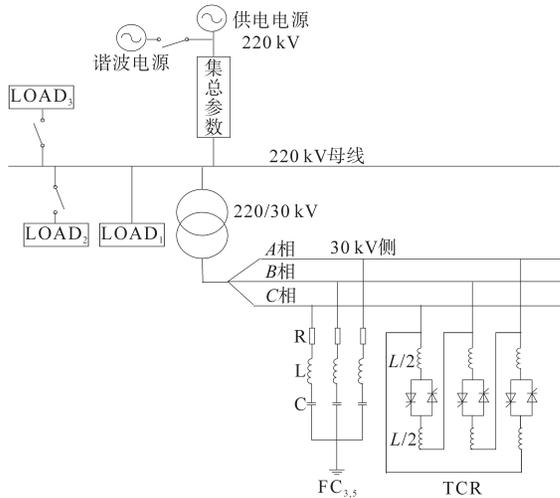


图6 系统模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of the system model

系统参数为:供电电源220 kV,系统阻抗集总参数值为 $R=0.165 \Omega$ , $L=0.02625 \text{ H}$ , $C=1e100 \mu\text{F}$ ;谐波电源输出幅值和相位可调的2次谐波电压。SVC耦合变压器容量为 $150 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ,变比为220/30 kV,阻抗电压 $U_k=12\%$ 。SVC由一组三角形接线的TCR和2组星形接线的FC组成,其中TCR额定容量是220 Mvar,3次、5次滤波电容器组的额定容量均为60 Mvar。

### 4.1 电压控制策略仿真

#### 4.1.1 加入电压死区辅助控制

系统仿真设定为6 s,0 s仿真开始,1 s时TCR和FC<sub>3</sub>投入,1.5 s时FC<sub>5</sub>投入;2 s时电压死区控制启动;2.5 s时投入LOAD<sub>2</sub>,3.5 s时切除LOAD<sub>2</sub>;4 s时投入LOAD<sub>3</sub>,5 s时切除LOAD<sub>3</sub>;6 s时仿真结束。仿真结果的波形如图7所示。由图7可知,2.0 s时电压死区控制启动,电压参考值 $U_{ref}$ 改变为0.971(标么值),同时SVC控制信号hold置1,

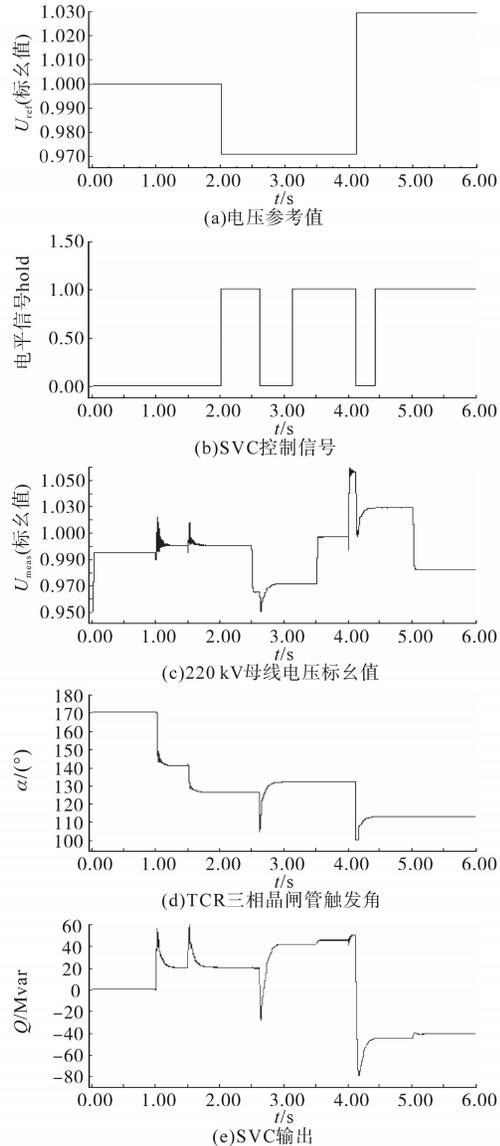


图7 有电压死区控制仿真波形图

Fig.7 Simulation waveform diagrams with voltage deadband control

SVC输出被锁定(在2.0 s之前SVC投入和调节的过程中因为220 kV母线电压 $U_{meas}$ 的波动始终在 $\pm 0.03$ (标么值)范围内且满足大于延时0.3 s的条件,所以hold信号已经置1,但是因为死区控制未启动,所以hold信号保持为0)。2.5 s时感性负载LOAD<sub>2</sub>投入, $U_{meas}$ 瞬时下降至0.965(标么值),而此时SVC处于锁定状态无法调节电压;因为0.965(标么值)小于阈值0.97(标么值),所以计时开始,2.6 s时满足延时0.1 s的条件后信号hold置0即释放SVC,随即TCR快速改变触发角至 $132^\circ$ 调整SVC输出至容性无功功率41.5 Mvar,将 $U_{meas}$ 控制在目标值0.971(标么值)。3.1 s时满足在死区范围内和延时0.3 s的条件后信号hold重新置1再次锁定SVC。3.5 s时LOAD<sub>2</sub>切除, $U_{meas}$ 瞬时上

升至1.006(标么值)。在LOAD<sub>2</sub>切除过程中 $U_{meas}$ 的变化始终在死区范围内,信号hold保持为1即持续锁定SVC,所以LOAD<sub>2</sub>切除后 $U_{meas}$ 保持为1.006(标么值)。SVC的输出对电压的变化很敏感,即使SVC处于锁定状态,也会因为母线电压的变化而变化,所以在LOAD<sub>2</sub>切除后由于母线电压的升高SVC输出的容性无功功率从41.5 Mvar增加至44.7 Mvar。

4 s时容性负载LOAD<sub>3</sub>投入, $U_{meas}$ 瞬时升高至1.059(标么值),而此时SVC处于锁定状态无法调节电压;因为1.059(标么值)大于阈值1.03(标么值),所以计时开始,在4.1 s时满足延时0.1 s的条件后, $U_{ref}$ 改变为1.029(标么值)同时信号hold置0释放SVC,随即TCR快速改变触发角至113°,调整SVC输出至感性无功功率45.5 Mvar,将 $U_{meas}$ 控制在1.029(标么值)。在4.4 s时满足在死区范围内和延时0.3 s的条件后信号hold置1重新锁定SVC。在5 s时LOAD<sub>3</sub>切除, $U_{meas}$ 瞬时下降至0.982(标么值)。在LOAD<sub>3</sub>切除过程中 $U_{meas}$ 的变化始终在死区范围内,信号hold保持为1即持续锁定SVC,所以LOAD<sub>3</sub>切除后 $U_{meas}$ 保持为0.982(标么值)。虽然此时SVC处于锁定状态,但是因为母线电压的变化导致SVC输出的感性无功功率从45.5 Mvar减少至41.4 Mvar。

图7的仿真结果表明加入的电压死区控制策略有效,可以在发挥TCR型SVC快速调节电压优点的同时减少SVC稳态时的运行损耗。

#### 4.1.2 未加入电压死区辅助控制

系统仿真设定同4.1.1小节,仿真结果的波形如图8所示。由图8可知,2.5 s时LOAD<sub>2</sub>投入, $U_{meas}$ 瞬时下降至0.972(标么值),TCR调节三相晶闸管触发角至170°即释放SVC所有的120 Mvar容性无功功率,但还是不能满足负载需求,只能抬升 $U_{meas}$ 至0.99(标么值),即不能实现控制 $U_{meas}$ 至目标电压1.0(标么值)。3.5 s时LOAD<sub>2</sub>切除,TCR快速调节触发恢复至126°,调整SVC输出恢复至容性无功功率20 Mvar,将 $U_{meas}$ 重新控制在1.0(标么值)。4 s时LOAD<sub>3</sub>投入, $U_{meas}$ 瞬时上升至1.047(标么值),TCR调节三相晶闸管触发角至100°,即释放SVC所有的220 Mvar感性无功功率,但还是不能满足负载需求,只能控制 $U_{meas}$ 至1.01(标么值)即不能实现控制 $U_{meas}$ 至目标电压1.0(标么值)。5 s时LOAD<sub>3</sub>切除,TCR快速调节触发角恢复至126°,调整SVC输出恢复

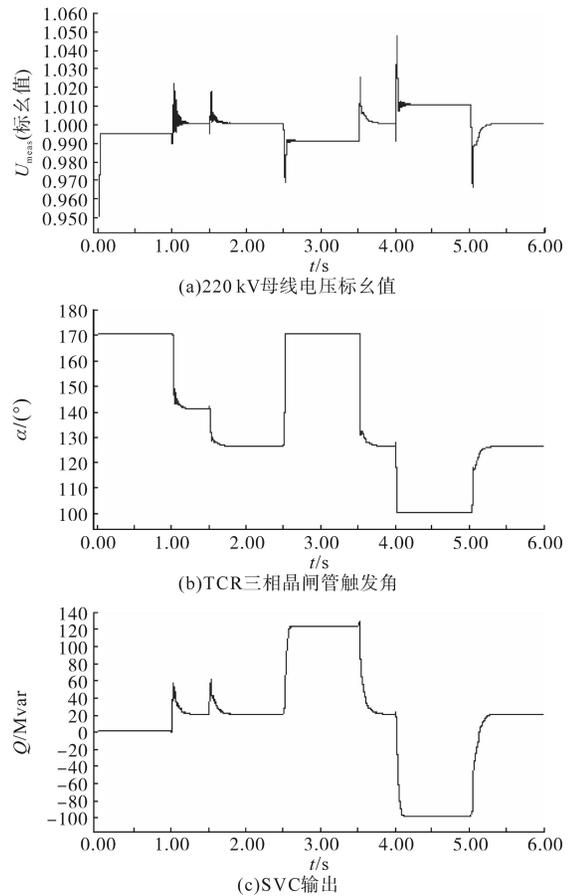


图8 无电压死区控制仿真波形图

Fig.8 Simulation waveform diagrams without voltage deadband control

至容性无功功率20 Mvar,将 $U_{meas}$ 重新控制在1.0(标么值)。

由图7和图8可知,在相同的感性和容性大负载投切情况下,通过在基本电压控制策略中加入具有可变电压参考值的电压死区辅助控制策略,可以在保证调节母线电压至目标电压值的同时使得SVC的输出一直处于可调节范围内且相对较少即可具备较多的无功储备。

#### 4.2 TCR平衡控制仿真

系统仿真设置:TCR的角度固定在120°,1 s时谐波电源输出幅值为基波线电压的30%且与基波线电压同相位的2次谐波电压叠加在一次侧基波上。以TCR的AB相为例。

图9为2次谐波电压加入前后的A相与B相之间的电压 $U_{AB}$ 波形图。

图10为无TCRBC情况下的相电流 $i_{AB}$ 、直流电流分量 $i_{dc}$ 和2次谐波幅值 $i_2$ 的波形图。

由图9和图10可知,在无TCRBC即等间隔触发的情况下,当系统基波电压中含有基波线电压

幅值30%且与基波线电压同相位的2次谐波分量时,TCR相电压的幅值和波形会出现明显的畸变,导致TCR相电流波形出现正半波面积小于负半波面积的不对称畸变,产生了一个大小为631.2 A的负的直流电流分量和一个幅值为596.64 A的2次谐波电流分量。

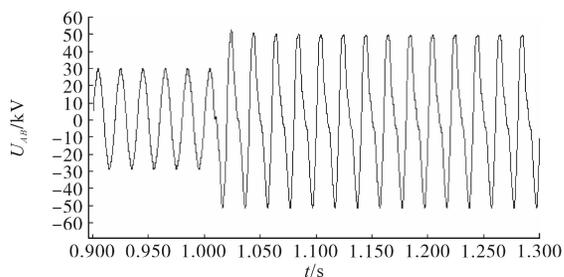
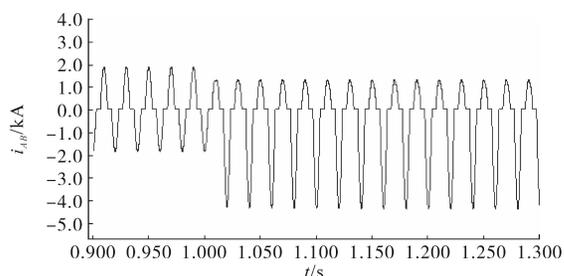
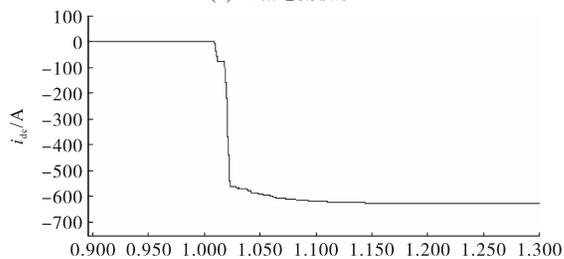


图9 2次谐波加入前后AB相电压波形图

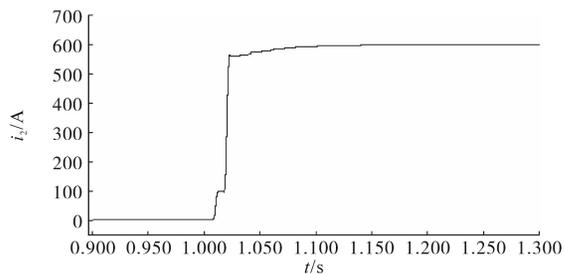
Fig.9 AB phase voltage waveform before and after the second harmonic input



(a)AB相电流波形



(b)AB相电流中直流电流分量



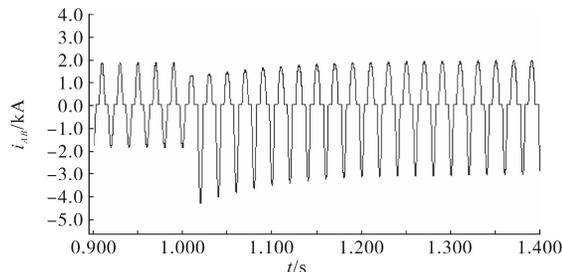
(c)AB相电流中2次谐波有效值

图10 无TCRBC仿真波形

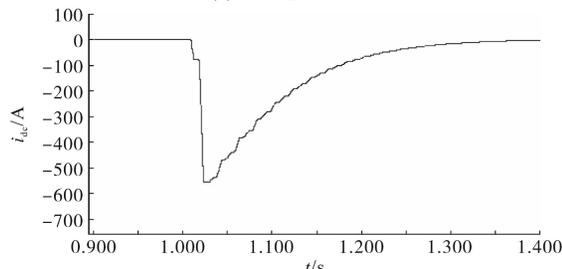
Fig.10 Simulation waveforms without TCR balance control

图11为有TCRBC情况下的对应波形。

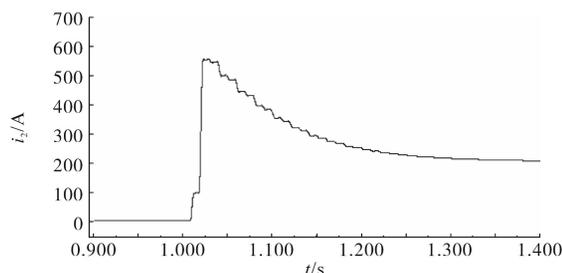
图12为TCRBC输出的调制角和调制晶闸管触发角的波形。



(a)AB相电流波形



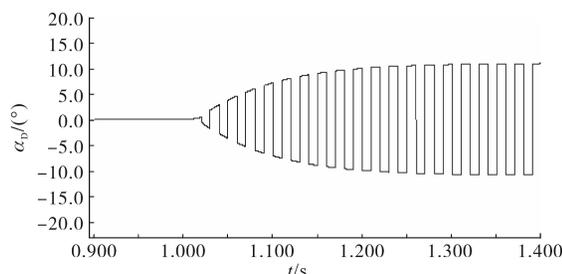
(b)AB相电流中直流电流分量



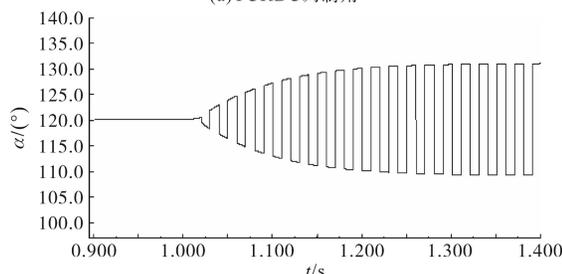
(c)AB相电流中2次谐波有效值

图11 有TCRBC仿真波形

Fig.11 Simulation waveforms with TCR balance control



(a)TCRBC调制角



(b)AB相晶闸管触发角

图12 TCRBC调制过程

Fig.12 TCRBC modulation process

由图11和图12可知,在有TCRBC的情况下,当TCR相电流中出现因系统电压中的2次谐波分量而引起的直流分量时,TCRBC会按如图12所示的形式通过每半个周期交变一次的调制角信

号对TCR的晶闸管触发角进行调制,达到在正负半波的不等间隔触发。经过大约0.4 s的调制,TCR相电流的正半波面积等于负半波面积,直流分量减小至0,同时2次谐波的幅值也降低至201.52 A。由此可知:TCRBC在消除TCR相电流中直流分量的同时,也能起到抑制电流中2次谐波分量的作用;并且TCRBC设定的时间常数较大,因此不会与电压控制的快速调节相冲突。

## 5 结论

在PSCAD上的仿真结果表明在TCR型SVC基本的电压控制策略中加入具有特殊的控制和保护功能的辅助控制策略具有可行性和有效性:

1) 可变电电压参考值的电压死区辅助控制在发挥TCR型SVC快速调节电压优点的同时,还能减少SVC稳态时的运行损耗和更有效地利用SVC有限的额定容量;

2) 由快速傅里叶变换FFT和PI调节相结合的TCR平衡辅助控制可以将TCR电流中出现的因系统电压中的2次谐波分量而引起的大量直流电流分量减少至0,从而抑制系统2次谐波电压对TCR的影响,保障装置的安全运行。

### 参考文献

- [1] 陈鑫,李昂,杨帆,等.基于SVC和PSS的电力系统电压稳定性研究[J].电子设计工程,2017,25(9):18-21.
- [2] 刘飞璇.SVC对交流特高压电网电压稳定性的应用研究[D].济南:山东大学,2015.
- [3] 张琳.晶闸管控制电抗器的原理与仿真[J].铜陵职业技术学院学报,2010,9(3):58-59,61.
- [4] 马安仁,周志文,吴韬.TCR无功补偿控制新方法的研究[J].电气自动化,2009,31(5):68-69.
- [5] 马明智,王奔,冯阳,等.组合型静止无功补偿装置研究[J].

电力科学与工程,2014,30(2):16-22.

- [6] 王少杰,王鸿扬,涂春鸣,等.静止无功补偿器新型功率因数调节方法研究[J].电器与能效管理技术,2017(12):58-62.
- [7] 陈鹏.基于自适应型FBD法控制策略的静止无功补偿器的研究[D].青岛:山东科技大学,2018.
- [8] 黄现莲,冯向东,张新闻.基于全滤波器的单相无功补偿器控制策略研究[J].电气传动,2019,49(2):12-15,22.
- [9] 孙聪,王异凡,陈国柱,等.基于Steinmetz原理与瞬时无功理论的SVC装置防过补偿控制策略[J].机电工程,2013,30(10):1246-1249,1272.
- [10] 杨健,徐政,游广增.基于电力系统仿真软件的静止无功系统模型应用[J].云南电力技术,2019,47(1):1-6,21.
- [11] 郑建生.优化SVC调节功能的新策略[J].科技创新与应用,2016(9):189.
- [12] Mathur R M, Varma R K. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M].北京:机械工业出版社,2005:158-170.
- [13] 孙越,温阳东.FC+TCR型SVC研究[J].电源技术应用,2010,13(11):13-17.
- [14] 熊红德.特高压直流输电换流站中的SVC控制策略[D].广州:华南理工大学,2012.
- [15] 王琪.含直流微网的牵引网新型电能质量调节器研究[D].武汉:湖北工业大学,2019.
- [16] Varma R K, Padiyar K R. Damping torque analysis of static VAR system controllers[J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society, 1991, 6(2):458-465.
- [17] Puente H R, Burgess M L. Energization of large shunt reactors near static VAR compensators and HVDC converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1):629-636.
- [18] 杨学军,苏莉,王晓民.半波不对称控制TCR型无功补偿装置的控制策略[J].自动化技术与应用,2011,30(8):48-52.
- [19] 潘冬喜,宁存岱.电力系统谐波检测研究现状及发展趋势[J].电子制作,2018(17):92-93,95.
- [20] 胡海棠,陆文颖.谐波检测方法的研究探讨[J].电气自动化,2017,39(6):109-111.

收稿日期:2020-03-12

修改稿日期:2020-05-21