

一种基于TCR三相触发角平均值的 TSC控制策略研究*

景炜¹, 常凤筠¹, 王光磊², 陈佳永²

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, 辽宁鞍山 114000

摘要: 随着静止无功补偿装置SVC的不断发展, 不同装置之间的协调控制愈显重要。文章在TCR+FC模型的基础上, 增加了一级作为无功储备的TSC支路构成TCR+TSC+FC型SVC。并以TCR晶闸管的触发角与系统无功需求的关系为依据, 设计了基于TCR三相晶闸管触发角平均值的TCR和TSC的协调控制策略; 同时, 为了保证TSC电容器的快速准确投切, 设计了在TSC的晶闸管两端电压过零时刻同时使能正负相晶闸管触发的控制方式。结合工程实例, 在PSCAD上的仿真结果验证了设计方案的正确性和可行性。

关键词: 静止无功补偿装置; 协调控制; 触发角平均值; 快速准确投切

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)06-0054-08

Research on TSC control strategy based on the average of TCR threephase trigger angles

JING Wei¹, CHANG Fengjun¹, WANG Guanglei², CHEN Jiayong²

1. School of Electronics and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114044, China
2. Liaoning Rongxin Xingye Electric Power Technology Co. LTD, Anshan 114000, China

Abstract: Due to the continuous development of static reactive compensation device, the coordinated control between different devices becomes more and more important. In this paper, on the basis of the TCR+FC model, a TSC branch as reactive power reserve is added to make up TCR+TSC+FC type SVC. Depending on the relationship between the trigger angles of TCR and the reactive power demand of the system, a TSC control system is designed based on the average of TCR three-phase thyristor trigger angles. Meanwhile, in order to ensure the fast and accurate switching of the TSC capacitors, the triggering control mode of enabling thyristors with positive and negative phase at the same time is also designed when the voltage at both ends of the thyristor crosses zero. The simulation results of PSCAD with an engineering example show that the design scheme is correct and feasible.

Key words: SVC; coordination control; average of trigger angles; fast and accurate switching

静止无功补偿装置作为一种并联补偿装置^[1-3] 中固定电容器(FC, fixed capacitor)、晶闸管投切
广泛应用于电力系统的动态无功功率补偿中, 其 电容器(TSC, thyristor switched capacitor)和晶闸

* 收稿日期: 2020-01-15 录用日期: 2020-02-09 网络首发日期: 2021-01-08
基金项目: 南方电网科技项目(RXSVC14090201)
作者简介: 景炜(1995年生), 男; 研究方向: 电力系统保护与控制; E-mail: 2045671425@qq.com
通信作者: 常凤筠(1964年生), 女; 研究方向: 电力系统保护与控制; E-mail: cc.cjf@163.com

管控制电抗器 (TCR, thyristor controller reactor) 是 SVC 的主要形式。这三种无功补偿装置有各自的优缺点: FC 能同时提供容性无功和滤波, 但容量固定且不能频繁投切; TCR 能通过调节电抗器连续改变感性无功且能分相补偿, 但会产生大量的特征谐波^[4]; TSC 能快速投切电容器补偿容性无功, 但设备复杂且造价高^[5]。实际中, 为了扩大无功调节范围, 使无功控制范围从感性无功变化到容性无功, 常将 TCR、TSC 和 FC 组合使用。

近年来, 随着我国电力工业的迅速发展, 大范围的高压输电网络逐渐建成^[6-8]。无功功率同有功功率一样, 是提高电力系统电能质量、降低电网损耗和保证其安全运行所必需的。电网无功功率的不平衡将导致电网电压的波动, 严重时甚至会损坏用电设备, 甚至出现电压崩溃等^[9-10]。为加强电力系统的电压调节能力和丰富调节手段, 提高电网功率因数水平和对三相不平衡负载的补偿能力, 可以采用 SVC 等动态无功功率补偿措施。TCR+TSC+FC 型 SVC 是连续可调节的静止无功补偿装置, 不仅谐波含量低, 而且响应速度快, 可快速调整无功功率输出, 具有较强的无功功率调节能力, 而且还可以提供动态电压支撑、抑制电压波动, 提高电网功率因数和电压稳定水平。

典型的 TCR+TSC+FC 型 SVC 的协调控制策略是将电压作为目标进行补偿, 以 TSC 作为分级粗调、TCR 进行相控细调^[11-14]的原则通过 PI 调节器计算出标幺值电纳值, 该电纳值除以单组 TSC 的电纳值就可以确定需要的 TSC 支路数, 而差值则由 TCR 抵消; 同时 TCR 运行时产生的特征谐波则由 FC 滤除。

本文设计的新型 TCR+TSC+FC 型 SVC 的协调控制策略是根据斯坦门茨平衡化原理对系统进行三相不平衡负载的补偿, 其中 FC 提供主要的容性无功功率同时滤除谐波, TCR 提供感性无功功率以

抵消差值; TSC 作为无功储备支路, 以 TCR 三相晶闸管触发角的平均值作为判据控制 TSC 的投入和退出。在 PSCAD 上的仿真结果表明, 该新型协调控制策略具有可行性。

1 SVC 工作原理

1.1 SVC 补偿原理

SVC 补偿器的重要特征是能连续地调节补偿装置的无功功率, 将系统的总无功功率保持在一个值或保持无功输出为零^[15], 其补偿原理是: 由并联电容器组或和 TSC 共同提供固定的容性无功功率 Q_C , 补偿电抗器 TCR 发出感性无功功率 Q_L , 其大小由通过补偿电抗器的电流决定, 根据负载所需的无功功率 Q_F 的变化, 调节补偿电抗器的电流来调节 Q_L , 使系统提供的无功功率 $Q_S = Q_F + Q_L - Q_C \approx 0$ 或常数, 达到平衡系统无功功率、提高功率因数和抑制电压波动的目的。

这种连续调节感性无功 Q_L 是通过调节 TCR 晶闸管的触发角 α 实现的。FC 和 TSC 是在并联电容器上串联经过计算得到的电阻和电感来分别消除对应次谐波; 既可以提供容性无功功率, 又可以滤除谐波。

1.2 SVC 控制原理

SVC 的控制原理如图 1 所示。首先 SVC 通过信号采集和滤波环节获得目标信号, 经过斯坦门茨三相平衡化环节变换得到系统负载的每一相所需无功功率, 再通过计算得出补偿器的每一相补偿导纳数值, 经过线性化环节处理得到 TCR 的三相触发角数值, 再通过触发环节产生相应的触发脉冲信号控制 TCR 每相吸收的无功大小, 调节 SVC 三相的输出; 同时再将 TCR 的三相触发角求平均值, 通过比较环节得出的结果, 执行 TCR 和 TSC 的协调控制策略控制 TSC 的投切。

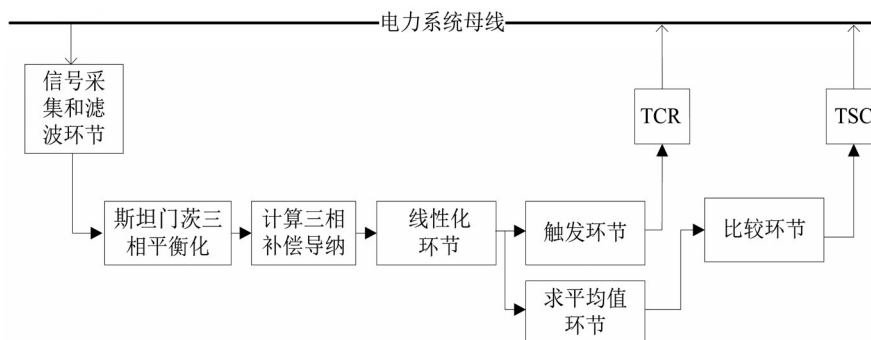


图 1 SVC 控制原理图

Fig. 1 SVC control principle diagram

SVC 控制的核心部分是斯坦门茨三相平衡化环节, 该环节的工作原理是基于 C. P. Steinmetz^[16-18]提出的理论, 即将三相不对称负载看成 3 个单相负载, 由补偿器提供平衡补偿, 从而得到一个三相对称且功率因数等于 1 的负载。设三相不平衡负载导纳值 Y_{ab} 、 Y_{bc} 和 Y_{ca} 为

$$\begin{cases} Y_{ab} = G_{ab} + jB_{ab}, \\ Y_{bc} = G_{bc} + jB_{bc}, \\ Y_{ca} = G_{ca} + jB_{ca}, \end{cases} \quad (1)$$

式中的 G 和 B 分别表示负载导纳的电导和电纳。经过平衡化补偿, 得到补偿器三相补偿电纳值 $B_{ab(r)}$ 、 $B_{bc(r)}$ 和 $B_{ca(r)}$ 为

$$\begin{cases} B_{ab(r)} = -B_{ab} + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{ca} - G_{bc}), \\ B_{bc(r)} = -B_{bc} + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{ab} - G_{ca}), \\ B_{ca(r)} = -B_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{bc} - G_{ab}). \end{cases} \quad (2)$$

经计算得到三相补偿电纳值, 再根据式 (3) 通过线性环节转换为 TCR 的三相晶闸管触发角

$$B(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_L}, \quad (3)$$

式中 α 为晶闸管的触发角, rad; X_L 为 TCR 的回路感抗。

1.3 SVC 协调控制原理

SVC 的原理是通过调节 TCR 的触发角 α 跟随负载无功需求变化实现连续补偿, 即触发角 α 和负载的无功需求有直接的关系: 每一个触发角 α 都对应一个 SVC 无功功率输出或者负载无功需求; 而本文的 TSC 支路又是作为容性无功功率储备支路在负载无功需求较大时投入, 较少时退出, 以减少损耗。所以, 本文通过将 TCR 触发角的调节与 TSC 的投切相互配合来实现二者的协调控制。又因为 TCR 的分相补偿其三相触发角不完全相同, 所以取三相触发角的平均值作为 TSC 控制系统设计的依据。本文的 TCR 触发角 α 的控制范围为 $110^\circ \sim 170^\circ$ 。

2 TSC 控制系统设计

TSC 的控制策略是根据计算得到 TCR 三相晶闸管触发角平均值 B_{svc} 的大小与设定的 TSC 投入阈值 B_{set1} 和退出阈值 B_{set2} 相比较, 得到的结果控制 TSC 投入、保持上一个状态或者退出; 同时在判断逻辑中引入一个延时环节^[19]是必要的, 因为这个环节可以避免在投切点处电容器在短时间内频繁

动作。TSC 控制策略如图 2 所示。



图 2 TSC 控制策略图

Fig. 2 TSC control strategy diagram

图 2 中按照实际要求 B_{set1} 、 B_{set2} 和延迟时间分别设定为 160° 、 120° 和 5 s。

2.1 TSC 投入控制

当感性负载需要的无功功率增加, TCR 的触发角平均值将增大以增加 SVC 无功输出; 当此平均值大于 160° 时, 说明负载的无功需求将接近或大于 FC 能提供的无功容量, 所以为了保证 SVC 有足够的无功功率, 需要将作为无功储备支路的 TSC 投入, 具体实现过程如图 3 所示: 先计算 TCR 的三相触发角平均值, 经过比较器 1, 若大于设定值 160° , 则输出一个高电平到积分器, 同时此信号再经过一个比较器 2, 若大于设定值 0.5 则输出一个脉冲复位积分器, 然后积分器开始从 0 计时; 如果计时时间大于设定的延时投入时间 (5 s), 则将 TSC 投入信号使能 (置 1)。复位环节在 TSC 退出信号被使能时, 将 TSC 投入信号复位 (置 0)。

选择触发角平均值 160° 而不是 170° 作为 TSC 的投入判据是为了保留触发角在 $160^\circ \sim 170^\circ$ 所对应的 SVC 无功功率, 以便在系统需要超过 160° 对应的无功功率时, SVC 能够迅速给出而不用等待 TSC 的投入。

2.2 TSC 退出控制

当感性负载需要的无功功率减少, TCR 的触发角平均值将减小以减少 SVC 无功输出; 当此平均值小于 120° 时, 说明 FC 的容量足够补偿负载所需无功, 所以为了减小整体损耗, 需要将 TSC 退出, 具体实现过程如图 4 所示: 先计算 TCR 的三相触发角平均值, 经过比较器 1, 若小于设定值 120° , 则输出一个高电平到积分器, 同时此信号再经过一个比较器 2, 若大于设定值 0.5 则输出一个脉冲复位积分器, 然后积分器开始从 0 计时; 如果计时时间大于设定的延时退出时间 (5 s), 则将 TSC 退出信号使能 (置 1)。复位环节在 TSC 投入信号被使能时, 将 TSC 退出信号复位 (置 0)。

选择触发角平均值 120° 作为 TSC 的退出判据是为了设立一个由 $120^\circ \sim 160^\circ$ 所对应的 SVC 无功输出

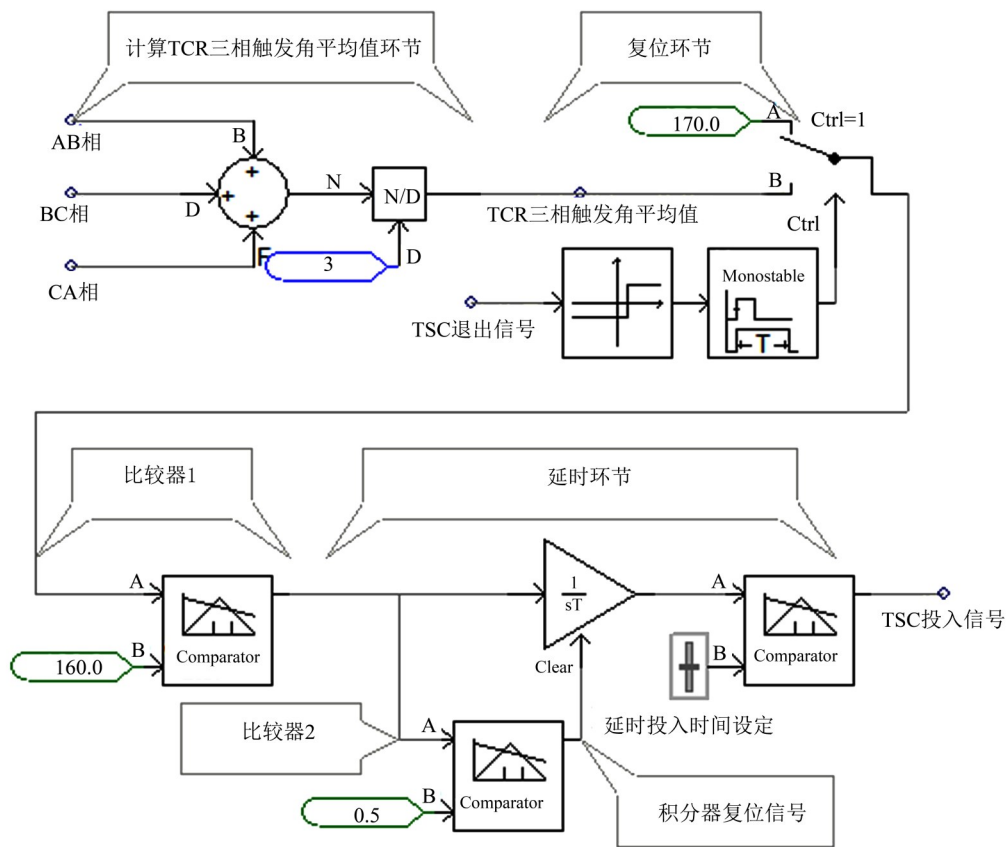


图3 TSC投入模型图

Fig. 3 TSC input model diagram

容量作为“死区”，防止TSC的频繁投入和退出。

2.3 TSC触发控制

TSC的关键技术问题是选择投切时刻和触发方式实现电容器的快速准确平稳投切。

2.3.1 投切时刻 实时检测TSC晶闸管的两端电压在端电压过零^[20-21]也就是电网电压和电容器两端电压相等的时刻，且满足晶闸管为正向电压和门极上有触发脉冲信号这两个条件后，导通晶闸管，将电容器投入到系统中；当发出TSC退出信号即关闭门极触发脉冲信号后，在电流过零时，晶闸管自动闭锁，电容器从系统中退出。与传统的投切方式（即选择在电网电压峰值时刻且电容器预充电电压等于电网电压峰值时投切）相比，这种投切方式有以下优势：不需要考虑晶闸管两端的电网电压和电容器的端电压，可以在任意时刻投切，并且投切速度快（完成时间小于20ms），设备投资少，合闸涌流小，无冲击过电压和电弧重燃等问题。

2.3.2 触发方式 TSC的两个晶闸管是反并联连接，传统的触发方式是分别发出触发信号轮流导通正负相晶闸管，但是因为TSC不必对晶闸管的触

发角 α 进行控制，所以这种触发方式显得复杂且没必要^[22]，故本文采取的是正负相晶闸管的触发脉冲信号同时发出的触发方式。TSC的快速准确触发原理如图5所示。

2.3.3 信号处理 图5中输入到控制逻辑环节的信号有TSC投入信号、晶闸管端电压过零信号和TSC退出信号，因为这三种信号被使能后均为高电平，所以为了保证TSC触发逻辑的正确性需要进行适当处理。本文设计的控制逻辑环节内部结构如图6所示，三种信号的逻辑关系如表1所示（假设过零信号使能）。

3 系统仿真

在PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件^[23-24]中，根据云南省曲靖市的多乐变电站220kV三相输电线路的部分参数搭建仿真模型，如图7所示。在此实例模型中，对TCR+TSC+FC型SVC的控制策略进行仿真分析。

3.1 系统参数

系统参数为主电源220kV，主变容量比240/240/120MVA。阻抗电压分别为 $U_{k高-中}=14\%$ ，

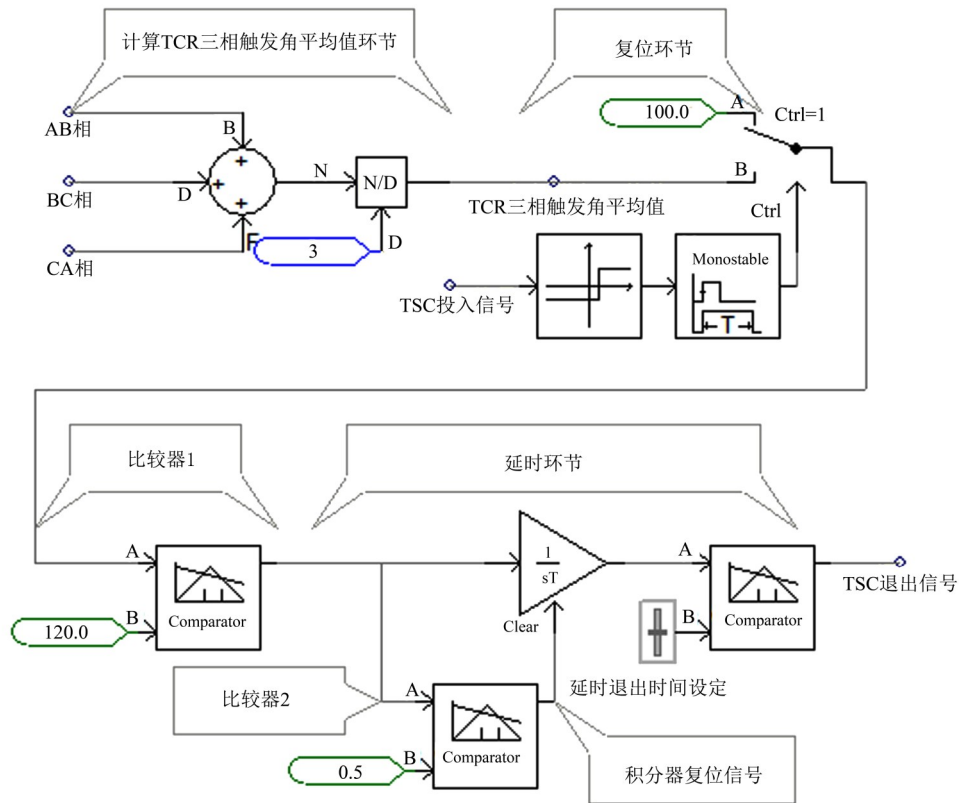


图 4 TSC退出模型图

Fig. 4 TSC exit model diagram

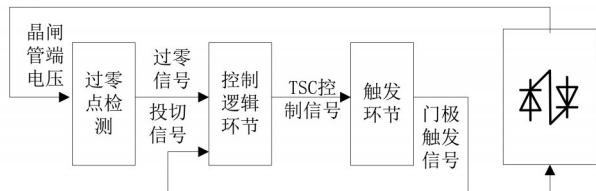


图 5 TSC快速准确触发原理

Fig. 5 TSC fast and accurate trigger schematic diagram

表 1 控制信号逻辑表

Table 1 Control signal logic table

过零	投入	与门1	退出	与门2	控制
1	0	0	1	0	退出
1	0	0	0	0	退出
1	1	1	1	1	投入
1	1	1	0	0	退出

$U_{k高-低}=23\%$, $U_{k中-低}=8\%$; 其中接于 33 kV 侧母线的 SVC 通过主变对接于 110 kV 母线侧的负载进行无功补偿。SVC 由一组三角形接线的三相 TSC (容量 56 Mvar, 且串联一个电抗率为 6% 的电抗器)、一组三角形接线的三相 TCR (容量 112 Mvar) 和三

组星形接线的滤波器支路 FC (分别滤除 3、5 和 7 次谐波, 总容量为 79 Mvar) 组成; 110kV 侧母线带有 2 个负载, LOAD1 是系统原有负载 (其中不平衡等效负载为 $200+j0.05$ 、 $200+j0.08$ 、 $200+j0.03$); LOAD2 是测试 SVC 性能的大负载。

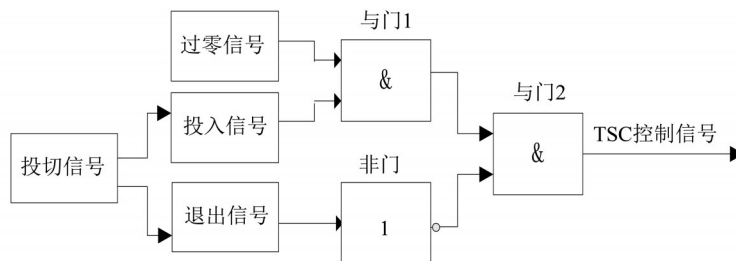


图 6 控制信号关系图

Fig. 6 Control signal relation diagram

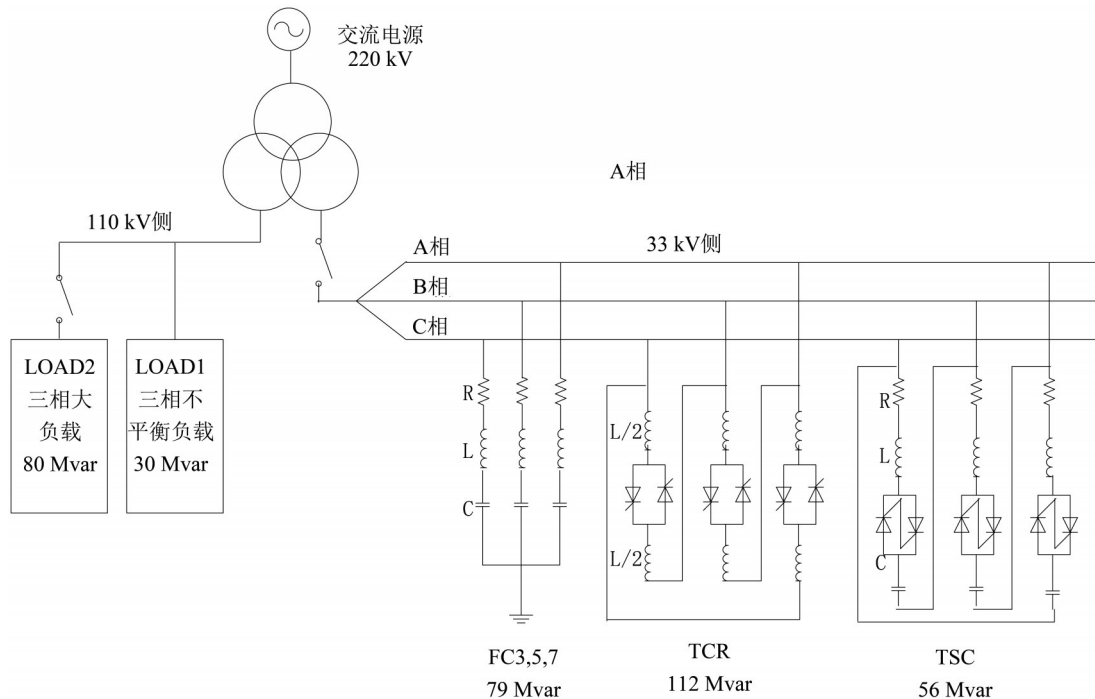


图7 系统模型示意图

Fig. 7 System model schematic diagram

3.2 仿真分析

虽然按照实际要求判断TSC投切的延迟时间为5 s, 但是为了缩短仿真时间, 在仿真实验中将延迟时间设置为0.5 s。系统仿真时间设定为10 s: 0 0 s仿真开始, 系统开始运行; 0.4 s时SVC的断路器闭合, 2 s时投入80 Mvar的负载LOAD2, 4 s时退出LOAD2; 6 s时再次投入此负载, 8 s时再次退出, 10 s时仿真结束。系统仿真波形如图8所示。

从图8(a)、8(c)和8(h)看出在SVC投入前的0~0.4 s内, 负载LOAD1所需的30 Mvar无功全部由系统电源提供, 导致系统的功率因数较低为0.85, TCR触发角均为最大(170°)即不吸收任何无功。从图8(a)和8(b)可看出, 在0.4 s时刻SVC投入, 经过投入暂态后, SVC调整TCR三相触发角AB、BC、CA为从170°到133°、从170°到131°、从170°到129°(其平均值为131°)以进行分相补偿; 从图8(c)和8(h)可看出, 因为SVC补偿了LOAD1所需无功, 所以系统功率因数提高到0.99; 但从图8(c)可看出, SVC的输出稍大于LOAD1所需无功功率, 这是因为SVC也同时补偿了三相变压器消耗的无功功率。

从图8(a)和8(c)可看出, 在2 s时负载LOAD2投入, 负载总的无功需求达到110 Mvar, 在TSC投入前, 即使TCR将触发角全部调到上限值170°(大于TSC投入的设定值160°)即不吸收任何无功,

让SVC输出FC全部的79 Mvar无功仍然也有31 Mvar的“无功缺口”, 所以从图8(h)可看出系统的功率因数降到了0.86。从图8(g)和8(e)可看出, 在2.5 s时(满足TSC延时投入条件)TSC投入信号使能, 2.51 s时电网电压过零和电容器的端电压(为0)相等即TSC的晶闸管两端电压过零, 过零信号使能, 电容器开始投入; 从图8(e)和8(d)可看出, 电容器在无残压时的投入过程符合快速(完成时间在20 ms内)、准确平稳(无冲击过电压)的要求。

在经过投入暂态后, 从图8(a)、8(b)和8(c)可看出, TCR触发角分别改变为141°, 139°和136°(其平均值为139°), 2个负载所需的110 Mvar无功得到补偿, 所以从图8(h)可看出系统的功率因数又提高到0.99; 也说明TSC的投入并不会影响TCR的分相补偿能力。

从图8(a)、8(b)和8(c)看出在4 s时LOAD2退出, 负载无功需求变为30 Mvar, 经过暂态后, TCR触发角分别为115°、114°和112°, 其平均值为114°(小于TSC退出设定值120°), 说明SVC现有总无功容量过多, 且从图8(c)看出无功功率过多会影响补偿精度。从图8(d)和8(g)看出在4.5 s时(满足TSC延时退出条件)TSC退出信号使能, 投入信号复位, 电容器迅速从系统中平稳退出。经过暂态后, 从图8(a)和8(b)可看出TCR的触发角

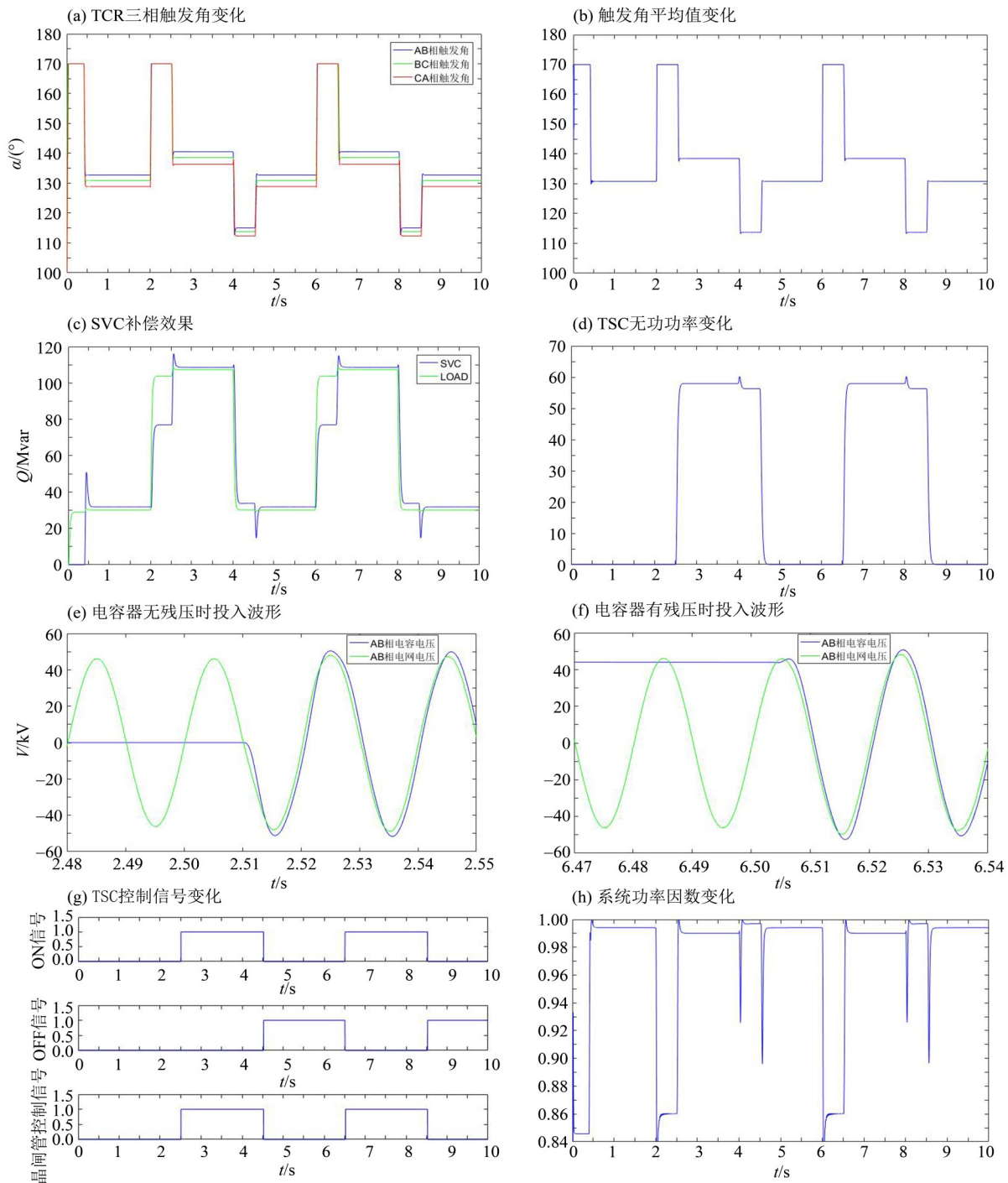


图 8 系统仿真波形图

Fig. 8 System simulation waveform diagram

重新恢复为 133° 、 131° 、 129° (其平均值为 131°)，说明 TSC 的退出也不会影响 TCR 的分相补偿能力。

6 s 时刻 LOAD2 再次投入，从图 8(g) 和 8(f) 可看出 6.5 s 时刻 TSC 投入信号再次使能，6.504 s 时刻电网电压和电容器的残压相等即 TSC 的晶闸管两端电压过零，过零信号使能，退出信号复位，电容器再次投入；从图 8(d) 和 8(f) 可看出电容器有残压时的投入过程也符合快速准确平稳的要求。

8 s 时刻 LOAD2 再次退出，从图 8(d) 和 (g) 可看出 8.5 s 时刻 TSC 退出信号再次使能，投入信号复位，电容器再次快速平稳退出。

4 结 论

在 PSCAD 上的 TCR+TSC+FC 型 SVC 的仿真结果表明：设计的基于 TCR 三相晶闸管触发角平均值的 TCR 和 TSC 的协调控制策略具有正确性和可行性，并且 TSC 的投切不会影响 SVC 对三相不平衡

负载的补偿能力;设计的在TSC晶闸管两端电压过零时刻同时使能正负相晶闸管的触发控制方式可

以保证在任意时刻快速准确无冲击地投切电容器。

参考文献:

- [1] 郭剑峰,杨臻.无功补偿装置的现状和发展趋势[J].科技风,2018(14):182.
- [2] 王华元.电力系统无功补偿装置的几个问题综述[J].建筑工程技术与设计,2016(3):632-633.
- [3] 周晓华,张银,刘胜永,等.静止无功补偿器新型自适应动态规划电压控制[J].电力系统保护与控制,2018,46(12):77-84.
- [4] 曾海林.基于新型整流变压器的TCR+TSC型SVC装置研究[D].长沙:湖南大学,2010.
- [5] 毕秀梅,马英庆.一种新型静止无功补偿装置[J].电力自动化设备,2009,29(8):140-142.
- [6] 刘玥,管红梅.智能变电站高压无功补偿器协调控制仿真[J].计算机仿真,2018,35(10):162-165+225.
- [7] 王雪,高云广,吝伶艳,等.有源电力滤波器的研究现状与展望[J].电力系统保护与控制,2019,47(1):177-186.
- [8] 万波.无功补偿在低压电网中的应用与研究[J].价值工程,2019,38(26):233-234.
- [9] SAFARI A, BAGHERI M, SHAYEGHI H. Optimal setting and placement of FACTS devices using strength Pareto multi-objective evolutionary algorithm [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(4): 829-839.
- [10] 肖繁,王涛,高扬,等.基于特高压交直流混联电网的调相机无功补偿及快速响应机制研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):93-100.
- [11] 张瑞君.TSC+TCR组合补偿技术及仿真分析[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(6):23-26+31.
- [12] 唐微,赵辉,岳有军.基于TCR-TSC的电弧炉无功补偿仿真研究[J].电网与清洁能源,2012,28(2):67-70+79.
- [13] 林丽琴,吴文宣.TCR+TSC型SVC协调控制的仿真分析[J].电力与电工,2009,29(3):1-4.
- [14] 安裔铭,冯星洪,张明理.TSC+TCR型SVC对风电场并网点电压影响的研究[J].东北电力技术,2016,37(5):1-4.
- [15] 孙晓波.10KV静止无功补偿装置的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.
- [16] 管慎龙.基于SVC装置的不对称负荷解决方案的研究与运用[D].合肥:安徽大学,2014.
- [17] 赵育林.智能三相负荷平衡装置的研究[D].南宁:广西大学,2017.
- [18] 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.
- [19] KOSE N, MUTLUER B, ERMIS M, et al. Two-folded implementation of a 12-pulse TCR with dissimilar transformers for a ladle furnace: reactive power compensation and power system redundancy [C]// Industry Applications Conference, 2004.
- [20] 姚霞,刘建华,陈斌,等.低压TSC无功补偿装置投切策略优化设计[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(6):144-149.
- [21] 曾延华.晶闸管投切电容器触发电路的微机控制[J].现代国企研究,2016(10):126.
- [22] 孟会永,王光磊,陈佳永,等.高压TSC快速切换方法及防误触发方式研究[J].数字技术与应用,2018,36(7):85-87.
- [23] SHARMEELA C, UMA G, MOHAN M R, et al. Voltage flicker analysis and mitigation-case study in AC electric arc furnace using PSCAD/EMTDC [C]//IEEE Conferences,2004:707-712.
- [24] CHEN Y, ZAI L P, CHEN C L, et al. The harmonic characteristic analyzing of reactive power compensation equipment based on PSCAD [C]//IEEE Conferences, 2009.

(责任编辑 王海蓉)