第 31 卷第 5 期
2019 年 5 月

强 激 光 与 粒 子 束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS

Vol. 31, No. 5
May, 2019

基于触发检测的晶闸管控制电抗器动态响应时间评估方法*

吴亚楠[1]， 茆华风[1]， 沈显顺[1,2]， 李 俊[1]， 卢 晶[1]， 茆智伟[1]

（1. 中国科学院 等离子体物理研究所，合肥 230031； 2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院，合肥 230026）

摘 要： 针对传统响应时间检测方法存在基准时刻不统一、依赖间接测量量的问题，提出了一种基于实际触发角检测的晶闸管控制电抗器（TCR）动态响应时间评估方法。依据过零切除固定电容器组产生阶跃参考量统一基准时刻，通过 TCR 实际触发角与下限值的比较确定响应时刻，进而直接评估响应时间。实验结果表明，该方法可有效应用于大容量 TCR 型无功补偿装置动态响应性能分析、评价。

关键词： 触发角； 晶闸管控制电抗器； 动态响应时间； 静止无功补偿器； 阶跃变化

中图分类号： TM761 **文献标志码：** A **doi**:10.11884/HPLPB201931.180362

Assessment method of thyristor controlled reactor dynamic response time based on trigger detection

Wu Ya'nan[1], Mao Huafeng[1], Shen Xianshun[1,2], Li Jun[1], Lu Jing[1], Mao Zhiwei[1]

(1. *Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei* 230031, *China*;
2. *Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *China*)

Abstract: Dynamic response time is a key index of thyristor controlled reactor(TCR) type static var compensator(SVC) dynamic performance. Aiming to solve traditional detection problems of no unified datum time and overdependence on indirect measurement, assessment method of TCR dynamic response time based on real firing angle detection is proposed. According to a step reference signal trip generated fixed capacitor(FC) zero-crossing trip, datum time is unified. Then the response time is determined by comparing TCR real firing angle with lower limit value. The experimental result shows that this method can be effectively applied to analyse and evaluate dynamic response performance of large capacity TCR type SVC.

Key words: firing angle; thyristor controlled reactor; dynamic response time; static var compensator; step change

PACS: 84.70.+p; 88.80.H-; 88.50.Mp; 88.60.-m

在各类无功补偿及谐波抑制设备中，晶闸管控制电抗器（TCR）+固定电容器组（FC）型静止无功补偿器（SVC）因具有直挂电压等级高、补偿容量大等特点，在冶金、煤炭工业得到了广泛应用[1-5]。业界根据负荷特点，对其补偿用 TCR 型 SVC 动态响应时间有严格的要求，对于大容量电弧炉、连轧机组、煤炭提升机等非线性冲击负荷而言，响应时间更是直接决定 SVC 各项运行性能。因此深入研究 TCR 动态响应时间评估方法具有重要理论价值和现实意义[6-8]。现有的 SVC 动态响应时间检测和评估方法多是基于电网电压、电流、无功有效值或瞬时无功曲线，此类方法存在基准时刻难以统一，曲线变化特征不明显等问题[9-12]。为此，本文提出了一种基于实际触发脉冲检测的 TCR 动态响应时间评估方法，首先通过断路器过零切除 FC 支路产生阶跃无功参考量，同时采集 TCR 相电流波形获取实际触发角，并与触发角下限值比较，从而准确评估 TCR 动态响应时间特性。

* **收稿日期：**2018-12-11； **修订日期：**2019-02-27
基金项目：国家自然科学基金项目（51707190）
作者简介：吴亚楠（1986－），男，博士，副研究员，从事大容量特种电源与电网兼容性研究；wyn@ipp.ac.cn。
通信作者：李 俊（1980－），男，硕士，工程师，从事电能质量控制技术研究；junli@ipp.ac.cn。

1 概念与构成

SVC 动态性能是指 SVC 针对某种参考量的突变、突加的小扰动，或者可能使 SVC 超出正常运行范围的大扰动或故障的时域响应性能[13-15]，SVC 的动态响应时间是其重要的评价指标，不准确的响应时间会直接导致对无功补偿能力的错误判断，对实际应用产生错误引导。《IEEE Std 1031-2011》和《GB/T 20298-2006》主要针对电力系统电压控制型 SVC，将其响应时间分为 SVC 系统响应时间和控制系统响应时间。从控制信号（参考电压）输入开始，直到系统电压达到预期电压水平的 90%所需的时间称为 SVC 响应时间，如图 1 所示。控制系统响应时间是从控制信号输入开始，SVC 控制器完成控制信号的采样、分析、计算，直至控制器发出触发信号所经历的时间。尽管《IEEE Std 1303-2011》和《GB/T 20297-2006》均提及，“对于功率调节的 SVC 装置，应使用阶跃变化的参考无功功率（Q_{ref}），通过 Q_{ref} 的阶跃输入，获得在改变扰动时 SVC 的响应记录”，但均未说明 SVC 响应时间的具体试验和分析方法。

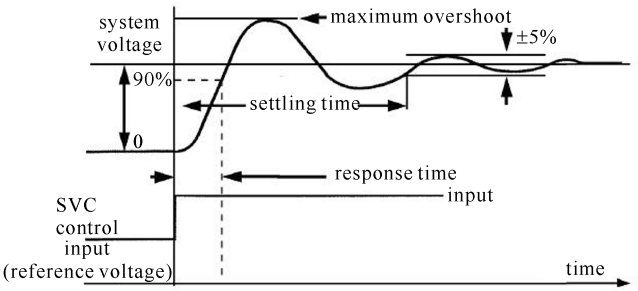

Fig. 1 SVC response time of IEEE and CNS

图 1 IEEE 和国标定义的 SVC 响应时间

将 TCR 型 SVC 系统响应延时划分为检测、控制、触发及执行环节四部分。

（1）检测延时：主要由互感器、滤波电路及信号调理电路构成。

（2）控制延时：主要由基波无功算法固有和执行算法所需时间构成，常用的全波和半波傅氏算法延时分别为 T 和 $T/2$（T 为工频周期），瞬时无功算法固有延时主要由低通滤波器性能决定。

（3）触发延时：主要由执行线性化环节所需时间和触发角度大小决定。如从单相电压峰值点开始计算，触发角延时范围在 0～$T/4$ 周期之内变化，已被触发的前两相晶闸管将分别延迟 $T/6$ 和 $T/3$，这主要是由于三相 TCR 固有的顺序触发特性引起的，该延迟对应于检测时刻与晶闸管开始导通之间的时间段。

（4）执行延时：主要由晶闸管阀死区时间构成，这种延时是由于晶闸管无法在任意时刻对期望的触发角信号的变化作出反应而造成的。对于一个 6 脉波的 TCR，死区时间是从 0～$T/6$ 的随机数。

2 评估方法与步骤

TCR 型 SVC 响应时间评估方法及步骤具体包括以下四部分。

2.1 分析实验对电网的影响，确定投切方案

在评估 TCR 型 SVC 动态响应时间前，应首先分析高压同步断路器或其他开关设备在过零点下切除滤波次数最高的某条或同一断路器下某几条滤波补偿支路时，切滤波补偿支路对电力系统公共连接点 PCC 的影响，应保证电压波动、注入公共连接点的谐波电流和谐波电压等指标符合电能质量相关国家标准，以及系统母线电压暂降不引起自身欠电压保护动作。

PCC 电压波动可采用下式进行计算

$$d=\frac{\frac{U^2}{U_N^2}Q_{FCQ}}{S} \tag{1}$$

式中：d 为 PCC 电压波动率；U 为 TCR 型 SVC 实际运行电压；U_N 为 TCR 型 SVC 额定电压；Q_{FCQ} 为切除的滤波补偿支路额定电压下的基波补偿容量；S 为 PCC 短路容量。

在符合上述标准的前提下，应一次性切除尽量多的基波补偿容量，主要是因为采用幅值较小的无功阶跃进行实验难以真实地反映该大容量 TCR 的动态响应性能。

2.2 计算目标无功值及触发角响应下限值

FC 滤波补偿支路的基波补偿容量是根据负荷性质和补偿目的而选定，为了在轻负荷或空载时不发生过补现象，通常选择 TCR 感性无功功率等于 FC 基波补偿容量，即 $Q_{TCR}=Q_{FC}$，因此 TCR 目标无功值可采用下式进行计算

$$Q_{TCRT}=\frac{U^2}{U_N^2}(Q_{FC}-Q_{FCQ}) \tag{2}$$

式中：Q_{TCRT} 为 TCR 目标无功值，Q_{FC} 为所有滤波补偿支路额定电压下的基波补偿容量。

随着滤波补偿支路切除，TCR 基波补偿容量将逐渐减小，以跟随目标无功值，因此以 TCR 达到目标无功值上的 10%所用的时间作为响应时间，该时间尽管在表述上与国标略有区别，但本质上符合国标规定的达到目标值 90%所需时间作为响应时间的定义。

根据单相 TCR 触发特性，易得到 TCR 线电压 V 和相电流 I 特征波形，如图 2 所示，线电压 V 和相电流 I 过零点差值即为 TCR 触发角，理论上触发角可控范围为 90°～180°，考虑触发角和等效电纳的非线性关系，实际触发角一般选择 105°～165°，图中 β 为 TCR 触发角响应下限值。

定义上述目标无功值上 10%所对应的触发角为 TCR 响应下限值，可采用式(3)对该下限值进行计算

$$3\frac{2\pi-2\beta+\sin 2\beta}{\pi Q_{TCRT}(1+10\%)}\frac{U^2}{\omega L}=1 \tag{3}$$

式中：ω 为系统角频率；L 为 TCR 额定电感值。

2.3 布置实验测点，同步采集所需信号

以 TCR 型 SVC 典型一次图为例，如图 3 所示，在系统母线/总进线、切除的滤波补偿支路馈线、TCR 环内互感器二次侧布置实验测点，通过录波仪或电能质量分析仪同步测量母线电压、总进线电流、切除的滤波补偿支路馈线电流、TCR 相电流。为了保证动态响应时间评估的准确性应尽量选用精度 0.2S 级以上的电压互感器、电流互感器及电压、电流探头，准确度等级为 A 级的录波仪或电能质量分析仪。

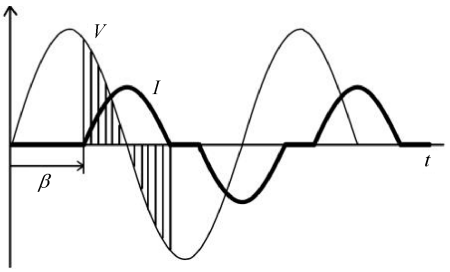

Fig. 2 Characteristic waveforms of TCR V and I

图 2 TCR 电压电流特征波形

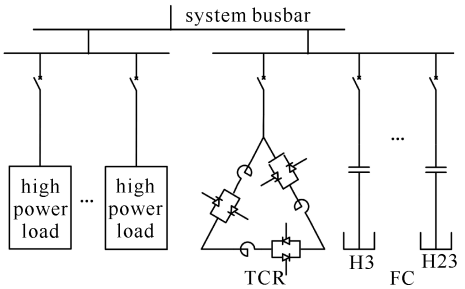

Fig. 3 Typical primary electrical diagram of TCR

图 3 TCR 型 SVC 典型一次图

2.4 获取实际触发角，完成响应时间评估

(1) 采用高压同步断路器或其他开关设备在电流过零点时切除中确定的滤波补偿支路，从而保证扰动 SVC 的参考量是一个标准的阶跃信号。

(2) 通过录波仪或电能质量分析仪同步记录实验全过程数据，读取分析该数据，以滤波补偿支路馈线电流过零切除点为阶跃无功参考点，即零时刻，该时刻同时也是总进线电流突变的时刻。

(3) 以母线电压过零时刻为基准，TCR 相电流突变点作为触发时刻，与之对应的即为 TCR 实际触发角。

(4) TCR 实际触发角首次大于等于触发角响应下限值的时刻为响应时刻，与零时刻差值为 TCR 型 SVC 动态响应时间。

具体以实验为例，阐述如何标记基准零时刻，检测实际触发角，从而获取响应时间。

3 实 验

以 66 kV，83.21 Mvar TCR+FC 型 SVC 系统动态响应时间评估实验为例，验证上述方法的可行性和有效性。该系统安装容量 168 Mvar，H3，H5，H7，H11 支路额定基波补偿容量分别为 12.89，23.86，23.37，23.09 Mvar，TCR 额定基波容量为 83.21 Mvar，电感值为 208 mH，主回路测点布置如图 4 所示。

按照第 2 节中的步骤和方法，通过分析确定切除 QF2 断路器下的 H7 和 H11 支路，由式(1)计算 TCR 目标无功值为 38.90 Mvar，TCR 触发角响应下限值为 133.213°。

通过 PW3198 日置电能质量分析仪同步测量图 4 系统中各检测点的电压、电流。以滤波补偿支路馈线电流 I_2 过零切除点为阶跃无功参考点，即零时刻，该时刻同时也是总进线电流 I_1 突变的时刻，如图 5 所示。以系统母线电压 U_1 过零时刻为基准，TCR 相电流 I_3 突变点作为触发时刻，与之对应的即为 TCR 实际触发角。图 5 中 TCR 实际触发角 134.2°首次大于等于触发角响应下限值 133.213°，该时刻即为响应时刻，此套 TCR+

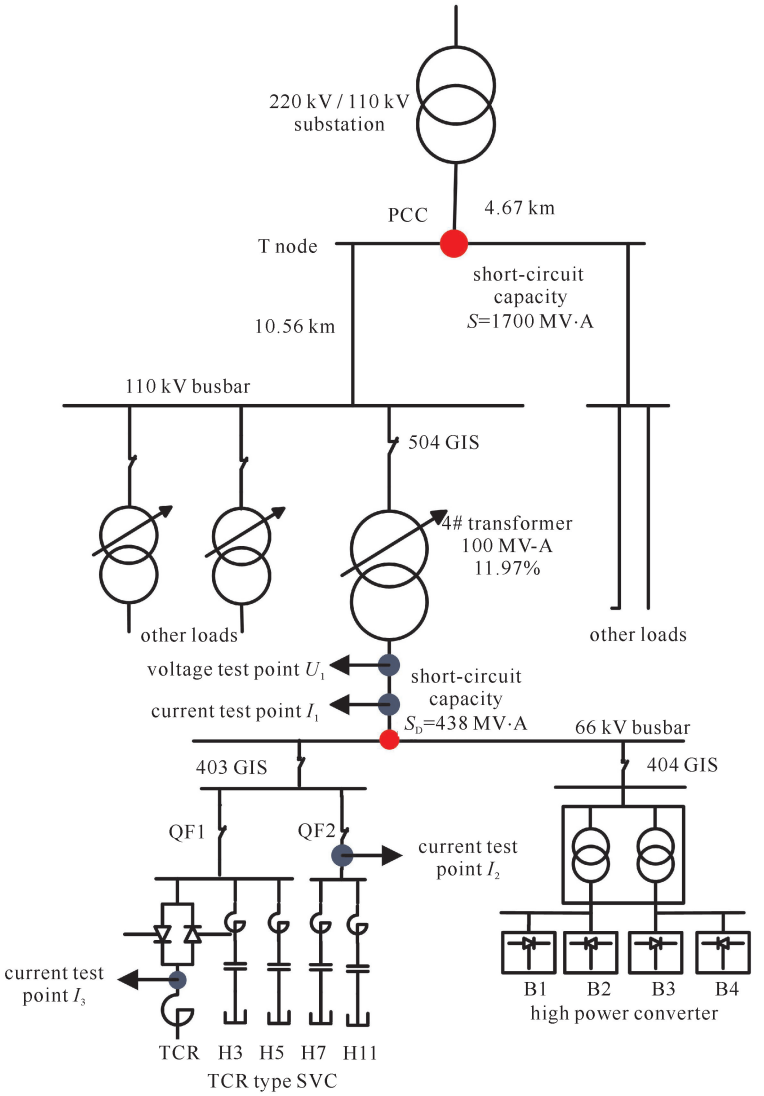

Fig. 4　Measurement point arrangement diagram

图 4　主回路测点布置图

FC 型 SVC 系统动态响应时间为 30.85 ms。

实验中不能以 TCR 相电流波峰或波谷幅值的变化作为评判 TCR 响应时间的标准，这是因为切除滤波补偿支路会造成母线电压的突然降低，即使 TCR 未做任何响应，TCR 相电流波形也会因母线电压降低、等效阻抗不变（触发角不变）而减小，所以应注意采用实际触发角大于等于上述下限值作为响应时间的评判标准。

4　结　论

在 TCR 触发检测的基础上，本文提出了一种动态响应时间评估方法，依据过零切除 FC 产生阶跃信号统一了基准时刻，通过 TCR 实际触发角与下限值的比较确定响应时间，该方法不依赖于无功等间接检测量，波形及物理特征清晰明确。实验结果表明：所述方法可以为大容量 SVC 动态响应性能分析、评价提供理论依据和工程参考。

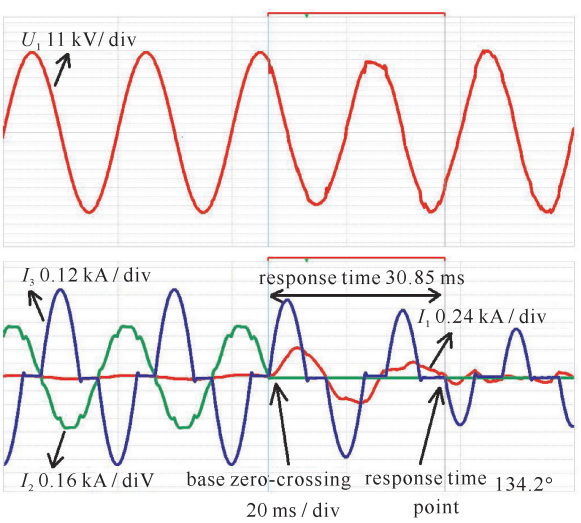

Fig. 5　Experimental results of dynamic response

图 5　动态响应实验结果

参考文献：

[1] 王兆安，杨君，刘进军，等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京：机械工业出版社，2010.（Wang Zhaoan，Yang Jun，Liu Jinjun，et al. Harmonic suppression and reactive power compensation. Beijing：China Machine Press，2010）

[2] 孙晓波，温嘉斌. TCR＋FC 型静止无功补偿装置的研究[J]. 电力电子技术，2011，45(5)：43-45.（Sun Xiaobo，Wen Jiabin. Study on TCR＋FC static var compensator. Power Electronics，2011，45(5)：43-45）

[3] 翁利民，张莉. 钢铁企业非线性负荷与无功补偿装置的应用分析[J]. 电力电容器与无功补偿，2014，35(5)：7-12.（Weng Limin，Zhang Li. Application analysis on non-linear load and reactive power compensation installation in steel & iron enterprise. Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2014，35(5)：7-12）

[4] 高云保，任韶安，孙超业. 电弧炉动态无功补偿装置的研制及应用[J]. 铸造，2012，61(6)：657-660.（Gao Yunbao，Ren Shaoan，Sun Chaoye. Development and application of dynamic reactive power compensation device for electric arc furnace. Foundry，2012，61(6)：657-660）

[5] Wu Ya'nan，Ji Yue，Xu Liuwei，et al. Optimization for Tokamak reactive power compensation and filtering system[J]. Journal of Fusion Energy，2015，34(1)：54-61.

[6] 冯强，赵旭，李德俊，等. 矿用静止无功发生器的设计[J]. 电源学报，2013，11(4)：55-59.（Feng Qiang，Zhao Xu，Li Dejun，et al. Design of static var generator for mine field. Journal of Power Supply，2013，11(4)：55-59）

[7] 倪赛赛，刘科，郭文科. 750 kV 主变低压侧 TCR 型 SVC 运行性能分析[J]. 电力电子技术，2015，49(12)：124-127.（Ni Saisai，Liu Ke，Guo Wenke. Analysis of TCR type SVC performance on the low voltage side of 750 kV transformer. Power Electronics，2015，49(12)：124-127）

[8] Wu Ya'nan，Xu Liuwei，Fu Peng，et al. Testing of SVC compensation and filtering performance with Tokamak PF converter[J]. Journal of Fusion Energy，2014，34(1)：84-92.

[9] 张超，姜齐荣，李娟，等. 静止无功补偿器时间特性及系统级可控电流源模型研究[J]. 电工电能新技术，2011，30(4)：1-4.（Zhang Chao，Jiang Qirong，Li Juan，et al. Research of static var compensator's time characteristics and system-level model of controlled current source. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy，2011，30(4)：1-4）

[10] Wang Juanjuan，Fu Chuang，Zhang Yao. SVC control system based on instantaneous reactive power theory and fuzzy PID[J]. IEEE Trans Industrial Electronics，2008，55(4)：1658-1664.

[11] 崔正湃，王皓靖，马锁明，等. 大规模风电汇集系统动态无功补偿装置运行现状及提升措施[J]. 电网技术，2015，39(7)：1873-1878.（Cui Zhengpai，Wang Haojing，Ma Suoming，et al. Operation situation analysis and improvement measure study for dynamic reactive compensation equipment applied in large-scale wind power systems. Power System Technology，2015，39(7)：1873-1878）

[12] 祁桂刚，黎灿兵，曹一家，等. SVC 和 TCSC 控制器间动态交互影响分析[J]. 电力自动化设备，2014，34(7)：65-69.（Qi Guigang，Li Canbing，Cao Yijia，et al. Analysis on dynamic interaction between SVC and TCSC controllers. Electric Power Automation Equipment，2014，34(7)：65-69）

[13] 肖雁鸿，毛筱，周靖林，等. 电力系统谐波测量方法综述[J]. 电网技术，2002，26(6)：61-64.（Xiao Yanhong，Mao Xiao，Zhou Jinglin，et al. A survey on measuring method for harmonic in power system. Power System Technology，2002，26(6)：61-64）

[14] 程苗苗，包跃跃，涂春鸣，等. 三相对称系统中 SVC-MERS 注入谐波电流分析[J]. 电源学报，2016，14(1)：18-26.（Cheng Miaomiao，Bao Yueyue，Tu Chunming，et al. Analysis of current harmonics of SVC-MERS in three-phase symmetrical power system. Journal of Power Supply，2016，14(1)：18-26）

[15] 单任仲，尹忠东，肖湘宁，等. 新型正弦脉宽调制控制电压源型动态静止无功补偿器[J]. 中国电机工程学报，2009，29(16)：95-99.（Shan Renzhong，Yin Zhongdong，Xiao Xiangning，et al. Novel sinusoidal pulse width modulation controlled voltage source converter dynamic static var compensator. Proceedings of the CSEE，2009，29(16)：95-99）