

TCSC 次同步谐振阻尼控制器设计

王 敏 康积涛 李 康 卢绍强

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:输电线路采用串联电容补偿存在引起电力系统次同步谐振的危险,TCSC 常用来解决这一问题。基于提升系统电气阻尼的思想,设计了 TCSC 附加阻尼控制器,该控制器针对分模态控制方法存在的不足进行了改进。基于 IEEE SSR 第一标准测试模型的分析表明改进后的控制器能将系统在几乎整个次同步频段内的电气阻尼提高为正,从而消除了该频段内的 SSR 危险。

关键词:TCSC; 次同步谐振; 附加次同步阻尼控制器; 相位补偿; 电气阻尼

Abstract: Subsynchronous resonance (SSR) is a potential danger to power system with series capacitors compensated in transmission lines, so thyristor-controlled series capacitor (TCSC) has always been used to solve the problem. Based on the idea of enhancing system damping, a supplementary subsynchronous damping controller of TCSC is designed, which improves the shortcomings of the sub-modal control method. The simulations carried out on the first benchmark model of the modified IEEE SSR show that the damping controller can increase the electrical damping of almost the whole SSR frequency band to the positive level, that is, the risk of SSR in that frequency band can be mitigated.

Key words: thyristor-controlled series capacitor; subsynchronous resonance; supplementary subsynchronous damping controller; phase compensation; electrical damping.

中图分类号:TM721.4 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)03-0048-04

输电线路中引入串联电容补偿,在增加输电经济效益的同时会引起电力系统的稳定运行问题。当采用了串补的输电系统中的汽轮发电机组受到扰动时,就会因网机耦合而彼此互激,发生次同步谐振(subsynchronous resonance, SSR),导致发电机轴系扭振,严重时造成发电机轴系损坏,破坏电力系统的安全稳定运行。

国内外对次同步谐振的抑制措施进行了广泛而深入的研究,TCSC、SVC 等 FACTS 装置在次同步谐振的抑制研究上也受到了充分的重视。在研究使用 TCSC 抑制次同步谐振方面,国内外学者已经进行了大量的研究^[1-3]。文献[4]的计算表明,TCSC 在一定的导通角下,具有正电阻特性,从而可以缓解次同步谐振;文献[5]提出了 TCSC 主动阻尼控制,通过对 TCSC 的触发调制,提升系统电气阻尼来抑制危险模式的振荡。文献[6]基于 TCSC 设计了一宽带通单通道 SSDC,实现了将整个次同步频率范围的电气阻尼提升为正。

基于提升系统电气阻尼的思想,在 TCSC 开环控制上附加次同步阻尼控制器。该控制器针对分模态控

制方式的不足进行了改进。基于 IEEE SSR 第一标准测试模型^[7]在 PSCAD/EMTDC 中使用测试信号法^[8],分析了该控制器对系统电气阻尼的影响。结果表明,加入该 SSDC 能将系统在几乎整个次同步频段内的电气阻尼提高为正,即消除了该频段内的 SSR 危险。

1 TCSC 抑制 SSR 的基本原理

1.1 TCSC 运行原理

TCSC 的基本结构如图 1 所示,由一个电容器和一个晶闸管控制电抗器(TCR)组成。

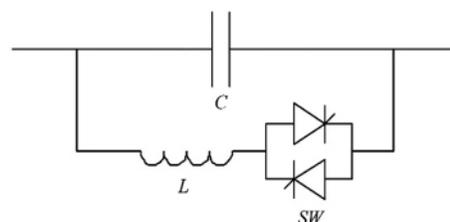


图 1 TCSC 基本模块

稳态运行时,TCSC 的等效基波电抗 X_{TCSC} 与触发角 α 的关系为

$$\begin{cases} X_{TCSC}(\alpha) = X_C - \frac{X_C^2(2\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha)}{\pi(X_C - X_L)} \\ \quad + \frac{4X_C^2 \cos^2 \alpha (\tan \alpha - k \tan k\alpha)}{\pi(k^2 - 1)(X_C - X_L)} \\ k = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \end{cases} \quad (1)$$

式中 X_C 为电容器 C 的基波电抗; X_L 为 $\alpha = 90^\circ$ 时 TCR 的等效基波电抗; k 为 TCSC 主回路特征参数, 一般 $k^2 = 3.3 \sim 10$, 以使触发角 α 变化时, TCSC 只出现一个谐振点。

将 TCSC 电抗 X_{TCSC} 以 X_C 为基值进行标么化, 记 $X_{net} = X_{TCSC} / X_C$ 。

1.2 TCSC 抑制 SSR

由复转矩系数法可知, 在轴系的某一自然扭振频率附近, 若机械子系统所具有的正阻尼不足以抵消电气子系统所产生的负阻尼, 导致系统对该谐振频率的总阻尼系数小于 0, 则系统将会产生不稳定的次同步谐振^[9]。这里考虑将机械阻尼设为 0, 即考虑机械阻尼最差的情况, 这样在轴系的扭振频率附近, 电气阻尼为正即可保证系统 SSR 是稳定的。

电气阻尼定义为^[8]

$$De(\omega) = Re\left(\frac{\Delta T_e}{\Delta \omega}\right) \quad (2)$$

式中 ΔT_e 为发电机电磁转矩增量; $\Delta \omega$ 为发电机转速偏差。可见, 要使电气系统的阻尼为正, ΔT_e 与 $\Delta \omega$ 的相位差必须在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

发电机转速偏差 $\Delta \omega$ 包含了各个振荡模式分量, 因此常选作次同步阻尼控制器的输入信号。SSDC 提升阻尼的原理如图 2 所示, 其中 $\Delta \omega$ 为发电机转速偏差; $\Delta \alpha$ 为 TCSC 触发角增量; ΔT_{eDC} 为产生的发电机电磁转矩增量; $C(s)$ 为 SSDC 的传递函数, $G(s)$ 为 TCSC 触发角增量到 ΔT_{eDC} 的传递函数。

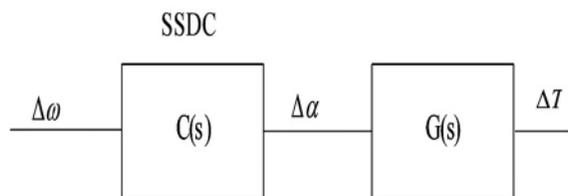


图 2 加入 SSDC 提升阻尼的原理
添加 SSDC 后增加的电气阻尼为^[10]

$$De(\omega) = Re\left(\frac{\Delta T_{eDC}}{\Delta \omega}\right) Re[C(s) * G(s) |_{s=j\omega}] \quad (3)$$

设计 SSDC 基本目标就是通过恰当选择 $C(s)$ 的

参数, 使得模态频率附近 ΔT_{eDC} 与 $\Delta \omega$ 的相位差在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 最终实现将系统电气阻尼提升为正。

2 系统模型

测试模型是基于 IEEE 第一标准测试系统, 并将原系统中部分固定电容用可控串补代替, 线路的总串补度为 60%, TCSC 电抗为线路总电抗的 20%, 安装在线路末端, 如图 3 所示。TCSC 的主回路特征参数 k 取 2.5, 稳态触发角为 157.6° 。发电机轴系采用六轴段模型, 即包含 5 个扭振模式, 分别为 15.71 Hz、20.21 Hz、25.55 Hz、32.28 Hz、47.45 Hz。系统其他参数同文献 [7]。

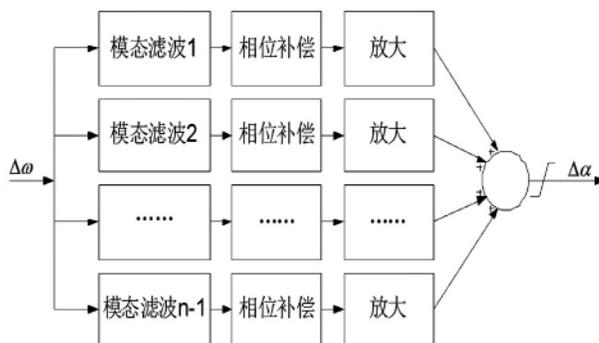


图 3 测试系统模型

3 SSDC 设计

图 3 中测试系统具有 5 个扭振模式, 其中模式 5 由于其模态阻尼非常大, 一般不会发生网机扭振相互作用, 在控制器设计时不考虑对模式 5 的影响, 只针对前 4 个模式。

方案 1: 采用分模态控制。

采用分模态控制方式的 SSDC 如图 4 所示, 图中 n 表示轴段数, 记此控制器为 SSDC1。针对可能发生扭振的 4 个模式, 分别进行滤波、相位补偿及放大处理, 最终叠加、限幅成为控制器的输出, 即 TCSC 触发角的变化。这种控制器最大的优点是针对性强, 各分量间的影响小^[11], 缺点是可能削弱其他频率处的电气阻尼, 引起电网中其他发电机的轴系扭振。

方案 2: 改进模态控制。

分模态控制仅能改善系统在模态频率附近的电气阻尼。针对 SSDC1 存在的不足, 对其进行改进。设计的控制器结构如图 5 所示, 记此控制器为 SS-

DC2。其结构与SSDC1相同,差别在于滤波环节通带较宽。图中的 k ,即为控制器的支路数,与轴段数 n 没有必然的关系。根据系统的特点将次同步频率范围划分为数段,分段补偿相位,提升段内频率处的电气阻尼。各支路阻尼提升效果叠加最终实现将次同步频率的电气阻尼提升为正。

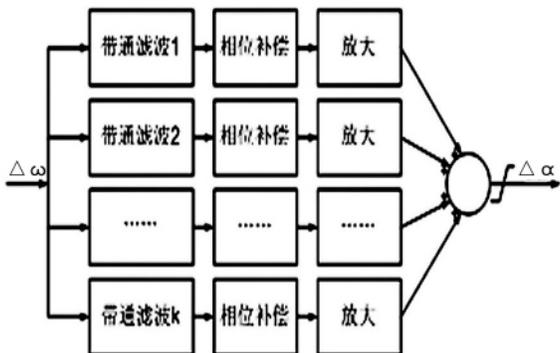


图4 分模态控制SSDC的结构

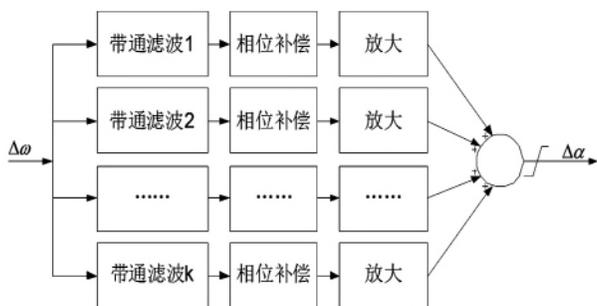


图5 改进模态控制SSDC的结构

各支路中相位补偿环节,补偿 $G(s)$ 及带通滤波引起的相位差。 $G(s)$ 的相位可通过测试信号法得到^[6,10],图6给出了 $X_{net}=1.2, 1.25, 1.3$ (触发角分别为 $158.8^\circ, 157.6^\circ$ 和 156.6°)时的 $G(s)$ 相位曲线,其中发电机运行状态为满载,功率因数等于0.9(滞后)。

相位补偿环节采用形如 $(1 + saT)/(1 + sT)$ 的超前(滞后)环节,当 a 大于1时为超前环节,小于1为滞后环节,其计算公式如下。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1 + \sin\varphi_m}{1 - \sin\varphi_m} \\ T = \frac{1}{\omega_m \sqrt{\alpha}} \end{cases}$$

式中 ω_m 为补偿点角频率; φ_m 为补偿点的相角,即最大超前(滞后)角。

SSDC1由于需要相位补偿的频率范围很窄,其相位补偿选择相对简单。将各自的补偿点分别设为各模态频率点,并选择合适的补偿角度即可。SSDC1参

数见表1。模式4附近频率由于相位滞后很小,故不设置相补环节。各个模式的滤波及相补环节如表1。

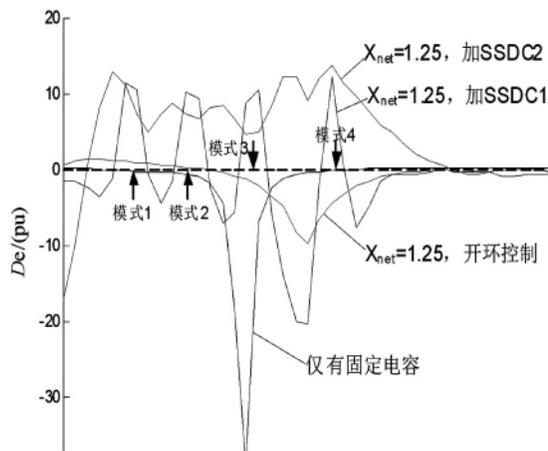


图6 $G(s)$ 的相位特性

表1 SSDC1参数

模式	通带 /Hz	补偿频率点 /Hz	$\varphi_m /^\circ$	环节个数	放大倍数
1	14 ~ 17	15.71	-35	2	10 000
2	19 ~ 22	20.21	-47.5	2	10 000
3	24 ~ 27	25.55	-41.5	2	5 000
4	31 ~ 34	-	-	-	1 000

注: - 表示无此环节

针对本系统中发电机轴系的特点,设计SSDC2时将次同步频率分为4段,即SSDC2包含4个支路。各支路分别提升段内频率的电气阻尼。SSDC2的前3个支路由于 $G(s)$ 在模式3之前频率范围内变化缓慢,其设计思路与SSDC1相同,不再赘述。第4支路在15 Hz处用4个滞后环节补偿 -200° ,并用3个超前环节在90 Hz处补偿 135° ,以改善该通带频率段内的负阻尼,使从模式1到模式4的整个频率段内的电气阻尼都大于0。各个支路的滤波、相补及放大环节参数如表2。

表2 SSDC2参数

模式	通带 /Hz	补偿频率点 /Hz	$\varphi_m /^\circ$	环节个数	放大倍数
1	10 ~ 17	15.71	-35	1	5 000
2	17 ~ 25	20.21	-47.5	2	18 000
3	20 ~ 31	25.55	-41.5	1	5 000
4	30 ~ 60	15	-50	4	60 000
		90	45	3	

4 仿真分析

4.1 电气阻尼分析

选择 TCSC 的稳态触发角为 157.6° 即 $X_{net} = 1.25$ 。发电机运行状态为满载,功率因数等于 0.9(滞后)。为验证所设计的 SSDC 抑制 SSR 的有效性,考虑以下 4 种运行工况。

工况 1: TCSC 不投入,即 TCSC 等效为固定电容。

工况 2: TCSC 投入,采用开环控制。

工况 3: TCSC 投入,在开环控制上附加 SSDC1。

工况 4: TCSC 投入,在开环控制上附加 SSDC2。

采用测试信号法分析了 4 种工况下的电气阻尼,如图 7 所示。可以看到,全部采用固定电容补偿时,系统在 4 个模式附近的电气阻尼都为负,系统 SSR 不稳定。工况 2 下,TCSC 的投入引起系统谐振频率的右移,模式 1、2 附近的电气阻尼有所增大,但在模式 3、4 附近的阻尼为负,系统仍为 SSR 不稳定。工况 3 加装所设计的 SSDC1 后,各个模式频率处的电气阻尼均为正。而工况 4 加装所设计的 SSDC2 后,从 13 Hz 到 40 Hz 内的电气阻尼均为正,相对采用分模态控制思想设计的 SSDC1,阻尼为正的的范围不再局限在模式频率附近,亦即消除了这一整个频率段内的 SSR 危险。

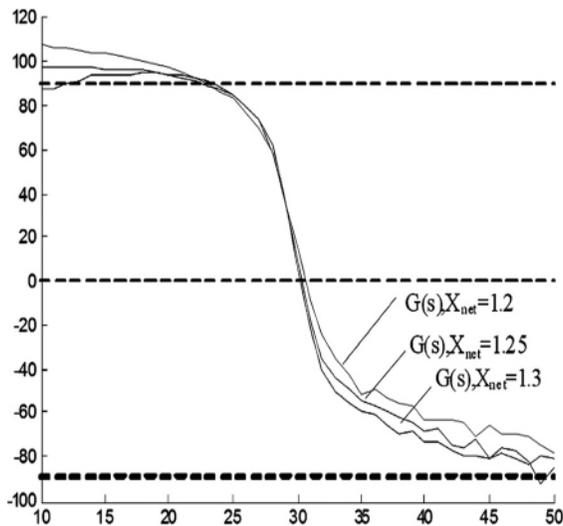


图 7 4 种工况下的电气阻尼曲线

4.2 暂态时域仿真

为进一步验证 SSDC2 抑制 SSR 的有效性,利用 PSCAD/EMTDC 对图 3 所示系统进行时域仿真。发电机轴系采用六轴段模型,机械阻尼设为 0。待系统进入稳态后 $t = 2.5$ s 时刻,图 3 中母线 B 发生三相接地短路故障,故障持续 0.05 s 后切除。图 8 给出了系统在工况 4 下的各轴段间的扭矩,可以看出在使用了所设计的 SSDC2 之后,各轴段间的扭矩逐

渐衰减并最终回到原稳态,系统 SSR 稳定。

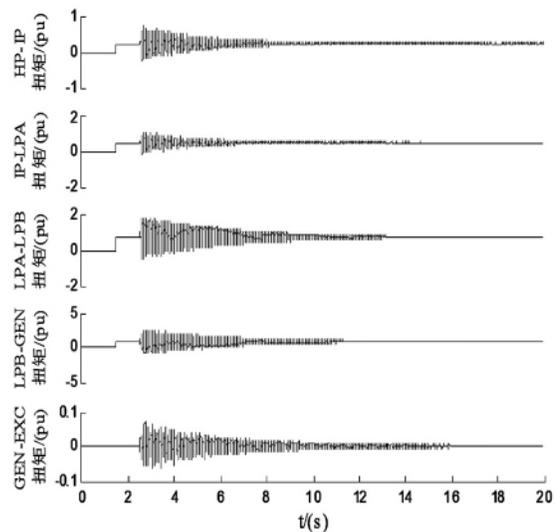


图 8 工况 4 加 SSDC2 后发电机轴段扭矩

5 结论

基于提升系统电气阻尼的思想,设计了 TCSC 次同步阻尼控制器。该控制器针对分模态控制方式的不足进行了改进。结果表明,加入该控制器能将系统在几乎整个次同步频段内的电气阻尼提高为正,即消除了该频段内的 SSR 危险,因而具有很强的工程实用性和通用性。

参考文献

- [1] S. S. Choi, F. Jiang, G. Shrestha. Suppression of Transmission System Oscillations by Thyristor - controlled Series Compensation [J]. IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib. 1996, 143(1): 7 - 12.
- [2] Brian K. Perkins, M. R. Irvani. Dynamic Modeling of a TCSC with Application to SSR Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1619 - 1625.
- [3] 葛俊, 童陆园, 耿俊成, 等. TCSC 抑制次同步谐振的机理研究及其参数设计 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 25 - 29.
- [4] 吕世荣, 刘晓鹏, 郭强, 等. TCSC 对抑制次同步谐振的机理分析 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 14 - 18.
- [5] 周长春, 刘前进, Lennart Ångquist, 等. 抑制次同步谐振的 TCSC 主动阻尼控制 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 130 - 135.
- [6] 郑翔, 徐政, 张静. TCSC 次同步谐振附加阻尼控制器 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 181 - 186.

(下转第 91 页)

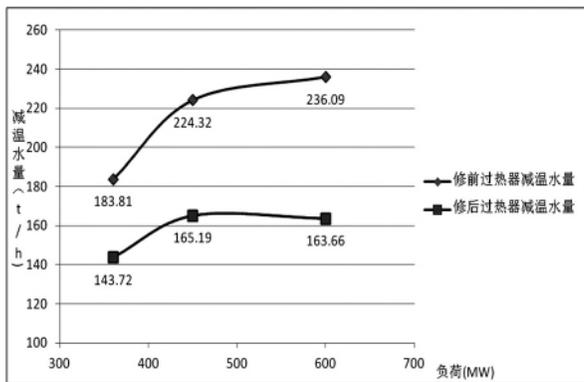


图2 过热器减温水量与负荷关系曲线

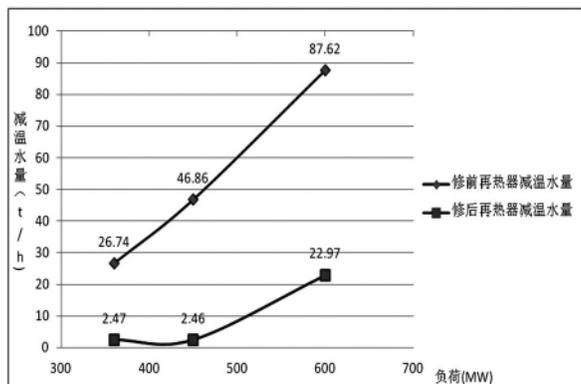


图3 再热器减温水量与负荷关系曲线

试验结果表明:大修后锅炉效率在600 MW 工况下为91.16%,450 MW 工况下为89.98%,360 MW 工况下为89.49%。

试验结论:600 MW 工况大修后锅炉效率比大修前(机组负荷550 MW)提高了1.52%,450 MW 工况大修后锅炉效率比大修前提高了1.27%,360 MW 工况大修后锅炉效率比大修前提高了1.33%。大修后锅炉效率提高明显。

2.3.2 大修前后减温水流量比较

每一次试验工况调整后,应保证锅炉主要运行参数在允许波动范围之内,试验测试时间为2 h,试验期间锅炉燃烧工况、燃料量、主蒸汽流量、再热蒸

汽流量、给水流量、汽包水位、过量空气系数及制粉系统投运方式等尽可能保持稳定运行,试验中过热器减温水流量及再热器减温水流量测试见表5。

试验结果表明:大修后在600 MW 工况下,过热器减温水流量为163.66 t/h,再热器减温水流量为22.97 t/h,再热器和过热器减温水总量为186.63 t/h;在450 MW 工况下,过热器减温水流量为165.19 t/h,再热器减温水流量为2.46 t/h,再热器和过热器减温水总量为167.65 t/h;在300 MW 工况下,过热器减温水流量为143.72 t/h,再热器减温水流量为2.47 t/h,再热器和过热器减温水总量为146.19 t/h。

试验结论:600 MW 工况下,大修后过热器减温水流量比大修前减少72.43 t/h,再热器减温水流量减少64.65 t/h,减温水总量比大修前减少137.08 t/h;450 MW 工况下,大修后过热器减温水流量比大修前减少59.13 t/h,再热器减温水流量减少44.4 t/h,减温水总量比大修前减少103.53 t/h;360 MW 工况下,大修后过热器减温水流量比大修前减少40.09 t/h,再热器减温水流量减少24.26 t/h,减温水总量比大修前减少64.36 t/h;此次A级检修对大修前机组减温水量偏高的针对性改造效果明显。

3 结 论

试验证明,DG2028/17.45-II5型锅炉受热面改造是成功的,具有重要意义。对国内已经投产的机组,通过改造,可以有效降低供电煤耗,提高机组效率;对出口海外的机组,在制造阶段就有针对性的改变设计,有利于机组通过性能考核试验,从而达到顺利移交的目的。

(收稿日期:2012-02-15)

(上接第51页)

[7] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.

[8] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.

[9] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[10] 张静, 徐政, 郑翔, 等. SVC抑制SSR的机理及控制器

设计 [J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 57-61.

[11] 张丹. 高压直流输电系统次同步振荡的特征值分析与控制 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.

作者简介:

王敏(1988),男,西南交通大学硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

康积涛(1962),男,教授,主要从事电力调度自动化系统、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期:2012-01-19)