

FACTS装置中多个控制器之间的交互影响分析

董萍¹, 李海琛²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 控制器的设计决定FACTS装置的动静态性能。随着FACTS装置在电力系统中的广泛应用, 为保证电力系统的稳定运行, 电力系统中同一FACTS装置的不同控制通道之间是否存在交互影响的问题需要加以考虑。分析了单机无穷大系统中的单个FACTS装置(如STATCOM和SVC)中的阻尼控制回路和电压控制回路之间的交互影响。基于所建立的系统分析模型, 从机理上说明STATCOM和SVC的2个控制回路之间是否存在交互影响。最后用BPA软件仿真验证了分析结果。

关键词: 柔性交流输电; 阻尼控制; 交互影响

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)01-0059-05

Interaction Effect of Multiple Controllers in FACTS Device

Dong Ping¹, Li Haichen²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Green Energy Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The controller design determines dynamic and static performance of the FACTS devices. With the FACTS devices widely used in the power system, the interaction effect of multiple controllers in one FACTS device should be considered in order to make the power system more stability. The interaction between the damping control loop and voltage control loop of one FACTS device in single machine infinite bus power system is analyzed. Based on the analysis model of the system, the interaction of the two controller in STATCOM and SVC existed or not is expounded. Finally, the results are verified by BPA software simulation.

Keywords: FACTS; damping control; interaction effect

0 引言

柔性交流输电(flexible AC transmission system, FACTS)技术是增强输配电系统的可控性和灵活性、提高运行稳定性和经济性的重要手段^[1]。最近十几年, 众多性能各异的FACTS装置, 如可控串联补偿器(thyristor-controlled series capacitor, TCSC)、固定串补(fixed series capacitor, FSC)、静态无功补偿器(static voltage controller, SVC)、统一潮流控制器(unified power

flow controller, UPFC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)等, 先后被投入美国、欧洲、日本的实际电网中。随着投产的玉林串补、桂林串补, 超高压公司投产的串补站数量将达到7个^[2], 装置将达到14套。与此同时, 世界上容量最大的TCR型SVC于2009年在500 kV梧州变电站投入运行, 到2010年南方电网有4套SVC及1套STATCOM装置投入运行。FACTS装置在南方电网主网架将发挥越来越大的作用

收稿日期: 2010-11-02

基金项目: 中国南方电网有限责任公司2010年重点科技基金资助项目(201044000209106)

作者简介: 董萍(1978-), 女, 安徽阜阳人, 华南理工大学讲师, 博士, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用, 新能源及微电网技术, E-mail: epdping@scut.edu.cn

和影响力,并将具有更广阔的应用前景。

FACTS装置的动静态性能在很大程度上依赖于控制器的设计^[3]。随着FACTS装置在电力系统中的广泛应用,在FACTS装置的控制器设计中有一个问题必须加以考虑:电力系统中同一FACTS装置的不同控制通道之间是否存在交互影响的问题。近年来越来越多的研究表明^[4-7]:单个FACTS装置的多个控制回路之间、多台FACTS装置之间以及FACTS装置与电力系统其它控制设备,如(特)高压直流输电系统(HVDC)^[8-9]、电力系统稳定器(PSS)^[10]、电压调节器(AVR)^[11]等,之间确实存在一定的交互影响,并将对电力系统的运行和控制产生重大影响,严重时可能使FACTS装置的控制性能恶化,甚至导致系统失稳。文献[12]分析了SVC装置的电压控制与附加阻尼控制间的负交互影响,研究表明SVC装置在实现电压控制和阻尼控制这两个目标上经常是相互抵触的。文献[13]指出了STATCOM中交流和直流控制回路间也可能存在负交互影响,严重时可导致系统失稳。

本文详细分析了STATCOM及SVC装置中阻尼控制与电压控制回路之间的交互影响,并从机理上说明其存在交互影响的原因,最后采用BPA软件对结论进行仿真验证。

1 机理分析

交互影响的定义为^[14]:“在一个多变量控制系统中,交互影响是指在传输中,某个操作输入变量影响一系列测量输出变量,或者是某个输出被许多输入变量所影响。”此外,如果该交互影响增强了控制效果,则称这种交互影响为正交互,否则,称为负交互。系统采用IEEE单机无穷大系统,系统结构如图1所示。安装了STATCOM及SVC的单机无穷大系统分别如图2中a)和b)所示。

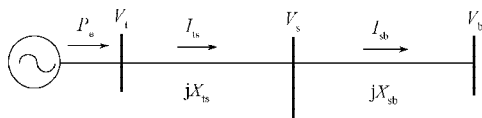
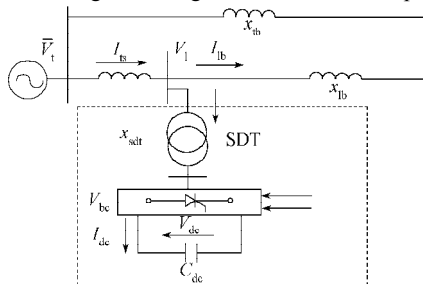
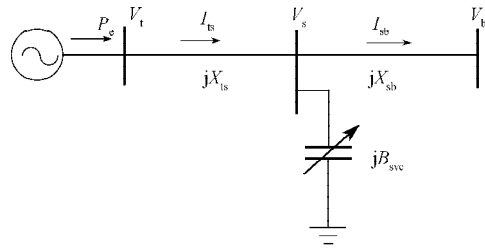


图1 单机无穷大系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of single machine infinite bus power system



a) 单机无穷大系统接 STATCOM



b) 单机无穷大系统接 SVC

图2 单机无穷大系统接 FACTS 装置

Fig. 2 FACTS device in single machine infinite bus power system

1.1 单机无穷大系统接 STATCOM

STATCOM采用模型:

$$T_s \frac{dI_s}{dt} = -I_s + \frac{K_p}{X_T} (V_{ref} - V) - \frac{V_T}{X_T}, \quad (1)$$

式(1)中, V_{ref} 为 STATCOM 侧参考电压幅值, V 为 STATCOM 侧实际电压幅值, V_{scs} 为阻尼控制输入信号, I_s 为 STATCOM 注入控制节点的电流幅值。如图3所示。

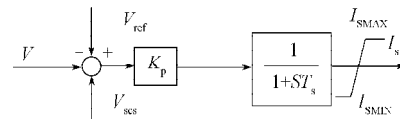


图3 STATCOM 模型

Fig. 3 Model of STATCOM

线性化后的模型如图4所示。

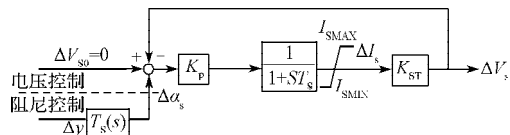


图4 线性化后的 STATCOM 模型

Fig. 4 Linearized model of STATCOM

其中阻尼控制回路 $T_s(s)$ 表达式如式(2),

$$T_s = K_s \frac{sT_w(1+sT_2)}{(1+sT_w)(1+sT_1)} \quad (2)$$

未安装 STATCOM 装置系统电压如式(3)所示,

$$\bar{V}_t = V_b + j(X_{ts} + X_{sb})\bar{I}_{ts} \quad (3)$$

发电机有功输出 P_e 如式(4)所示,

$$P_e = \frac{E'_q V_b \sin \delta}{X_{d\Sigma}} - \frac{V_b^2 (X_q - X'_d) \sin 2\delta}{2X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \approx \frac{E'_q V_b \sin \delta}{X_{d\Sigma}} \quad (4)$$

其中,

$$X_{d\Sigma}' = X'_d + X_{ts} + X_{sb}, \quad X_{q\Sigma} = X_q + X_{ts} + X_{sb} \quad (5)$$

安装 STATCOM 装置后,系统电压表示为式(5),

$$\bar{V}_s = V_b + jX_{sb}(\bar{I}_{ts} + \bar{I}_s) \quad (5)$$

发电机有功输出 P_e 如式(6)所示,

$$P_e \approx \frac{E'_q [V_s - jX_{sb}(I_{ts} + I_s)] \sin \delta}{X'_{d\Sigma}} \quad (6)$$

根据线性化的 STATCOM 模型和式 (5) ~ (6), 有

$$\Delta V_s (\Delta I_s) = jX_{sb} \Delta I_s = K_{ST} \Delta I_s, \quad (7)$$

$$\Delta P_e (\Delta I_s) \approx -\frac{jE'_{q0} X_{sb} \sin \delta_0}{X'_{d\Sigma}} j \Delta I_s = K_{pe} \Delta I_s. \quad (8)$$

由式 (7) ~ (8) 可知, 系统确定后参数 K_{ST} , K_{pe} 均为常数, 则

$$T_{ST}(s) = \frac{K_p K_{ST}}{sT_a + 1 + K_p K_{ST}}. \quad (9)$$

当 STATCOM 参数 K_p 确定后, 电压控制传递函数即已确定, 此时改变阻尼控制参数 K_s 对电压控制无影响。因此, STATCOM 电压、阻尼控制器之间不存在交互影响。

1.2 单机无穷大系统接 SVC

如图 1 所示, 未安装 SVC 装置系统电压如式 (5), 发电机有功输出 P_e 如式 (6) 所示。

安装 SVC 装置后, 系统电压表示为式 (10),

$$\bar{V}_s = \frac{V_b + jX_{sb} \bar{I}_{sb}}{1 - X_{sb} B_{SVC}}. \quad (10)$$

由电压方程 $\bar{V}_t = \bar{V}_s + jX_{ts} \bar{I}_{ts}$, 可得:

$$\bar{V}_t = \frac{V_b}{1 - X_{sb} B_{SVC}} + j \left(X_{ts} + \frac{X_{sb}}{1 - X_{sb} B_{SVC}} \right), \quad (11)$$

$$\bar{V}_s = \frac{V_b + \frac{X_{sb}}{X_{ts}} \bar{V}_t}{1 + \frac{X_{sb}}{X_{ts}} - X_{sb} B_{SVC}}. \quad (12)$$

对比式 (5) ~ (11) 可看出, 安装 SVC 装置后的系统等效为未安装 SVC 装置的系统, 其中发电机到无穷大母线的线路电抗为 $X_{ts} + \frac{X_{sb}}{1 - X_{sb} B_{SVC}}$, 无穷大母线电压为

$\frac{V_b}{1 - X_{sb} B_{SVC}}$, 将式 (10) 中的 $X_{ts} + X_{sb}$ 和 V_b 用 $X_{ts} + \frac{X_{sb}}{1 - X_{sb} B_{SVC}}$ 和 $\frac{V_b}{1 - X_{sb} B_{SVC}}$ 代替, 可得:

$$P_e \approx \frac{E'_q V_b \sin \delta}{X'_{d\Sigma} - X_{sb} B_{SVC} (X'_d + X_{ts})}. \quad (13)$$

线性化后的 SVC 装置的模型如图 5 所示。

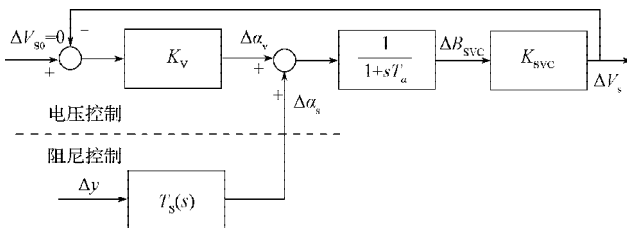


图 5 线性化 SVC 装置模型

Fig. 5 Linearized Model of SVC

由 SVC 线性化模型可知:

$$T_{SVC}(s) = \frac{K_V K_{SVC}}{sT_a + 1 + K_V K_{SVC}}, K_{SVC} > 0. \quad (14)$$

根据图 5 和式 (12) ~ (13) 有:

$$\Delta V_s (\Delta B_{SVC}) = \frac{X_{sb} \sqrt{\left(V_b + \frac{X_{sb}}{X_{ts}} V_{td0} \right)^2 + \left(\frac{X_{sb}}{X_{ts}} V_{tq0} \right)^2}}{\left(1 + \frac{X_{sb}}{X_{ts}} - X_{sb} B_{SVC0} \right)^2} \Delta B_{SVC} = K_{SVC} \Delta B_{SVC}, \quad (15)$$

$$\Delta P_e (\Delta B_{SVC}) \approx \frac{X_{sb} (X'_d + X_{ts}) E'_{q0} V_{b0} \sin \delta_0}{\left[X'_{d\Sigma} - X_{sb} B_{SVC0} (X'_d + X_{ts}) \right]^2} \Delta B_{SVC} = K_{pe} \Delta B_{SVC}. \quad (16)$$

设 SVC 阻尼控制的反馈信号 Δy 可用发电机转速 $\Delta \omega$ 表示, 即 $\Delta y = T_{Ry}(s) \Delta \omega$, SVC 稳定信号的频域可分解为:

$$\Delta \alpha_s = T_s(j\omega_s) T_{Ry}(j\omega_s) \Delta \omega = K_D \Delta \omega + K_S \Delta \delta, \quad (17)$$

其中, ω_s 为系统震荡角频率。由式 (16), 作用于发电机的仅与 K_{pe} 有关, 来自 SVC 阻尼控制的直接电气转矩为:

$$\Delta T_E = K_{pe} \Delta B_{SVC} = \frac{K_{pe}}{j\omega_s T_a + 1 + K_{SVC} K_V + 1} \Delta \alpha_s \approx \frac{K_{pe}}{K_{SVC} K_V + 1} T_s(j\omega_s) T_{Ry}(j\omega_s) \Delta \omega = \frac{K_{pe}}{K_{SVC} K_V + 1} (K_D \Delta \omega + K_S \Delta \delta). \quad (18)$$

SVC 阻尼控制效果取决于其阻尼转矩:

$$\Delta T_D = \frac{K_{pe}}{K_{SVC} K_V + 1} K_D \Delta \omega, \quad (19)$$

由式 (16) 可知, 要想使 SVC 具有较好的电压控制效果, $K_{SVC} K_V$ 应取为较大值, 而从式 (18) 可看出, 取值较大将会影响 SVC 装置阻尼控制效果。由式 (18) 可得:

$$\Delta \alpha_v = -K_{SVC} K_V \Delta B_{SVC} = \frac{-K_{SVC} K_V}{1 + K_{SVC} K_V} \Delta \alpha_s. \quad (20)$$

从式 (20) 可看出, SVC 电压阻尼控制之间存在本质负交互影响。

2 仿真分析

2.1 单机无穷大系统接 STATCOM

STATCOM 的仿真参数为: $K_p=20$, $T_s=0.08$, $T_1=0.5$ s, $T_2=0.077$ s, $T_w=10.0$ s。

设定故障为 $t=0.1$ s 母线 2 处发生三相短路故障, 持

续时间0.1 s后故障消失, 仿真时间10 s分别取STATCOM阻尼控制回路中 $K_s=0.25, 0.5, 0.75, 1$, 对比4种情况下母线2电压以及发电机功角曲线。

对比图6和图7可知, 保持STATCOM控制器其它参数不变, 分别设阻尼控制器参数 $K_s=0.25, 0.5, 0.75, 1$ 的4种情况下: 节点2电压波形基本保持不变; 随着阻尼控制参数 K_s 增大, 发电机功角震荡逐渐减小。可见, STATCOM电压、阻尼控制器之间基本不存在交互影响。

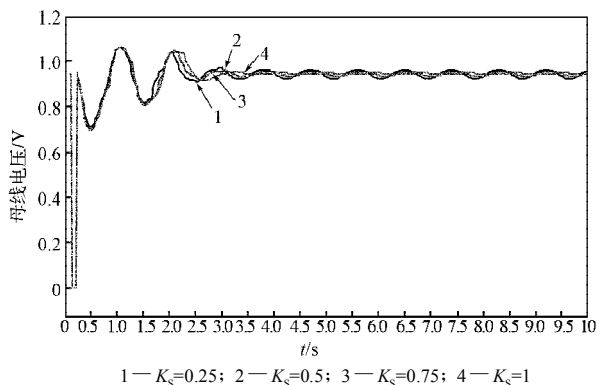


图6 4种情况母线电压曲线

Fig. 6 Bus voltage curves of four simulation conditions

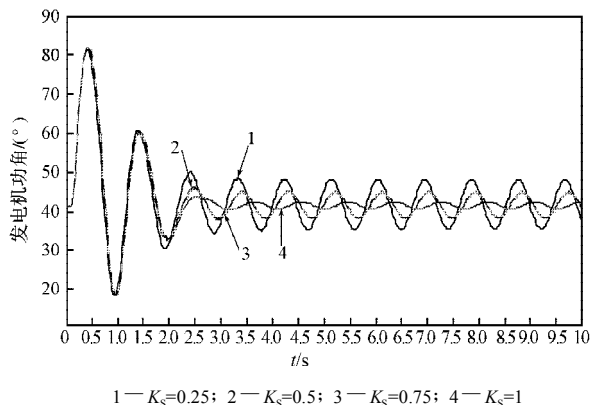


图7 4种情况发电机功角震荡曲线

Fig. 7 Generator power-angle shock curves of four simulation conditions

2.2 单机无穷大系统接 SVC

SVC系统的仿真参数为: $K_v=1, T_\alpha=0.1, K_{svc}=50, T_1=0.5\text{ s}, T_2=0.077\text{ s}, T_3=0.9\text{ s}, T_4=0.053\text{ s}, T_w=10.0\text{ s}$ 。

设定故障为 $t=0.1\text{ s}$ 母线2处发生三相短路故障, 持续时间0.1 s后故障消失, 仿真时间20 s。分别取SVC阻尼控制回路中 $K_s=0.1, 0.5, 1$, 对比3种情况下母线2电压以及发电机功角曲线。

对比图8, 9可知, 保持SVC控制器其他参数不变, 分别设阻尼控制器参数 $K_s=0.1, 0.5, 1$ 的3种情况下: 当 $K_s=0.1$ 时, 系统电压跌落最快, 发电机功角震荡最剧烈, 受功角震荡影响, $t=4\sim 9\text{ s}$ 时母线2电压也会波动,

但波动幅度较小; 当 $K_s=1$ 时, 电压跌落最慢, 发电机功角震荡最小; $K_s=0.5$ 的情况介于两者之间。由此可说明, SVC装置电压和阻尼控制器间存在负交互影响。

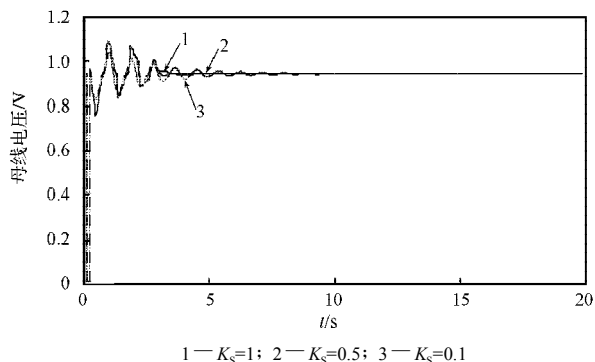


图8 3种情况母线电压曲线

Fig. 8 Bus voltage curves of three simulation conditions

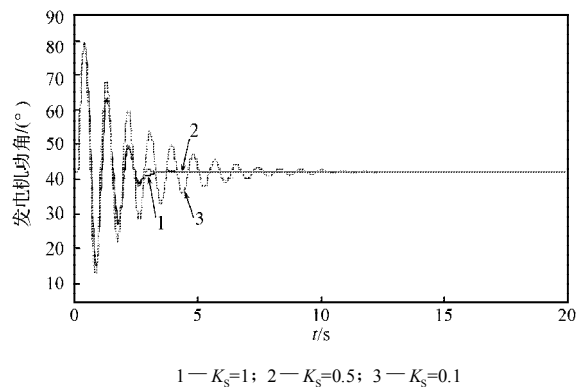


图9 3种情况发电机功角震荡曲线

Fig. 9 Generator power-angle shock curves of three simulation conditions

3 结语

本文分析了单个FACTS装置 (STATCOM和SVC) 中阻尼控制和电压控制回路之间的交互影响。以单机无穷大系统为例, 从机理上证明了STATCOM的阻尼回路与电压控制回路之间不存在交互影响, SVC的阻尼回路与电压控制回路之间存在本质交互影响。此处用的分析方法也适用于其它的FACTS装置。最后, 本文采用了BPA对结果进行了仿真验证。

参考文献:

- [1] Mathur R M, Varma R. Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems[M]. New York: IEEE Press, 2002: 1-8.
- [2] 祝谦, 刘相枪. 平果可控串补本体保护介绍[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 73-77.
Zhu Qian, Liu Xiangqiang. Protection System of TCSC

- Installed in Pingguo Series Compensation Station[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 73-77.
- [3] 赵贺. 电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 38-44.
Zhao He. Application of Power Electronics in Power System——Flexible AC Transmission System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [4] Martins N, Corsi S, Ndersson G, et al. Impact of the Interaction among Power System Controls[EB/OL]. [2010-09-10]. http://www.nelsonmartins.com/pdf/Publications/1998_VI_SEPOPE_CIGRE.pdf, 2007211201.
- [5] Wang H F, Swift F J, Li M. A Unified Model for the Analysis of FACTS Devices in Damping Power System Oscillations Part II: Multi-Machine Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1355-1362.
- [6] 张琳. FACTS控制器间的交互影响分析及控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
Zhang Lin. Research on Interactions Analysis and Control Strategy of Multiple FACTS Controllers in Power System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [7] 吴昊, 叶彬, 曹一家. 装有 SVC 和 STATCOM 的电力系统线性模型及控制器交互影响[J]. 江南大学学报, 2004, 3(2): 134-139.
Wu Hao, Ye Bin, Cao Yijia. Phillips-Heffron Model of Power System Installed with SVC and STATCOM and Analysis of Interaction[J]. Journal of Southern Yangtze University: Natural Science Edition, 2004, 3(2): 134-139.
- [8] Hingorani N G. Power Electronic Equipment: HVDC and FACTS[R]. Paris: CIGRE(International Council On Large Electric Systems), 1994.
- [9] Long W F, Edris A A. Basic Mechanisms of Control Interactions among Power Electronic-Assisted Power Systems [C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Atlanta: GA, 2001: 397-402.
- [10] Mithulananthan N, Canizares C A, Reeve J. Tuning, Performance and Interactions of PSS and FACTS Controllers [C]//2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago: IL, 2002: 981.
- [11] Irvani M R, Chandhary A K S, Giesbrecht W J, et al. Modelling and Analysis Guidelines for Slow Transients. II. Controller Interactions; Harmonic Interactions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1672-1677.
- [12] Wang H F. Interaction Analysis and Co-Ordination of SVC Voltage and Damping Control[C]//International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000. London: City University, 2000: 4-7.
- [13] Wang H F. Interaction and Multivariable Design of STATCOM AC and DC Voltage Control[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2003, 25(5): 387-394.
- [14] 曹一家, 陶佳, 王光增, 等. FACTS控制器间交互影响及协调控制研究进展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 1-8.
Cao Yijia, Tao Jia, Wang Guangzeng, et al. Research Progress on Interaction and Coordinated Control Among FACTS Controller[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Its Automation, 2008, 20(1): 1-8.
- [15] 中国电力科学研究院. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[S]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
China Electric Power Research Institute. User's Manual of PSD-BPA Transient Stability Software Program[S]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2007.

(责任编辑: 罗立宇)