

TCSC鲁棒自适应控制器的非线性逆推设计

朱林¹, 蔡泽祥¹, 兰洲², 刘皓明³, 倪以信⁴, 徐政⁵

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 浙江大学 电气学院, 浙江 杭州 310027;

3. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096; 4. 香港大学 电机电子工程系, 香港;

5. 清华大学深圳研究生院 电力系统国家重点实验室深圳研究室, 广东 深圳 518055)

摘要: 设计了一种应用于互联电网的TCSC鲁棒自适应调制控制器(RAMC). 该控制器采用广域测量系统中的全局信号, 旨在对各区域的惯量中心进行控制并保持同步运行. 采用反推法推导了控制规律, 并在2区域4机系统中进行了控制器性能检测. 仿真结果显示, 该控制器可有效阻尼互联电力系统间的机电振荡, 与传统的控制器相比具有良好的性能.

关键词: 晶闸管控制的串联电容器; 电力系统稳定; 鲁棒自适应控制; 反步法; 惯量中心

中图分类号: TP273, TM712, TM76 **文献标识码:** A

A robust adaptive modulation controller design based on back-stepping for TCSC

ZHU Lin¹, CAI Ze-xiang¹, LAN Zhou², LIU Hao-ming³, NI Yi-xin⁴, XU Zheng⁵

(1. Department of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China;

3. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

4. Department of Electrical Engineering, The University of Hong Kong, Hongkong;

5. National Key Laboratory of Power System in Shenzhen, Graduate School at Shenzhen Tsinghua University, Shenzhen Guangdong 518055, China)

Abstract: A robust adaptive modulation controller (RAMC) of TCSC (thyristor controlled series capacitor) is proposed to achieve superior performance for enhancing the inter-area stability. The controller based on global signals of wide area measurement system(WAMS) is applied to the center of inertial for keeping synchronization. The control strategy using back-stepping method for damping the electromechanical system is then derived, and its performance is tested through a two-area four-machine power system. Controllers are tested in an 2-area interconnected 4-machine system. The simulation results show that this new controller has satisfactory performance in comparison with conventional controllers.

Key words: TCSC; power system stability; robust adaptive control; back-stepping; COI

1 引言(Introduction)

为增强互联电力系统的稳定性并有效提高系统的输送极限, 一个经济可行的方案就是在长距离联络线上安装FACTS设备^[1]. FACTS借助于大功率电力电子元件, 可提供优质、快速的控制, 能有效的增强电力系统的可控性. 然而, FACTS设备控制规律的推导和控制器间的相互协调等工作较为繁重. 因此, 对FACTS设备的控制方式进行研究进而提高其性能, 具有重要的现实意义.

晶闸管可控串联电容补偿器(TCSC)属于串联型FACTS设备, 可被视为一个变阻抗元件, 通过控制

联络线阻抗参数来控制线路功率传送. TCSC的辅助控制是指在主控制中加入调制信号, 能有效抑制线路上的功率振荡并增强系统的动态稳定性. TCSC的传统辅助控制器设计采用的是近似线性化模型, 在系统大扰动情况下性能不佳^[2,3]. 反馈线性化方法需要系统的精确模型, 而在实际电力系统中难以获得^[4~6]. 同时, 电力系统中存在缓慢变化或不确定参数, 因此要求控制器具有较强的鲁棒性和一定的自适应能力. 逆推法(back-stepping)是一种非线性控制设计方法, 它把选择Lyapunov函数与设计反馈控制交织在一起. 与自适应控制结合, 可较好地处理带

有不确定参数的系统^[7,8]. 文献^[8~11]介绍了相关工作, 但设计的控制器缺少在大系统下的有效检验.

本文利用逆推法推导了一种基于WAMS信号的TCSC鲁棒自适应控制规律. 该方案旨在将送受端的惯量中心(center of inertial)进行控制保持同步运行. 新型控制器将发电机阻尼系数作为未知参数, 并考虑了模型的误差及未知扰动. 与传统的调制控制器相比, 提高了区域联络线的输电极限, 有效阻尼了区域间功率振荡. 同时还具备以下两个优点: 1) 对于两侧子系统的模型及复杂程度不敏感, 易推广至多区域互联系统中; 2) 跟踪各区域的COI信息, 可解决和其他各控制器的协调问题. 最后在多机系统下进行仿真测试, 证明了控制器的有效性.

2 数学模型(Mathematical model)

如图1所示, 区域A和区域B经两条输电线路互联, 其中一条交流线路采用固定电容补偿, 另外一条线路接入TCSC.

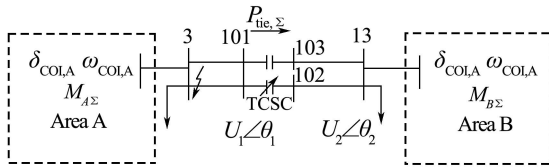


图1 含TCSC的系统等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of system with TCSC

考虑发电机转子的动态方程, 以区域A中的第*i*台机为例, 应有:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{Ai} = \omega_{Ai} - \omega_0, i = 1, 2, \dots, N_A, \\ M_{Ai} \dot{\omega}_{Ai} = \omega_0 (P_{m,Ai} - P_{e,Ai}) - D_{Ai} (\omega_{Ai} - \omega_0). \end{cases} \quad (1)$$

其中: δ_{Ai} 与 ω_{Ai} 为发电机的转子角和角速度; $P_{m,Ai}$ 和 $P_{e,Ai}$ 是发电机的机械功率和电磁功率; M_{Ai} 为发电机转子的惯性时间常数; D_{Ai} 为阻尼系数; $\omega_0 = 2\pi f_0$ ($f_0 = 50$ Hz)为转子基准速度; N_A 为区域A的发电机总台数. 除 M_{Ai} , t 的单位为s, ω_0 , ω_{Ai} 单位为rad/s外其他均为标值.

区域惯量中心的角度和角速度定义如下, 以区域A为例:

$$\begin{cases} \delta_{COI,A} = \frac{1}{M_{A\Sigma}} \sum_{i=1}^{N_A} M_{Ai} \delta_{Ai}, \\ \omega_{COI,A} = \frac{1}{M_{A\Sigma}} \sum_{i=1}^{N_A} M_{Ai} \omega_{Ai}. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\delta_{COI,A}$, $\omega_{COI,A}$ 为区域A惯量中心的角度和角速度; $M_{A\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_A} M_{Ai}$ 为区域A惯量中心的惯性时间常数.

根据式(1)和(2), 可以得到区域A惯量中心的动

态方程:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{COI,A} = \omega_{COI,A} - \omega_0, \\ \dot{\omega}_{COI,A} = \frac{1}{M_{A\Sigma}} [\omega_0 (P_{m,A\Sigma} - P_{e,A\Sigma}) - \sum_{i=1}^{N_A} D_{Ai} (\omega_{Ai} - \omega_0)]. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $P_{m,A\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_A} P_{m,Ai}$ 为区域A的总机械功率, $P_{e,A\Sigma} = P_{LA} + P_{LossA} + P_{tie,\Sigma}$ 为区域A内的总有功功率, 包括该区内的总有功负荷, 总有功损耗及联络线上流出的净有功功率.

同理, 可推导区域B的COI动态方程.

本文采用一阶惯性环节来描述TCSC本身的动态, 如图2所示. 其中 τ , X_{TCSC} 和 X_{ref} 分别为TCSC的惯性时间常数、输出电抗和参考电抗值; u 为附加控制信号, 其控制规律即为本文的研究内容. 由于广域测量系统中存在通讯延迟, 选取 $\tau = 0.2$ s来近似模拟. 同时, 假定TCSC最大补偿能力为原线路电抗的 ± 0.3 .

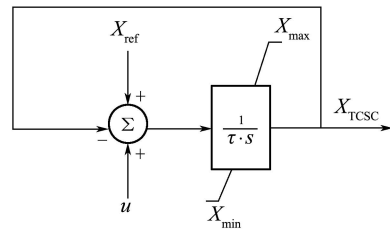


图2 TCSC一阶动态模型

Fig. 2 1st order dynamic model of TCSC

由图2, TCSC的动态可描述为

$$\dot{X}_{TCSC} = \frac{1}{\tau} (-X_{TCSC} + X_{ref} + u). \quad (4)$$

由上述(1)~(4), 全系统的COI动态模型为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{COI,B} - \dot{\delta}_{COI,A} = \omega_{COI,B} - \omega_{COI,A}, \\ \dot{\omega}_{COI,B} - \dot{\omega}_{COI,A} = \frac{\omega_0 (P_{m,B\Sigma} - P_{e,B\Sigma})}{M_{B\Sigma}} - \frac{\omega_0 (P_{m,A\Sigma} - P_{e,A\Sigma})}{M_{A\Sigma}} - \frac{\sum_{j=1}^{N_B} D_{Bj} (\omega_{Bj} - \omega_0)}{M_{B\Sigma}} + \frac{\sum_{i=1}^{N_A} D_{Ai} (\omega_{Ai} - \omega_0)}{M_{A\Sigma}}, \\ \dot{X}_{TCSC} = \frac{1}{\tau} (-X_{TCSC} + X_{ref} + u). \end{cases} \quad (5)$$

通过发电机励磁控制, 互联系统的区域内同步稳定问题可以得到有效的解决. 在此条件下, 若TCSC控制器驱使两侧子系统的COI到达同一个稳定平衡点, 则能保证整个互联系统的同步稳定性.

在COI坐标下,选取下述状态量

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\delta_{\text{COI,B}} - \delta_{\text{COI,A}}) - (\delta_{\text{COI,B0}} - \delta_{\text{COI,A0}}) \\ \omega_{\text{COI,B}} - \omega_{\text{COI,A}} \\ \dot{\omega}_{\text{COI,B}} - \dot{\omega}_{\text{COI,A}} \end{bmatrix}.$$

其中 $\delta_{\text{COI,B0}}$, $\delta_{\text{COI,A0}}$ 为区域COI转子角受扰动前的稳态初始值。

在考虑进模型误差和扰动后,系统(5)可化为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dot{x}_3 = \nu + \theta \cdot \varphi + \Delta. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \nu = & \frac{\omega_0}{M_{B\Sigma}} (\dot{P}_{m,B\Sigma} - \dot{P}_{L,B\Sigma} - \dot{P}_{\text{Loss},B\Sigma}) - \\ & \frac{\omega_0}{M_{A\Sigma}} (\dot{P}_{m,A\Sigma} - \dot{P}_{L,A\Sigma} - \dot{P}_{\text{Loss},A\Sigma}) + \\ & \left(\frac{\omega_0}{M_{A\Sigma}} + \frac{\omega_0}{M_{B\Sigma}} \right) \dot{P}_{\text{tie},\Sigma} \end{aligned}$$

为系统的虚拟控制量,将在下文获得其控制规律; TCSC的调制控制信号 u 是待求的真实控制量,可由 ν 解出; $\varphi = x_3$ 代表已知函数的向量; θ 为等效阻尼参数,在本文中作为未知参数且 $\theta = -\bar{D}_{AB}$, $\bar{D}_{AB}$ 是区域COI间相对运动的等效阻尼系数,定义为

$$\begin{aligned} & -\frac{\sum_{j=1}^{N_B} D_{Bj}(\omega_{Bj} - \omega_0)}{M_{B\Sigma}} + \frac{\sum_{i=1}^{N_A} D_{Ai}(\omega_{Ai} - \omega_0)}{M_{A\Sigma}} \triangleq \\ & -\bar{D}_{AB}(\omega_{\text{COI,B}} - \omega_{\text{COI,A}}) + \varepsilon_{D,AB}, \end{aligned}$$

同时,假定发电机满足:

$$\begin{aligned} \frac{D_{Ai}}{M_{Ai}} & \approx \frac{D_{Aj}}{M_{Aj}} \triangleq \bar{D}_A, \\ \frac{D_{Bi}}{M_{Bi}} & \approx \frac{D_{Bj}}{M_{Bj}} \triangleq \bar{D}_B, \\ \bar{D}_A & \approx \bar{D}_B = \bar{D}_{AB}. \end{aligned}$$

不难得到有 $\theta = -\bar{D}_{AB}$. Δ 是模型的综合误差,包含了 $\varepsilon_{D,AB}$ 和其他误差及扰动。

需要注意的是, TCSC的动态隐含在联络线传输功率之中. 为简化公式的推导,可忽略联络线上的损耗. 这样联络线上的有功潮流仅与线路两端电压和线路电抗有关. 由图1,可得

$$\begin{aligned} \dot{P}_{\text{tie},\Sigma} = & \left(\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} \right) (\dot{U}_1 U_2 + U_1 \dot{U}_2) \sin(\theta_1 - \theta_2) + \\ & \left[\left(\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} \right) U_1 U_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \right] (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - \\ & \frac{U_1 U_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{X_1^2} \frac{1}{\tau} (X_{\text{ref}} + u - X_{\text{TCSC}}), \end{aligned}$$

其中: $X_1 = X_{\text{TCSC}} + X_{\text{line}}$ 和 $X_2 = X_{\text{cons}} + X_{\text{line}}$ 分别为双回联络线101-13的等值阻抗, X_{line} 是联络线101-13上的初始电抗, X_{TCSC} 是TCSC的输出电抗, X_{cons} 为固定补偿电容电抗, $U_1 \angle \theta_1$ 和 $U_2 \angle \theta_2$ 是母线101和13的电压。

在下文的仿真算例中,电压幅值和相角的导数均是通过差分来计算. 在实际工程中,可以通过跟踪微分器(TD)来获得这些数据. TD的精度高且收敛速度快,其测量误差包含在系统模型的综合误差中^[15~17].

3 控制规律推导(Design process)

采用文献[12]的反步法设计控制器. 首先,进行坐标变换:

$$\begin{cases} z_1 = x_1, \\ z_2 = x_2 - \alpha_1(x_1), \\ z_3 = x_3 - \alpha_2(x_1, x_2). \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\alpha_1(x_1)$ 和 $\alpha_2(x_1, x_2)$ 为待定的光滑函数,且令 $\alpha_1(0) = 0, \alpha_2(0, 0) = 0$ 可保证新坐标系下平衡点仍为原点。

取Lyapunov函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2, \quad (8)$$

则有

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1(z_2 + \alpha_1). \quad (9)$$

取 $\alpha_1 = -k_1 x_1 = -k_1 z_1, k_1 > 0$, 易有

$$\dot{V}_1 = z_1 z_2 - k_1 z_1^2. \quad (10)$$

扩展Lyapunov函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2, \quad (11)$$

可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = \\ & -k_1 z_1^2 + z_2(z_1 + z_3 + k_1 x_2 + \alpha_2). \end{aligned} \quad (12)$$

取 $\alpha_2 = -z_1 - k_1 x_2 - k_2 z_2, k_2 > 0$, 则

$$\dot{V}_2 = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + z_2 z_3. \quad (13)$$

最后,取整个系统的Lyapunov函数为

$$V = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2\eta} \tilde{\theta}^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\psi}^2, \quad (14)$$

其中: $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta, \tilde{\psi} = \hat{\psi} - \psi^M$ 为参数的估计误差, $\hat{\theta}$ 与 $\hat{\psi}$ 分别是 θ 和 ψ 的动态估计值; 模型误差上界 $\psi^M = \max(\psi, \psi^0), \psi^0 > 0$ 是对参数 ψ 初值的估计值; η 和 γ 是给定的正系数。

将 V 求导,可有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 + \frac{1}{\eta} \dot{\tilde{\theta}} + \frac{1}{\gamma} \dot{\tilde{\psi}} = \\ &-k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - k_3 z_3^2 + z_3(z_2 + k_3 z_3 + \nu + \dot{\tilde{\theta}}\varphi + \\ &\Delta - \dot{\alpha}_2) + \tilde{\theta}(\frac{1}{\eta} \dot{\tilde{\theta}} - z_3 \varphi) + \frac{1}{\gamma} \dot{\tilde{\psi}}\dot{\psi}. \end{aligned} \quad (15)$$

取 $\nu = -z_2 - k_3 z_3 - \dot{\tilde{\theta}}\varphi + \dot{\alpha}_2 - \beta$, $k_3 > 0$, 式中 β 是 Δ 的补偿项.

根据文献[12]中的引理, 采用下述自适应方案:

$$\begin{cases} \beta = \tilde{\psi}w, \\ \dot{\tilde{\theta}} = \eta[z_3\varphi - \sigma_1(\tilde{\theta} - \theta^0)], \\ \dot{\tilde{\psi}} = \tau[z_3w - \sigma_2(\tilde{\psi} - \psi^0)], \\ w = \tanh(z_3/\varepsilon). \end{cases} \quad (16)$$

可以证明, 采用上述自适应方案后, 系统是工程稳定的. 具体证明过程参见文献[12], 这里略去. 由前文的推导, 可获得调制信号 u

$$u = \frac{\frac{\nu - c_1}{c_2} - c_3}{c_4} + X_{\text{TCSC}} - X_{\text{ref}}. \quad (17)$$

其中:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{\omega_0}{M_{B\Sigma}}(\dot{P}_{mB} - \dot{P}_{LB} - \dot{P}_{\text{LossB}}) - \\ &\frac{\omega_0}{M_{A\Sigma}}(\dot{P}_{mA} - \dot{P}_{LA} - \dot{P}_{\text{LossA}}), \\ c_2 &= -(\frac{\omega_0}{M_{A\Sigma}} + \frac{\omega_0}{M_{B\Sigma}}), \\ c_3 &= (\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2})(\dot{U}_1 U_2 + U_1 \dot{U}_2) \sin(\theta_1 - \theta_2) + \\ &[(\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2})U_1 U_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)] \cdot (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2), \\ c_4 &= -\frac{U_1 U_2}{\tau X_1^2} \sin(\theta_1 - \theta_2). \end{aligned}$$

对本文的控制方案做下述说明:

1) 在本控制器中, 各区域内的发电机功角与转速通过WAMS获得, 联络线上的传输功率通过本地测量获得, 对应的微分量可以通过跟踪微分器获取. 随着测量技术的发展, 全局测量信号完全有可能应用于实际工程项目中, 进而改善系统动态性能^[13~17].

2) 本控制器对系统未知参数具有良好的适应性, 同时具有一定的自校正功能. 由于互联大系统中测量原动机的实际出力和实际负荷较为困难, 在工程应用中可假定原动机出力和负荷恒定, 这种近似处理由模型误差系数补偿. 若系统遭受严重扰动需切机切负荷, 可先用Bang-Bang控制来校正信号然后由模型误差系统补偿.

3) 在设计过程中, 用函数 w 实现对切换函数的逼近和光滑化. 选取合适的参数可提高逼近程度.

4) 本文的设计过程简洁. 没有进行线性化操作, 保留了系统原有的非线性特性.

4 仿真测试(Simulation tests)

针对图3所示的含TCSC2区域4机系统, 选取在发电机侧安装PSS和TCSC的传统的功率调制辅助调制器(conventional modulation controller)为比较对象, 使用Power System Toolbox^[19]检验新型控制器的性能. 发电机采用次暂态模型; 励磁系统采用简单励磁模型; 负荷用恒阻抗模型.

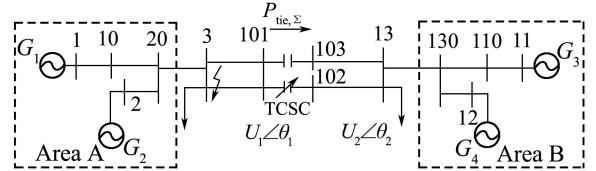


图3 含TCSC互联系统图

Fig. 3 Power system with TCSC

测试工况1: 控制器的设计工况, 区域间联络线轻负荷且 $P_{\text{tie},\Sigma} = 350 \text{ MW}$, $t = 6 \text{ s}$ 时在线路3-101靠近3号母线侧发生瞬时三相接地短路故障, 经0.1 s后故障消失. 采用相位补偿的办法设计TCSC的传统调制器, 其结构如图4所示. 参数经优化如下: $T_W = 1, T_A = 2, K_A = 3, T_1 = 0.2, T_2 = 0.07, T_3 = 0.2, T_4 = 0.05$. RAMC的参数为: $k_1 = 1, k_2 = 3, k_3 = 5, \gamma = 10, \eta = 10, \sigma_1 = 1, \sigma_2 = 1, \varepsilon = 1$.

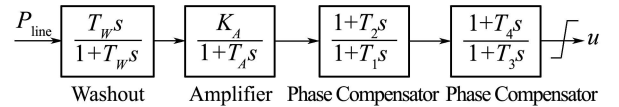


图4 TCSC功率辅助调制器

Fig. 4 Conventional Modulation Controller of TCSC

$G_1 \sim G_4$ 转子角动态如图5所示. 在设计工况下, 3种控制器均性能良. 在联络线上安装TCSC后, 可显著减小振荡幅度并快速抑制区域间振荡.

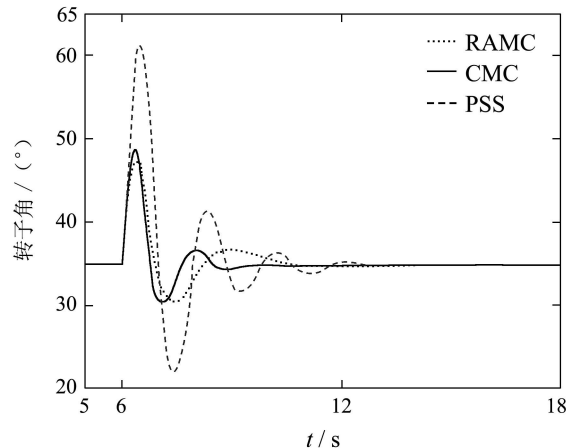


图5 工况1下 $G_1 \sim G_4$ 相对转子角曲线

Fig. 5 Rotor angle of $G_1 \sim G_4$ in Case 1

测试工况2: 交流联络线上的传输功率为 $P_{tie,\Sigma}=500$ MW, 此时联络线为重负荷输电。 $t=6$ s时, 在线路3-101靠近3号母线侧发生三相接地短路故障。经0.1 s后, 线路切除故障消失。发电机转子角动态如图6所示。

从图6和图7可知, 工况2下故障后的平衡点发生较大移动。PSS和CMC均无法抑制振荡, 只有RAMC使系统保持稳定运行。

测试工况3: 考察控制器对模型误差的鲁棒性。在工况1下, 在系统模型中的分别设置下列3组误差:

Case A: $\Delta = 0$, 系统模型不存在误差;

Case B: $\Delta = 0.4$ 且持续时间为0.5 s到1 s, 此时系统模型中存在瞬时误差;

Case C: $\Delta = 0.4$ 且由0.5 s开始施加, 此时系统模型存在永久误差;

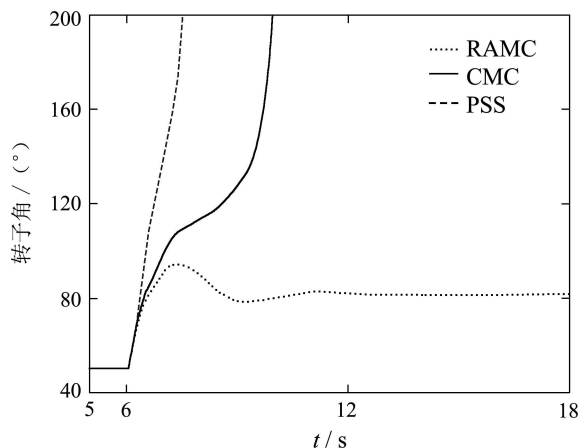


图6 工况2下 $G_1 \sim G_4$ 相对转子角曲线

Fig. 6 Rotor angle of $G_1 \sim G_4$ in Case2

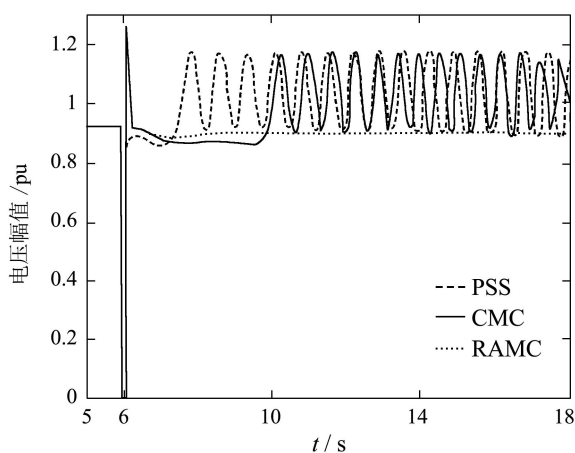


图7 工况2下故障点电压幅值曲线

Fig. 7 Voltage magnitude curve at fault bus in Case2

仿真结果如图8所示。施加瞬时扰动, 控制量的输出将偏离正常值, 因此区域间发电机相对转子角略有改变。瞬时扰动结束后, Case A和Case B下的曲线趋于一致, 可见瞬时扰动误差对控制器的影响很

小; Case C下的持久误差, 不会影响收敛性。在控制规律作用下, 控制器的输出达到一个新的稳态数值, $G_1 \sim G_4$ 相对转子角稳定在一个新平衡点。

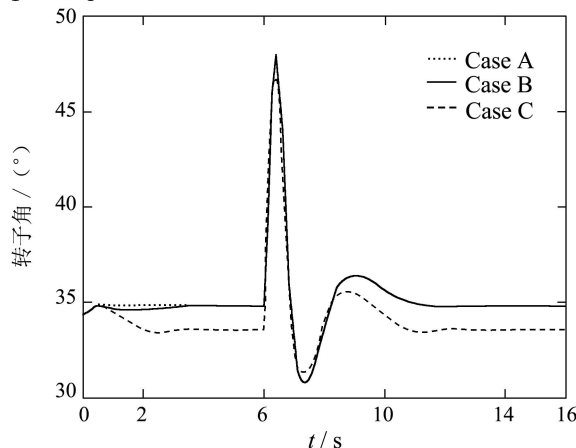


图8 工况3下 $G_1 \sim G_4$ 相对转子角曲线

Fig. 8 Rotor angle of $G_1 \sim G_4$ in Case3

由上述的仿真实验, 可以看出:

1) TCSC具有连续调节和控制潮流等功能, 可以阻尼次同步振荡和低频振荡, 增强系统的稳定性。在本文算例中, RAMC使联络线的极限输送功率由350 MW提升至500 MW。

2) 本文设计的控制器, 着重于送、受端区域的惯量中心(COI)控制。区域内发电机可跟踪惯量中心的变化, 最后达到同一个同步运行点。因此, 较在单机无穷大系统下的设计的控制器相比, 控制方式更为灵活, 易于其他控制器的协调工作, 可应用于更复杂的系统。

3) 在非设计重负荷工况下, PSS和CMC均不能保证良好的性能; 故障后平衡点发生较大改变的情况下, RAMC仍可使系统快速稳定。

4) 本控制器的输入信号, 可以通过广域测量系统(WAMS)和本地测量获得。WAMS信号的通讯延迟对控制器性能的影响及控制器参数的优化工作, 有待进一步的研究。

5 结论(Conclusion)

本文提出了一种旨在控制区域惯量中心并保持同步的TCSC鲁棒自适应控制器(RAMC)。采用逆推法在多机系统下推导了控制规律。在2区域4机系统下进行了仿真, 结果表明新型控制器对未知参数具有良好的适应性, 对模型误差和扰动具有较强的鲁棒性, 能有效地快速阻尼区域间的功率振荡, 提高联络线传输极限。跟踪微分器和WAMS技术的发展, 使该控制器获得实际应用成为可能。

参考文献(References):

- [1] CIGRE, IEEE working groups on FACTS. *FACTS Overview*, IEEE Power Engineering Society[M]. New Jersey: IEEE Press, 1995.

- [2] MARTINS N, PINTO H J C P, PASERBA J J. Using a TCSC for line power scheduling and system oscillation damping-small signal and transient stability studies[C] // *Power Engineering Society Winter Meeting*. New York: IEEE Press, 2000, 2(2): 1455 – 1461.
- [3] TARANTO G N, CHOW J H. A robust frequency domain optimization technique for tuning series compensation damping controllers[J]. *IEEE Trans on Power System*, 1995, 10(3): 1219 – 1225.
- [4] ROSSO D, CANIZARES C A, DONA V M. A study of TCSC controller design for power system stability improvement[J]. *IEEE Trans on Power System*, 2003, 18(4): 1487 – 1496.
- [5] SON K M, PARK J K. On the robust LQG control of TCSC for damping power system oscillations[J]. *IEEE Trans on Power System*, 2000, 15(4): 1306 – 1312.
- [6] SRIVASTAVA P C, GHOSH A, KUMAR S V J. Model-based control design of a TCSC-compensated power system[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 1999, 21(4): 299 – 307.
- [7] FU J, ZHAO J. Robust nonlinear excitation control based on a novel adaptive back-stepping design for power systems[C] // *Proc of the 25th American Control Conference*. USA: IEEE Press, 2005, 14(4): 2715 – 2720.
- [8] 李文磊, 张智焕, 井元伟, 等. 基于自适应Backstepping设计的TCSC非线性鲁棒控制器[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(1): 153 – 156.
(LI Wenlei, ZHANG Zhihuang, JING Yuanwei, et al. Nonlinear robust control based on adaptive backstepping design for TCSC[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(1): 153 – 156.)
- [9] 刘前进, 孙元章, 宋永华, 等. FACTS的PCH模型与自适应 L_2 增益控制(二)应用篇[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 1 – 5.
(LIU Qianjin, SUN Yuanzhang, SONG Yonghua, et al. PCH models of FACTS with adaptive L_2 gain control: Part two application[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(16): 1 – 5.)
- [10] 井元伟, 李文磊, 刘晓平, 等. TCSC的非线性逆推设计[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(1): 4 – 6.
(JING Yuanwei, LI Wenlei, LIU Xiaoping, et al. Nonlinear backstepping design for TCSC[J]. *J of Northeastern University(Natural Science)*, 2003, 24(1): 4 – 6.)
- [11] 王宝华, 杨成梧, 张强, 等. TCSC自适应逆推控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 59 – 61.
(ZHANG Baohua, YANG Chengwu, ZHANG Qiang, et al. Design of adaptive backstepping controller for TCSC[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2005, 25(4): 59 – 61.)
- [12] POLYCARPOU M M, IOANNOU P A. A robust adaptive nonlinear control design[J]. *Automatica*, 1996, 32(3): 423 – 427.
- [13] KRSTIC M, KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P. *Nonlinear and Adaptive Control Design*[M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1995: 1 – 121.
- [14] 罗建裕, 王小英, 鲁庭瑞, 等. 基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 78 – 80.
(LUO Jianyu, WANG Xiaoying, LU Tingrui, et al. Application of real-time dynamic monitoring system of power network based on wide-area measurement technology[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(24): 78 – 80.)
- [15] 谢小荣, 肖晋宇, 童陆园, 等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37 – 40.
(XIE Xiaorong, XIAO Jinyu, TONG Luyuan, et al. Inter-area damping control of interconnected power systems using wide-area measurements[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(2): 37 – 40.)
- [16] 徐光虎, 王杰, 陈陈, 等. 基于微分代数模型的AC/DC系统非线性控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 52 – 57.
(XU Guanghu, WANG Jie, CHEN Chen, et al. Design of nonlinear controller for AC/DC power system based on differential algebraic models[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(7): 52 – 57.)
- [17] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177 – 183.
(HAN Jingqing, WANG Wei. Nonlinear tracking differentiator[J]. *System Science & Mathematical Sciences*, 1994, 14(2): 177 – 183.)
- [18] 王新华, 陈增强, 袁著祇. 全程快速非线性跟踪-微分器[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 875 – 878.
(WANG Xinhua, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. Nonlinear tracking-differentiator with high speed in whole course[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(6): 875 – 878.)
- [19] CHOW J H. *Power System Toolbox: A Set of Coordinated m-files for Use with Matlab*[M]. Cherry Tree Scientific Software, 1996.

作者简介:

朱 林 (1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: zhulin1979@vip.sina.com;

蔡泽祥 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: epzxcai@scut.edu.cn;

倪以信 (1940—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、FACTS、人工智能技术应用以及电力市场, E-mail: yxni@eee.hku.hk.