

基于反馈线性化的 TCSC 非线性 PID 控制

郑 旭

(湖北省电力试验研究院,湖北 武汉 430077)

摘要: 非线性比例积分微分(PID)控制是一种利用非线性跟踪-微分器和非线性组合的方法对线性 PID 控制器进行改进的新型控制策略,它具有不依赖于被控系统模型的特点,对系统工作点和网络结构的变化具有良好的鲁棒性,而且结构简单、易于实现。在反馈线性化的基础上,将非线性 PID 理论应用到可控串补(TCSC)的控制器设计中。仿真结果表明:设计的控制器较常规控制器对系统运行具有更好的适应性和鲁棒性。

关键词: TCSC; 反馈线性化; 非线性 PID 控制器

中图分类号: TM 712

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)09-0086-03

可控串补(TCSC)作为柔性交流输电系统(FACTS)中的工程实用化方案,在改善电力系统性能方面具有很多优点。它可以用于改善网络潮流分布,提高输送功率;降低短路电流;提高暂态稳定极限,改善动态性能;阻尼功率振荡,抑制次同步谐振(SSR)等^[1-4]。而针对 TCSC 控制器的设计,人们提出了很多控制策略。近 20 年来迅速发展的非线性控制系统的微分几何法理论也应用到了 TCSC 控制器的设计中。然而,基于微分几何理论设计的 TCSC 非线性控制器尽管在系统工作点变化时具有较好的鲁棒性,但其需要系统的精确模型,理论上不具备对参数和模型不精确的鲁棒性^[5]。由于往往难以确定电力系统的精确数学模型和参数,因此其控制效果受到了影响。

本文在状态反馈线性化的基础上,将非线性系统理论中利用非线性特性改善被控系统的稳态偏差及暂态过程的非线性 PID 控制用于 TCSC 的控制研究,并进行了数值仿真。

1 TCSC 常规稳定控制器

稳定控制有 2 个目标:一个是在电力系统受到大干扰后,使发电机在随后的摇摆内不失步;另一个是在系统发生振荡时增加系统阻尼。在实际工程中,TCSC 常规稳定控制器通常包括暂态稳定和阻尼(POD)2 个环节,如图 1 所示。

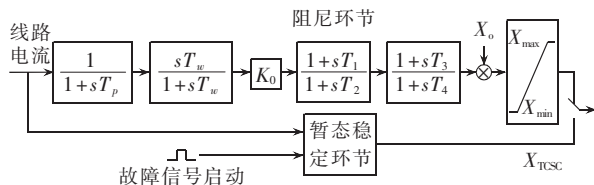


图 1 TCSC 常规稳定控制

Fig.1 The conventional control of TCSC

当检测到系统中发生故障时,暂态稳定环节立刻动作,将串联电容器调整到最大等效容抗,提供强行

补偿使线路的输送功率增加,以减小发电机间的相对摇摆角。然后,切换到阻尼环节,抑制后续的功率振荡。由于发电机功角测量比较困难,通常采用线路的有功功率作为稳定控制器输入。

2 状态反馈线性化和非线性 PID 控制^[6-12]

2.1 非线性 PID 控制理论简述

非线性 PID 控制器的框图见图 2, $u_0(t)$ 为系统的参考输入, $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别为系统的控制输入和输出, ε 、 $\int \varepsilon$ 、 $\dot{\varepsilon}$ 分别为偏差、偏差的积分和偏差的微分。

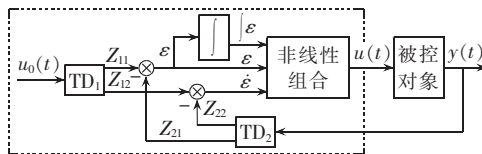


图 2 非线性 PID 控制器

Fig.2 The nonlinear PID controller

跟踪微分器 TD_1 用于给出系统参考输入 $u_0(t)$ 信号的理想过渡过程 $Z_{11}(t)$, 并给出理想过渡过程的微分信号 $Z_{12}(t)$; 跟踪微分器 TD_2 主要尽快复原系统输出信号 $y(t)$ 并给出其近似微分, 利用这 2 个跟踪微分器即可解决经典的线性 PID 中微分信号不易提取的问题。因此, 非线性 PID 的基本要素不是直接取自输入-输出误差, 而是将输入、输出信号经非线性处理后得到新的误差及其微分和积分, 然后将这些基本要素经过一定的组合产生系统的控制输入:

$$u(t) = K_p \text{Fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) +$$

$$K_d \text{Fal}(\dot{\varepsilon}, \alpha, \delta) + K_i \text{Fal}\left(\int \varepsilon, \alpha, \delta\right)$$

其中 $\text{Fal}(\varepsilon, \alpha, \delta)$ 是一种非线性函数, 用来配置 PID 信号构成控制器, 可取为

$$\text{Fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} \varepsilon^\alpha \text{sign}(\varepsilon) & |\varepsilon| \geq \delta \\ \varepsilon / \delta^{1-\alpha} & |\varepsilon| < \delta \end{cases}$$

式中 δ 为决定 $\text{Fal}(\varepsilon, \alpha, \delta)$ 线性区间大小的参数, α 为决定该函数非线性形状的参数, 可选取 α 为 0.5~1.0, δ 适当小。

而调整 K_p 、 K_d 、 K_i 这 3 个参数尚无确定的方法, 只能通过仿真确定。

基本要素 ε 、 $\int \varepsilon$ 、 $\dot{\varepsilon}$ 的非线性组合是为了解决线性组合带来的超调和快速之间的矛盾。确定非线性组合的一个标准是: 偏差小时采用较大控制, 而偏差大时采用较小控制。

2.2 反馈线性化

单机无穷大系统如图 3 所示, 并假定: 发电机采用经典二阶模型, E'_q 恒定; 发电机输入机械功率 P_m 恒定; 只考虑 TCSC 的稳态模型。

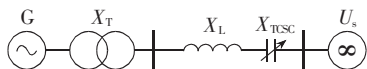


图3 含有 TCSC 的单机无穷大系统

Fig.3 A one-machine infinite-bus system with TCSC

基于以上假定, 具有 TCSC 的单机无穷大系统状态方程可写为

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0, \quad \dot{\omega} = \omega(P_m - P_e) / \tau \quad (1)$$

式中 δ 为发电机转子摇摆角; ω 为发电机转子角速度; ω_0 为系统同步角速度; τ 为发电机转子的惯性时间常数; P_e 为发电机输出的电磁功率。

$$P_e = \frac{E'_q U_s}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta \quad (2)$$

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_T + X_L + X_{TCSC} = X_{L\Sigma} + X_{TCSC} \quad (3)$$

选取 $u(t) = 1/X'_{d\Sigma}$ 为系统控制输入, 则可以将式(1)写成标准的仿射非线性形式:

$$\dot{X} = f(X) + g(X)u \quad (4)$$

$$f(X) = \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \frac{\omega_0 P_m}{\tau} \end{bmatrix}, \quad u(t) = \frac{1}{X'_{d\Sigma}}$$

$$g(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega_0 E'_q U_s}{\tau} \sin \delta \end{bmatrix}, \quad X = [\delta \quad \omega]^T$$

由非线性系统微分几何理论, 选取转换坐标^[3]为

$$z_1 = \delta - \delta_0 = \Delta \delta, \quad z_2 = \omega - \omega_0 = \Delta \omega \quad (5)$$

则原非线性系统可转化为以下布鲁诺夫斯基标准型

$$\dot{z}_1 = z_2, \quad \dot{z}_2 = v \quad (6)$$

其中, v 是引入的待设计的虚拟控制变量, 且原非线性系统的控制输入 u 与反馈线性化后系统的虚拟控制输入 v 的关系式为

$$u = \left(-\frac{\omega_0 P_m}{\tau} + v \right) / \left(-\frac{\omega_0 E'_q U_s}{\tau} \sin \delta \right) \quad (7)$$

2.3 非线性 PID 控制规律设计

理论已经证明: 反馈线性化后的系统和原非线性系统具有相同的能控性。对式(6)线性状态方程, 可以应用现有的各种控制方法设计控制量 v 。本文利用非线性 PID 控制器设计反馈线性化后的系统的虚拟控制输入 v , 见图 4。

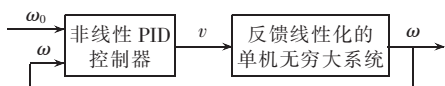


图4 非线性 PID 控制设计

Fig.4 Design of nonlinear PID control

选取发电机角速度 ω 为反馈变量, 得到非线性 PID 控制器的输出, 即虚拟控制变量 v 为

$$v = K_p \text{Fal}(\Delta \omega, \alpha, \delta) + K_d \text{Fal}(\Delta \dot{\omega}, \alpha, \delta) + K_i \text{Fal}\left(\int \Delta \omega, \alpha, \delta\right) \quad (8)$$

为了使系统快速稳定, 控制目标必须使发电机功角和输出功率快速趋于稳态值。进行多次演算和优化后, 选择 $\alpha = 0.5$, $\delta = 0.0001$, 并得到 PID 参数为 $K_p = 3.5$, $K_d = 1.25$, $K_i = 4.0$ 。

将上述 PID 参数代入式(8), 再回代入式(7)得到原系统的控制输入为

$$u(t) = \frac{\omega_0 P_m}{\tau} / \left(\frac{\omega_0 E'_q U_s \sin \delta}{\tau} \right) + 3.5 \text{Fal}(\Delta \omega, \alpha, \delta) / \left(-\frac{\omega_0 E'_q U_s \sin \delta}{\tau} \right) + 1.25 \text{Fal}(\Delta \dot{\omega}, \alpha, \delta) + 4.0 \text{Fal}\left(\int \Delta \omega, \alpha, \delta\right) \quad (9)$$

再由式(4)即可得到 TCSC 的控制规律为

$$X_{TCSC} = 1/u(t) - X_{L\Sigma} \quad (10)$$

3 仿真结果及分析

仿真系统如图 5 所示。系统参数选取为 $X_d = 1.79$, $X'_d = 0.17$, $X_q = 0.335$, $X'_{d0} = 7.65$ s, $X_T + X_{L1} = 0.1$, $X_{L2} = 0.5$, $\tau = 14.2$ s, $X_{c0} = 0.05$, $X_{c\max} = 0.12$ (未注单位的为标么值)。

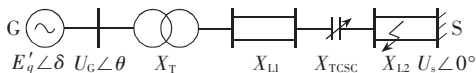


图 5 仿真系统图

Fig.5 The simulation system

$t = 0.5$ s 时, TCSC 靠近无穷大母线侧发生三相短路故障, $t = 0.6$ s 时, 故障消除。图 6 和图 7 分别给出了系统运行点为 $P_e = 0.85$ p.u. 和 $P_e = 0.72$ p.u. 时, 在常规 TCSC 控制器下和非线性 PID 控制器下, 发电机功角、输出功率和发电机转子转速的响应曲线。其中, 实线和虚线分别对应非线性 PID 控制器和常规控制器的响应曲线。

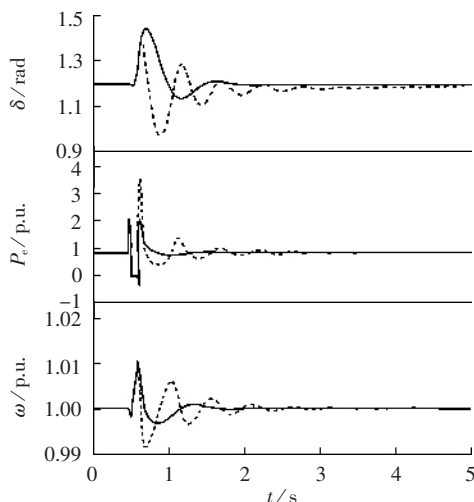


图 6 三相短路故障下系统响应曲线 ($P_e = 0.85$ p.u.)

Fig.6 System response to three-phase short-circuit at $P_e = 0.85$ p.u.

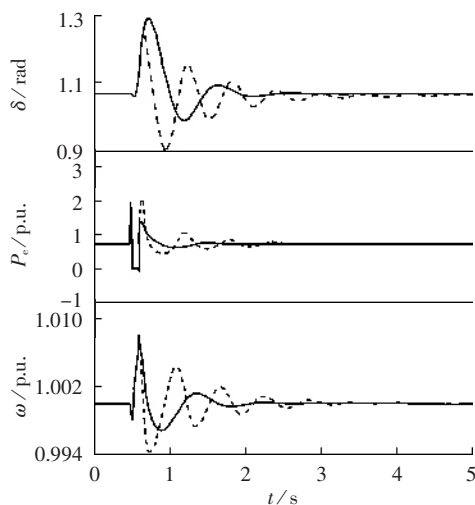


图7 三相短路故障下系统响应曲线($P_c=0.72$ p.u.)

Fig.7 System response to three-phase short-circuit at $P_c=0.72$ p.u.

由图6和图7可看出:在常规TCSC控制器作用下,系统振荡的衰减过程比较缓慢;而在非线性PID控制器作用下,系统具有良好的阻尼性能,经过较短的时间就能将振荡平息下来。同时,在系统运行点变化的情况下,非线性PID控制器的控制效果依然良好,说明本文所设计的非线性PID控制器对系统的运行点具有一定的适应性和鲁棒性。

4 结语

在反馈线性化的基础上,将非线性PID理论应用到TCSC的控制器设计中,充分利用了反馈中的非线性的功能和效率。仿真结果表明,本文设计的控制器较常规控制器具有更好的提高首摆稳定和阻尼后续功率振荡的能力,对系统运行点的变化也有较好的适应性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 武守远. 可控串补控制器的物理模型设计与基本特性试验[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 21-25.
WU Shou-yuan. Design and experiments of the controller for analog model of thyristor controlled series compensation [J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 21-25.
- [2] 田杰. 可控串联补偿(TCSC)的分析研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(12): 34-36.

- TIAN Jie. Investigation of the thyristor controlled series compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(12): 34-36.
- [3] CHRISTL N, HEDIN R, SADEK K, et al. Advanced series compensation with thyristor controlled impedance [J]. CIGRE Paper, 1992, 11(7): 57-63.
- [4] HELBING S G, KARADY G G. Investigation of an advanced form of series compensation [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, 9(2): 939-947.
- [5] 吴青华, 蒋林. 非线性控制理论在电力系统中应用综述[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 1-10.
WU Qing-hua, JIANG Lin. Survey on nonlinear control theory and its applications on power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 1-10.
- [6] 韩京清. 非线性PID控制器[J]. 自动化学报, 1994(7): 487-490.
HAN Jing-qing. Nonlinear PID controller [J]. Acta Automatica Sinica, 1994(7): 487-490.
- [7] 韩京清, 王伟. 非线性微分-跟踪器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
HAN Jing-qing, WANG Wei. Nonlinear tracking-differentiator [J]. J Sys Sci & Math Scis, 1994, 14(2): 177-183.
- [8] 张采, 周孝信, 蒋林, 等. 可控串联电容补偿非线性PID控制器[J]. 电网技术, 1999, 23(10): 14-18.
ZHANG Cai, ZHOU Xiao-xin, JIANG Lin, et al. A nonlinear PID controller for TCSC [J]. Power System Technology, 1999, 23(10): 14-18.
- [9] 彭晓涛, 程时杰, 王少容, 等. 非线性PID控制器在超导磁储能装置中的应用研究[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 37-42.
PENG Xiao-tao, CHENG Shi-jie, WANG Shao-rong, et al. Research on application of nonlinear PID controller in SMES [J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 37-42.
- [10] 王宝华, 杨成梧, 张强. TCSC自适应逆推控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 59-61.
WANG Bao-hua, YANG Cheng-wu, ZHANG Qiang. Design of adaptive backstepping controller of TCSC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(4): 59-61.
- [11] 邢青青, 郝继飞, 白文宝. 存在常见非线性环节系统PID参数的整定[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5): 91-93.
XING Qing-qing, HAO Ji-fei, BAI Wen-bao. Tuning of PID controller parameters for system with common nonlinearity [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(5): 91-93.
- [12] ZHOU X X, LIANG J. Nonlinear adaptive control of TCSC to improve the performance of power system [J]. IEE Proc-Gener Transm Distrib, 1999, 146(3): 124-129.

(责任编辑: 汪仪珍)

作者简介:

郑旭(1979-), 男, 湖北荆门人, 硕士, 研究方向为电力系统分析与仿真计算(E-mail: hustzx987@163.com)。

Nonlinear PID controller for TCSC based on feedback linearization

ZHENG Xu

(Hubei Electric Power Testing & Research Institute, Wuhan 430077, China)

Abstract: Nonlinear PID (Proportional - Integral - Differential) control is a new type of control strategy, using nonlinear tracking - differentiator and nonlinear configuration to improve the performance of linear PID control. The controller is independent of the controlled system model and easy to be realized, having valuable robustness about working point. The nonlinear PID control is used to design the TCSC (Thyristor - Controlled Series Capacitor) controller based on feedback linearization. Simulation results show that the new controller has better adaptability and robustness.

Key words: TCSC; feedback linearization; nonlinear PID controller