

基于协同控制理论的 TCSC控制器设计

王学军,文劲宇,程时杰

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:提出了一种利用协同控制理论设计可控串联补偿电容器(TCSC)控制器的方案,并以单机无穷大系统为例进行了仿真试验。仿真结果表明,所提出的方法可以提高系统的暂态稳定性,有效地阻尼系统的振荡。

关键词:电力系统;协同控制;可控串联补偿电容器;暂态稳定

中图分类号:TM76 文献标识码:A 文章编号:1003-4897(2005)24-0038-04

0 引言

根据系统运行的需要,TCSC的等效电抗值可以在一定的范围内连续快速地变化,因此,TCSC不但可以用来补偿线路的电抗,而且通过有效的控制策略,还可以用来抑制低频振荡和次同步谐振,提高系统的静态和暂态稳定性。近年来,局部线性化控制^[1,2]和非线性控制^[3]等方法被相继引入TCSC的控制器设计中,取得了较好的效果。考虑到电力系统安全稳定运行的重要性,有必要研究应用最新的控制理论成果来进一步提高TCSC的性能,以提高系统的运行稳定性。

协同控制^[4]是近年来提出的一种全新控制方法,是在现代数学和协同学的基础上形成的状态空间方法。协同控制基于定向自组织原理并且利用了被控系统本身的非线性特性,其基本原理为:在被控系统的状态空间中构造流形(manifolds),通过这些流形以保证被控系统获得需要的稳态和动态性质,通过构造多个流形可使被控系统的阶数降低。协同控制是一种普适性的控制方法,它利用被控系统的数学描述提供了一种设计非线性系统控制器的方法。按照协同控制理论设计的控制器具有很好的稳态特性和动态性能,并对参数的变化具有很强的鲁棒性。

本文应用协同控制理论设计了TCSC的控制器,以单机无穷大系统为例对TCSC采用协同控制器以提高系统的暂态稳定性进行了研究,并进行了数字仿真试验。

1 协同控制器设计的原理^[5~11]

假定系统由一组非线性微分方程来描述:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, t) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n, u_2, t) \\ \dots \\ \dot{x}_m = f_m(x_1, x_2, \dots, x_n, u_m, t) \\ \dot{x}_{m+1} = f_{m+1}(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \\ \dots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1, \dots, x_n 是状态变量, u_1, \dots, u_m 是控制变量, t 是时间。

协同控制器设计的基本宗旨是采用宏变量定义系统状态变量之间的相互作用,这些宏变量规定了系统到达稳态的运动特性。为简单起见宏变量可以定义为状态变量的线性组合:

$$i = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

或者写为:

$$=AX \quad (3)$$

这里: $= [\quad 1, \quad 2, \dots, \quad m]^T$,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}, X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T。$$

宏变量(2)的个数等于控制变量的个数。对系统进行控制的最终目的是使系统从一个任意的初始运行点运动到流形(4)并最终沿着流形(4)到达指定的系统稳态运行点。

$$=AX = 0 \quad (4)$$

宏变量向流形的动态发展特性是由式(5)决定的:

$$T_i \dot{x}_i + x_i = 0 \quad i = 1, \dots, m, T_i > 0 \quad (5)$$

由式(1)、(3)、(5)可以求出协同控制规律 $u(X)$ ($u(X) = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$)。

从协同控制器设计的原理可以看出,控制规律 $u(X)$ 能够确保系统渐近稳定地收敛于指定的流形 (4), 收敛的速度是由 T_i 决定的。流形 $= 0$ 使得状态变量之间形成了新的约束条件, 因此降低了系统的阶, 系统 (1) 的阶变为:

$$d = n - m \quad (6)$$

根据文献 [10], 系统运行的稳定性是可以证明的。

2 TCSC的协同控制器设计

考虑如图 1(a) 所示的单机无穷大电力系统 [3], TCSC 装置安装在传输线路上, 经简化等值后接线如图 1(b) 所示, TCSC 由可变阻抗 X_C 来表示。

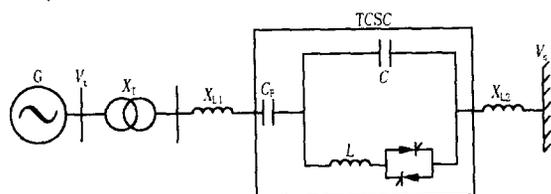
系统可以用以下非线性状态方程表示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \omega_0 (x_2 - 1) \\ \dot{x}_2 = \left[P_m - \frac{E_q V_s}{X_\Sigma} \sin(x_1) - D(x_2 - 1) \right] / H \end{cases} \quad (7)$$

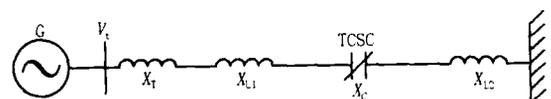
式中: $X_\Sigma = X_d + X_T + X_{L1} + X_{L2} + X_C = X_{L\Sigma} + X_C$, V_s 为无穷大母线电压。

定义状态变量: $X = [x_1, x_2]^T$, 其中 $x_1 = \delta$, $x_2 = \omega$, 控制变量: $u = 1/X_\Sigma$, 则式 (7) 可用如下状态方程来表示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \omega_0 (x_2 - 1) \\ \dot{x}_2 = \left[P_m - E_q V_s u \sin x_1 - D(x_2 - 1) \right] / H \end{cases} \quad (8)$$



(a) 装有 TCSC 的单机无穷大系统



(b) 系统简化模型

图 1 单机无穷大系统模型

Fig 1 A single machine infinite bus power system with TCSC

根据第 1 节中协同控制设计的基本原理首先定义宏变量 (X) 为:

$$(X) = x_1 - x_{1ref} + k(x_2 - x_{2ref}) \quad k > 0 \quad (9)$$

式中: x_{1ref} 和 x_{2ref} 分别为功角和转速的稳态值。

将式 (9) 带入式 (5) 有

$$T(\dot{x}_1 + k\dot{x}_2) + (x_1 - x_{1ref}) + k(x_2 - x_{2ref}) = 0 \quad (10)$$

将式 (8) 中的 \dot{x}_1 和 \dot{x}_2 带入到式 (10) 中可得:

$$u = \left[\frac{H}{k} \omega_0 (x_2 - 1) + P_m - D(x_2 - 1) + \frac{H}{kT} (x_1 - x_{1ref}) + \frac{H}{T} (x_2 - x_{2ref}) \right] / \left[\frac{1}{x_{L\Sigma} + X_C} \right] \quad (11)$$

按照式 (5) 的发展特性, 状态变量的轨迹收敛于流形 $= 0$ 并一直保持在流形上。因此, 从该点开始, 变量轨迹满足下式:

$$= x_1 - x_{1ref} + k(x_2 - x_{2ref}) = 0 \quad (12)$$

上式建立了状态变量 x_1 和 x_2 之间的线性关系, 因此系统 (8) 的阶降为 1, 继续在这个流形上运动, 状态变量的轨迹最终将收敛于稳态运行点: $x_1 = x_{1ref}$, $x_2 = x_{2ref}$ 。图 2 在相平面上解释了控制规律: 原点代表稳态运行点, 式 (12) 代表一条斜率为 $-k$ 且通过原点的直线, 系统运行点收敛于这条直线并沿着这条直线到达原点。

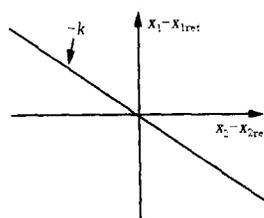


图 2 相平面上控制规律的几何解释

Fig 2 Geometric interpretation of control law in the phase plane

最后由式 (11) 求出 TCSC 等效阻抗的期望值 X_C 为:

$$X_C = \left\{ E_q V_s \sin x_1 / \left[\frac{H}{k} \omega_0 (x_2 - 1) + P_m - D(x_2 - 1) + \frac{H}{kT} (x_1 - x_{1ref}) + \frac{H}{T} (x_2 - x_{2ref}) \right] \right\} - x_{L\Sigma} \quad (13)$$

式 (13) 即为所求的 TCSC 协同控制规律。

需要特别指出的是, 在 TCSC 的安装处, 需获取诸如 E_q 、 ω 和 δ 等信号量是比较困难的。文献 [3] 已经在这些信号的本地化上提出了一些有效的方法, 使得协同控制策略在电力系统中的实际应用成为可能。

3 仿真试验与结果

用图 1 所示的单机无穷大系统来验证协同控制策略的可行性。仿真试验采用了较为详细的模型, 发电机采用 E_q 变化的模型, 并考虑发电机的凸极效应。励磁调节器为电压比例型静止励磁装置。

对 TCSC 装置, 用一个一阶惯性环节来模拟其控制系统的动态 [12], 即

$$X_{TCSC} = \frac{1}{1 + sT_1} U_{TCSC} \quad (14)$$

式中: T_1 为时间常数, 本系统 $T_1 = 0.02 \text{ s}$, u_{TCSC} 由式 (13) 确定。

变压器输电线路参数为: $x_T = 0.1$, $x_{L1} = 0.2$, $x_{L2} = 0.2$ 。发电机参数为: $x_d = 1.71$, $x_d' = 0.17$, $x_q = 1.71$, $D = 0.2$, $H = 7.1$, $T_{d0} = 7.65$ 。励磁调节器的参数为: $K_f = 200$, $T_f = 0.01$ 。稳态运行工况为: $P_{e0} = 0.85$, $\delta_0 = 1.2 \text{ rad}$ 。TCSC在 $[-0.35, 0.35]$ 范围内进行动态调节, 可为容性或感性。

分别采用以下的控制策略进行对照:

a $X_C = 0.001$ 的固定电容补偿, 安装于传输线路中央。

b 采用 PI 调节的 TCSC 控制策略 (PI TCSC), $X_C = (k_p + \frac{k_i}{s})$, 其中 $k_p = 20$, $k_i = 50$ 。

c 采用协同控制策略设计的控制器 (SCTCSC), $k = 10$, $T = 0.007$ 。

仿真研究了多种扰动情况下系统的响应。这里仅给出了 2 s 时 TCSC 出口处三相对地短路, 0.1 s 后故障切除的仿真对比结果。图 3 对照了系统在三种控制策略转子角速度的响应情况, 图 4 则将三种情况下的发电机功角进行了对比。

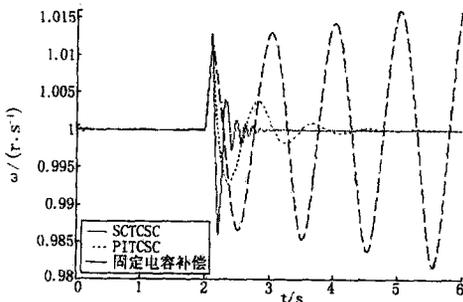


图 3 3种控制策略下发电机转子角速度响应曲线

Fig 3 Generator rotor speed responses of three control strategies

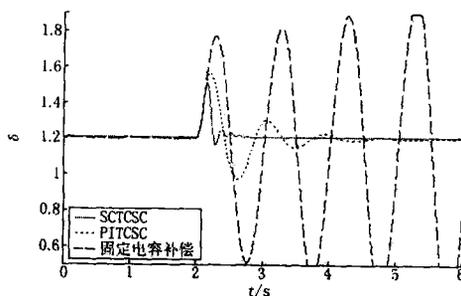


图 4 3种控制策略下发电机功角响应曲线

Fig 4 Generator power angle responses of three control strategies

从图 3 和图 4 可以看出, 在固定电容补偿下, 发

电机经过一系列的振荡后失去稳定, 而 TCSC 的 PI 控制器和协同控制器都能够阻尼系统的振荡, 结果表明协同控制下的系统能够获得更佳的系统响应, 系统能够在故障发生后更短的时间内平息振荡, 并且振荡的振幅也更小。

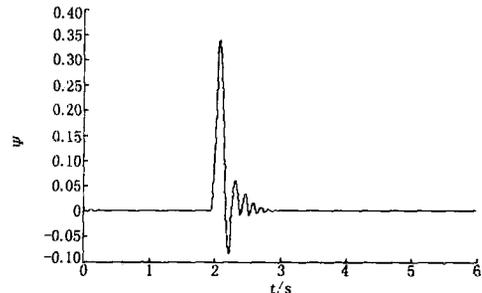


图 5 宏变量的变化曲线

Fig 5 Curve of macro-variable

图 5 为宏变量 x 的变化曲线。可以看出, 当系统在 2 s 发生三相接地短路故障时, 宏变量的轨迹离开流形 $x=0$, 经过一段时间的振荡后重新回到流形上。

4 结论

本文利用协同控制理论设计了 TCSC 的控制器。该控制策略由于在状态变量中引入流形, 使系统降阶, 适用于非线性系统的控制器设计。通过对多种控制策略下的系统响应情况进行比较, 证明了基于协同控制理论设计的 TCSC 控制器能有效地阻尼电力系统中由于各种原因引发的振荡, 提高系统暂态稳定性, 具有较好的理论和实际意义。

参考文献:

- [1] Noroozian M, Andersson G. Damping of Inter-area and Local Models by Use of Controllable Components [J]. IEEE Trans on PWRD, 1995, (4): 2007-2012.
- [2] 陈淮金. 可控串联补偿在提高电力系统稳定性中的作用 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(10): 14-17. CHEN Huai-jin. Enhancement of Power System Stability by Controllable Series Compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(10): 14-17.
- [3] Zhou X X, Liang J. Nonlinear Adaptive Control of TCSC to Improve the Performance of Power Systems [J]. IEE Proc - C, 1999, 146(3): 301-305.
- [4] Kolesnikov A, et al. Modern Applied Control Theory: Synergetic Approach in Control Theory [M]. Russia: TSURE Press, 2000.
- [5] Santi E. Synergetic Control for DC-DC Boost Converter

- Implementation Options[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2003, 39(6): 1803-1813.
- [6] Kolesnikov A, Veselov G, Monti A. Synergetic Synthesis of DC-DC Boost Converter Controllers: Theory and Experimental Analysis[J]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002, 1: 409-415.
- [7] JIANG Zhen-hua. Synergetic Control of Power Converters for Pulse Current Charging of Advanced Batteries from a Fuel Cell Power Source[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(4): 1140-1150.
- [8] Monti A, Dougal R, Santi E. Compensation for Step-load Variations when Applying Synergetic Control[J]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003, 1: 334-340.
- [9] Kondratiev I, Santi E, Dougal R. Synergetic Control for DC-DC Buck Converters with Constant Power Load[A]. Power Electronics Specialists Conference 2004. 3758-3764.
- [10] Kondratiev I, Santi E, Dougal R, et al. Synergetic Control for M-parallel Connected DC-DC Buck Converters [A]. Power Electronics Specialists Conference 2004. 20-25.
- [11] Kolesnikov A, Veselov G, Popov A. A Synergetic Approach to the Modeling of Power Electronic Systems[J]. Computers in Power Electronics, 2000: 259-262.
- [12] 郭强,吕世荣,刘晓鹏,等. 用于提高暂态稳定性的可控串联补偿电容器非线性控制器[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 40-42.
- GUO Qiang, LÜ Shi-rong, LIU Xiao-peng, et al. Non-linear Control of Thyristor Controlled Series Compensator for Improving Power System Transient Stability[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 40-42.

收稿日期: 2005-05-10; 修回日期: 2005-07-09

作者简介:

王学军(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为 TC-SC的控制; Email: wxjwto@eyou.com

文劲宇(1970-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为电力系统控制、人工智能在电力系统中的应用;

程时杰(1945-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统控制、人工智能在电力系统中的应用、电力系统载波通信。

Design of TCSC controller based on synergetic control theory

WANG Xue-jun, WEN Jin-yu, CHENG Shi-jie

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A method based on synergetic control theory for the design of TCSC controller is presented and the simulation in a single machine infinite bus power system is made. The simulation results show that the control can improve the transient stability of power system and damp oscillations effectively with this controller.

Key words: power system; synergetic control; TCSC; transient stability

(上接第 31 页 continued from page 31)

Fault location and isolation for distribution network based on ant colony algorithm

DING Tong-ku¹, ZHANG Li-hua², CHEN Xin-ji¹, KU Yong-heng³

(1. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Xuchang Electric Power Bureau, Xuchang 461000, China)

Abstract: Ant colony algorithm is a new general-purpose heuristic algorithm for combinatorial optimization problems. The main characteristics of this method are positive feedback, distributed computation and the use of constructive greedy heuristic. By building an appropriate model, the fault location in power distribution network based on the fault overcurrents is transformed into a nonlinear global optimization problem. This paper presents a new algorithm based on ant colony search algorithm to solve the fault location in power distribution network. Numerical examples demonstrate the feasibility effectiveness of the proposed method.

Key words: ant colony algorithm; fault location; power distribution system