

TCSC 非线性最优预测控制器的设计

蒋铁铮^{1,2}, 陈陈¹, 曹国云¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 长沙理工大学电气工程学院, 湖南 长沙 410077)

摘要: 基于非线性最优预测控制 (NOPC) 理论, 设计了一种具有闭合的解析控制律的可控串联补偿电容器 (TCSC) 的控制器。该控制器不要求进行在线优化计算, 从而避免了大量的计算负担, 且其可调参数只有二个 (滚动预测时间 T 及控制阶 r), 因而它完全满足实时控制的要求, 且便于工程实现及调试。仿真结果表明, 该控制器在提高系统的稳定性、阻尼系统振荡方面有明显的改善。

关键词: 非线性最优预测控制; 可控串联补偿电容器; 稳定性; 阻尼

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)20-0040-04

0 引言

随着全国范围电网互联的建设和发展, 长距离、重载、跨区域交流输电在中国已势在必行, 然其传输容量通常受其稳定极限的限制。可控串联补偿电容器 (TCSC) 是一种提高远距离输电系统性能的有效而经济的技术, 其电抗可以在一定的范围内快速、连续地变化, 因而, 它不但可以用来补偿线路电抗, 提高输电能力, 进行潮流控制, 还可以用于阻尼低频振荡和次同步振荡, 提高系统的静态稳定性和暂态稳定性^[1,2]。目前, 国内外已有 TCSC 装置投入或即将投入使用, 所有的运行经验均表明, 串联补偿技术是提高远距离输电系统传输容量、改善系统稳定性的一种非常有效的方法^[3]。

TCSC 在提高系统稳定性、抑制振荡方面的作用已得到公认, 人们对其控制策略也进行了大量的研究。预测控制是一种先进的控制技术, 其核心是在线滚动优化, 通过在线反复优化和反馈校正使开环优化在全过程中闭环化, 以及时校正不确定性的影响, 因而对复杂环境的适应性远胜过传统的最优控制。预测控制在 FACTS 中的应用已有研究^[4,5], 虽然预测控制的滚动优化过程对于线性系统可以解析求解, 在线计算相当简便, 而对于非线性系统则往往需要在线优化的数值迭代求解, 其繁重的计算量无法满足实时控制的要求^[6]。因此, 文献 [4] 通过非线性模型线性化后, 按照线性系统滚动优化设计预测控制器, 文献 [5] 则是通过 Bilinear 模型来线性化系统。

本文基于非线性最优预测控制理论, 设计出具有

有闭合的解析形式控制律的 TCSC 非线性控制器。该控制器不要求进行在线优化计算, 从而避免了大量的计算负担, 且控制器的可调参数只有 2 个 (滚动预测时间 T 及控制阶 r), 因而它完全满足实时控制的要求, 且便于工程实现及调试。

1 非线性最优预测控制器的设计方法

1.1 考虑仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (1)$$

这里, $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y = [y_1, \dots, y_m]^T \in R^m$ 分别为状态矢量、控制矢量和输出矢量。

为了避免非线性最优控制需求解偏微分方程 (PDEs) 的困难, 非线性最优预测控制采取一种滚动闭环优化控制算法, 它是通过某一性能指标的最优来确定未来的控制作用, 以达到非线性系统 (1) 的输出 $y(t)$ 依据给定的性能指标最优地跟踪期望的参考轨线 $W(t)$ 。滚动优化算法^[7], 即在任一时刻 t , 优化性能指标只涉及从该时刻起未来有限的时间 T , 而到下一时刻, 这一优化时段同时向前推移。因此, 滚动优化性能指标可表示为:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^T (\hat{y}(t+) - \hat{W}(t+))^T (\hat{y}(t+) - \hat{W}(t+)) dt \quad (2)$$

这里, T 为滚动预测时间段, $\hat{y}(t+)$ 为预测时间段的预测输出, $\hat{W}(t+)$ 为预测时间段的期望轨线值。

对于非线性系统 (1), 作如下假设:

- 1) 零动态是稳定的。
- 2) 所有的状态变量是可用的。
- 3) 输出 $y(t)$ 与参考轨线 $W(t)$ 对时间 t 连续充

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50307007)

分可微。

1.2 输出预测

设非线性系统(1)的关系度^[8]为,取控制矢量 $u(t)$ 的 r 次导数(称为控制阶 r ,见文献[9]),则输出的 Taylor级数展开至少为 r 阶,通过输出 $y(t)$ 对时间 t 的反复 r 次微分可得到:

$$\hat{Y}(t) = \begin{bmatrix} y^{(0)} \\ y^{(1)} \\ \dots \\ y^{(r-1)} \\ y^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f^1 h(x) \\ \dots \\ L_f^{r-1} h(x) \\ L_f^r h(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{m \times 1} \\ O_{m \times 1} \\ \dots \\ O_{m \times 1} \\ O_{m \times 1} \\ H(\hat{u}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

这里, $H(\hat{u}) \in R^{m \times (r+1)}$ 是一个关于 $\hat{u}(t), \dot{\hat{u}}(t), \dots, \hat{u}^{(r)}(t)$ 的函数,

$$H(\hat{u}) = \begin{bmatrix} L_g L_f^{-1} h(x) \hat{u}(t) \\ P_{11}(\hat{u}(t), x(t)) + L_g L_f^{-1} h(x) \dot{\hat{u}}(t) \\ \dots \\ P_{r1}(\hat{u}(t), x(t)) + P_{r2}(\dot{\hat{u}}(t), \hat{u}(t), x(t)) + \dots + P_{rr}(\hat{u}(t), \dots, \hat{u}^{(r-1)}(t), x(t)) + L_g L_f^{-1} h(x) \hat{u}^{(r)}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\hat{u} = [\hat{u}(t)^T \ \dot{\hat{u}}(t)^T \ \ddot{\hat{u}}(t)^T \ \dots \ \hat{u}^{(r)}(t)^T]^T \quad (5)$$

在滚动预测时间段内,任一时刻 t 的输出 $y(t+)$ 可近似用 Taylor级数表示为:

$$y(t+) \cong () \hat{Y}(t) \quad (6)$$

其中:

$$() = \begin{bmatrix} I & \dots & \frac{\tau^{r+n}}{(r+n)!} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\tau = \text{diag}\{ \dots \}, \tau \in R^{m \times m}, () \in R^{m \times m(r+r+1)}$$

同理,在滚动预测时间段内,任一时刻 t 的参考轨线 $W(t+)$ 可近似用 Taylor级数展开到 r 阶,表示为:

$$\hat{W}(t+) = () \bar{W}(t) \quad (8)$$

这里:

$$\bar{W}(t) = [W(t)^T \ \dot{W}(t)^T \ \dots \ W^{(r)}(t)^T]^T \quad (9)$$

1.3 最优控制

最优预测控制问题实际上可表述为:在任一时间 t 给出最优的控制变量 $\hat{u}(t)$ 以达到性能指标式(2)最

小。由此,我们不难推导出仿射非线性系统(1)的闭合的解析形式的最优预测控制律(见文献[9]):

$$u(t) = - (L_g L_f^{-1} h(x))^{-1} (KM + L_f h(x) - W^{(r)}(t)) \quad (10)$$

这里, $M \in R^m$

$$M = \begin{bmatrix} h(x) - W(t) \\ L_f^1 h(x) - W^{(1)}(t) \\ \dots \\ L_f^{r-1} h(x) - W^{(r-1)}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$K \in R^{m \times m}$ 由矩阵 \bar{T}^{-1} 的前 m 行确定,其中

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} \tau^{(1,1)} & \dots & \tau^{(1,r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \tau^{(r+1,1)} & \dots & \tau^{(r+1,r+1)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau^{(1,1)} & \dots & \tau^{(1,r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \tau^{(r+1,1)} & \dots & \tau^{(r+1,r+1)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\tau^{(i,j)} = \frac{\tau^{i+j-1}}{(i-1)! (j-1)! (i+j-1)} \quad (14)$$

这里: $i, j = 1, \dots, r+1$ $\tau = \text{diag}\{T, \dots, T\} \in R^{m \times m}$

以上设计过程表明,非线性最优预测控制律有两个设计参数:控制阶 r 和预测时间 T 。它们对被控制系统的暂态性能指标有重要的影响:如果选择较小的控制阶,则过调量与调整时间都会增大;如果选取较长的预测时间,则调整时间会增大。众所周知,系统的快速响应性、过调量与调整时间三者要求是矛盾的,在过调量与调整时间能接受的情况下,控制阶 r 尽可能选小而预测时间 T 尽可能选大,期望更好的快速响应性。

2 系统数学模型及 TCSC控制器的设计

2.1 系统数学模型^[10]

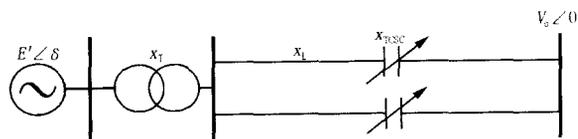


图1 单机无穷大系统等值电路

Fig 1 Equivalent circuit of one machine infinite bus system

图1是一个简化的单机无穷大系统,假定发电机采用经典的二阶模型,暂态电势 E 恒定,输入的机械功率 P_m 恒定。其发电机转子运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{H} \omega + \frac{1}{H} (P_m - P_e) \end{cases} \quad (15)$$

式中： δ 为发电机功角 (rad)； $\dot{\delta}$ 为转子角速度增量 (rad/s)； $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为同步速度； P_e 为电磁功率； D 为阻尼系数； H 为惯性时间常数 (s)。

若略去线路及 TCSC 装置的电磁暂态过程, 则

$$P_e = \frac{E V_s}{x_{d\Sigma} + \frac{1}{2}(X_L + x_{TCSC})} \sin \delta \quad (16)$$

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_T \quad (17)$$

2.2 基于非线性最优预测控制 (NOPC) 的 TCSC 控制器的设计

2.2.1 将式 (16) 代入式 (15), 并将其写成仿射形非线性系统的形式, 应有

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (18)$$

其中： $f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{D}{H} \dot{\delta} + \frac{\omega_0}{H} P_m \\ 0 \end{bmatrix}$

$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{E V_s}{H} \sin \delta \end{bmatrix}$

$x = [\delta, \dot{\delta}]^T, u = [0, u]^T$

选择控制矢量：

$$u = \frac{1}{x_{d\Sigma} + \frac{1}{2}(X_L + x_{TCSC})} \quad (19)$$

2.2.2 输出函数的选取

电力系统无论是运行方式的改变或故障后的运行状态, 每台发电机稳态的工作频率应该是确定的或是可预测的。因此, 在非线性最优预测控制中, 跟踪目标即参考轨线 $W(t)$ 可选定为转子相对电角速度, 则输出函数可由式 (20) 给出。

$$y = h(x) = \dot{\delta} \quad (20)$$

2.2.3 TCSC 非线性最优预测阻尼控制器

以单机无穷大系统为研究对象, 在不考虑调速器作用下, 即 $P_m = P_{m0}$ 。由式 (18) ~ (20) 构成的非线性系统, 根据文献 [8] 不难求得其关系度 $\sigma = 1$ 。由式 (10) ~ (14)、式 (19), 可以给出非线性最优预测控制器的控制律：

$$u(t) = \frac{H}{E V_s \sin \delta} (KM - \frac{D}{H} \dot{\delta} + \frac{\omega_0}{H} P_{m0}) \quad (21)$$

其中： KM 由式 (11) ~ (14) 确定, 若取控制阶 $r=0$, 则

$$KM = \frac{3}{2T} \quad (22)$$

根据式 (19), 可以得出 TCSC 等效阻抗的期望值 x_{TCSC} ,

$$x_{TCSC} = \frac{2 E_q V_s \sin \delta}{H(KM) - D \dot{\delta} + \omega_0 P_{m0}} - 2x_{d\Sigma} - x_L \quad (23)$$

需要指出的是, 在 TCSC 安装点处, 要获取 E_q 、 δ 信号是非常困难的, 文献 [11] 已经在这些信号的本地化上提出了有效的方法, 使得非线性控制策略在电力系统中的实际应用成为可能。

3 数值仿真分析

本文利用加拿大 Powertech Labs 公司的 TSAT 软件对图 1 所示的单机无穷大系统进行了仿真研究。仿真系统的参数见表 1 (详见文献 [10])：

表 1 仿真系统的参数 (基值: 500 kV, 100 MVA)

Tab 1 Parameters of simulated system				
发电机参数				
H	x_d	x_d'	D	
143.45680	0.08868	0.01148	12.80000	
线路及变压器参数				
T_k	r	X_L	B	X_T
1.0476	0.0039	0.0389	4.3560	0.0053

故障前系统工况： $P = 20.24, Q = 4.19, \delta = 35.17^\circ, X_{c0} = -0.01$

控制器的参数选取为：预测时间 $T = 0.1$ s, 控制阶 $r = 0$ 。

故障方式为：

- 1) 永久性故障：在 $t = 0.5$ s 时, 系统在 k 点发生三相对地短路； $t = 0.6$ s 时, 故障线路被跳开。
- 2) 临时性故障：在 $t = 0.5$ s 时, 系统在 k 点发生三相对地短路； $t = 0.6$ s 时, 故障线路被跳开； $t = 1.1$ s 故障线路重合闸成功。
- 3) 母线故障： $t = 0.5$ s 在时, 系统在升压变高压侧母线发生三相对地短路； $t = 0.6$ s 时, 故障被清除。

图 2、图 3、图 4 分别给出了采用固定串补、PD 控制和非线性最优预测控制的可控串补在三种不同故障方式下系统的响应曲线。

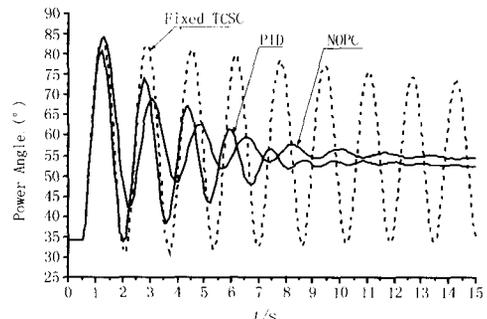


图 2 故障方式 (1) 的功角响应

Fig 2 Response of power angle for fault type No. 1

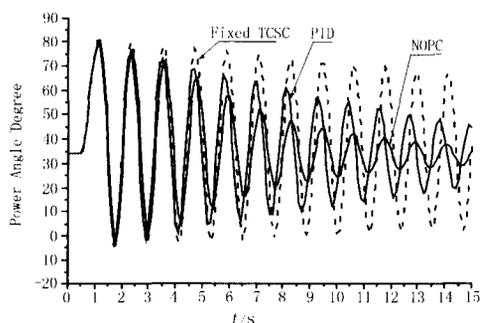


图3 故障方式(2)的功角响应

Fig 3 Response of power angle for fault type No. 2

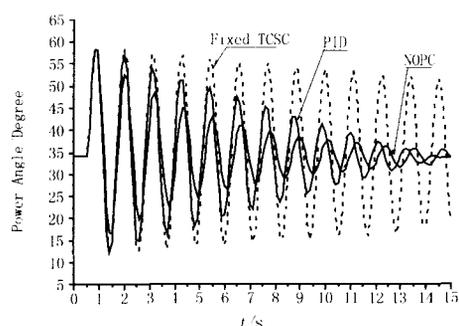


图4 故障方式(3)的功角响应

Fig 4 Response of power angle for fault type No. 3

从响应曲线可以得出:TCSC的非线性最优预测控制对系统的阻尼、功角稳定有明显的改善;故障(1)表明在系统拓扑结构变化后,本文设计的控制器具有很好的适应性和鲁棒性。

4 结论

本文以提高电力系统暂态稳定和有效地阻尼系统振荡为目标,基于非线性最优预测控制理论,设计了具有闭合的解析形式控制律的TCSC非线性最优预测控制器。该控制器不要求进行在线优化计算,从而避免了大量的计算负担,其可调参数只有二个(滚动预测时间 T 及控制阶 r),因而它完全满足实时控制的要求,且便于工程实现及调试。与固定串补及PD控制方式下的TCSC相比较,在三种不同故障方式下的仿真结果表明,该控制器在提高系统的稳定性,阻尼系统振荡方面有明显的改善。

参考文献:

[1] Zhou X, Liang J. Overview of Control Schemes for TCSC to Enhance the Stability of Power Systems [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 1999, 146 (2): 125-130.

- [2] Del Rosso A D, Canizares C A, Dona V M. A Study of TCSC Controller Design for Power System Stability Improvement [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (4): 1487-1496.
- [3] 雷宪章, Povh D. 串联补偿技术在远距离高电压交流输电系统中的应用 [J]. 电网技术, 1998, 22 (11): 34-38.
- Lei X Z, Povh D. Series Compensation for a Long Distance Transmission System [J]. Power System Technology, 1998, 22 (11): 34-38.
- [4] Marinescu B, Bourles H. Robust Predictive Control for the Flexible Coordinated Secondary Voltage Control of Large-scale Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14 (4): 1262-1268.
- [5] Rajkumar V, Mohler P R. Bilinear Generalized Predictive Control Using the Thyristor-controlled Series-capacitor [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (4): 1987-1993.
- [6] 孙浩, 席裕庚, 张钟俊. 一类非线性系统的模型预测控制算法 [J]. 上海交通大学学报, 1994, 28 (4): 68-75.
- SUN Hao, XI Yu-geng, ZHANG Zhong-jun. Model Predictive Control Algorithm for a Class of Nonlinear Systems [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1994, 28 (4): 68-75.
- [7] 王伟. 广义预测控制理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- WANG Wei. Generalized Predictive Control Theory and Its Applications [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [8] Isidori A. Nonlinear Control Systems: an Introduction (3rd Edition) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [9] CHEN Wen-hua, Balance D J, Gawthrop P J. Optimal Control of Nonlinear Systems: a Predictive Control Approach [J]. Automatica, 2003, 39: 633-641.
- [10] 张采, 周孝信. 可控串补自抗扰控制器 [J]. 电网技术, 1997, 21 (5): 57-61.
- ZHANG Cai, ZHOU Xiao-xin. Auto-Disturbances Rejection Controller for Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) [J]. Power System Technology, 1997, 21 (5): 57-61.
- [11] Zhou X X, Liang L. Nonlinear Adaptive Control of TCSC to Improve the Performance of Power Systems [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 1999, 146 (3): 301-305.

收稿日期: 2005-03-01; 修回日期: 2005-03-25

(下转第 67 页 continued on page 67)

tractors[J]. Phys Rev Lett, 1983, 50(5): 346-349.

2004, 28(13): 32-35.

[8] Rosenstein M T, Collins J J, de Luca C J. A Practical Method for Calculating Largest Lyapunov Exponents from Small Data Sets[J]. Physica D, 1993, 65: 117-134.

[9] 张步涵,刘小华,万建平,等. 基于混沌时间序列的负荷预测及其关键问题分析[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 32-35.

ZHANG Bu-han, L U Xiao-hua, WAN Jian-ping, et al Load Forecasting Based on Chaotic Time Series and Analysis of Its Key Factors[J]. Power System Technology,

收稿日期: 2005-02-24; 修回日期: 2005-04-08

作者简介:

彭春华(1973-),男,博士,副教授,主要从事电力市场、电力监控信息系统、热工自动化等方面的研究; E-mail: chinapch@163.com

雷莉霞(1977-),女,助教,主要从事计算机应用方面的研究。

Electric power system short-term load forecasting based on time clustering restructuring chaotic phase space

PENG Chun-hua, LEIL Fxia

(School of Electrical & Electronics Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper addresses a new exact-forecasting algorithm of short-term load in electric power system. Phase spaces of time series system load data is restructured by time clustering, their fractional correlation dimension and maximum Lyapunov exponent are calculated, and the conclusion that time clustering data of load has chaotic property is reached. A new model of short-term load forecasting algorithm based on time clustering restructuring chaotic phase space is presented. The algorithm has advantages of less phase space dimension and flexible parameters compared with the single time series chaotic forecasting algorithm. Test results with this algorithm to forecast the short-term load data in actual electric power system are revealed, which show that there is great improvement in forecasting precision.

Key words: system load; time clustering restructuring; phase space; chaotic forecasting

(上接第 43 页 continued from page 43)

作者简介:

蒋铁铮(1965-),男,博士研究生,副教授,主要研究方向是电力系统稳定分析与非线性控制; E-mail: jiangtiezheng@sju.edu.cn

陈陈(1938-),女,教授,博导,主要研究方向是电力系统稳定与控制,FACTS技术与应用;

曹国云(1972-),男,博士,副教授,主要研究方向是电力系统稳定分析与非线性控制。

A nonlinear optimal predictive controller for TCSC

JIANG Tie-zheng^{1,2}, CHEN Chen¹, CAO Guo-yun¹

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410077, China)

Abstract: In this paper, a novel controller for thyristor-controlled series capacitors (TCSCs) with closed-form analytical solution nonlinear optimal predictive control (NOPC) is presented. This controller does not require on-line optimization, so the huge calculation burden can be avoided and the demand of real-time control can be satisfied. In addition, there are only two design parameters (predictive period T and control order), thereby it is easy to be implemented in practice. The simulation results show that the controller can greatly improve power system stability and effectively attenuate power system oscillation.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50307007).

Key words: nonlinear optimal predictive control; thyristor-controlled series capacitor; stability; damping