

文章编号: 1001-0920(2005)04-0467-04

同步发电机励磁非线性预测控制技术

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: 以功角、有功功率、角速度这些可测量作为反馈量, 基于非线性预测控制理论, 设计出具有闭合解析形式控制律的励磁控制器。该控制器的设计参数只有滚动预测时间 T 和控制阶 r , 便于工程实现和调试。仿真结果表明, 该控制器能使系统提高稳定性, 具有良好的动态品质, 较好地维持了发电机机端电压的静态调节精度。

关键词: 非线性预测控制; 电力系统稳定性; 励磁控制器

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

Nonlinear predictive control of synchronous machine excitation

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

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2 School of Electrical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410077, China Correspondent: JIAN G Tie-zheng, E-mail: jiangtiezheng@sjtu.edu.cn)

Abstract Based on nonlinear predictive control (NPC) theory, a new design method of excitation controller with closed-form analytic solution nonlinear predictive control law is presented. The power angle, the active power and angular velocity are employed as feedback variables. The excitation controller has only two design parameters which are the predictive period and the control order. The simulation results show that the controller can not only improve the power system stability effectively and achieve good dynamic character, but also maintain post-fault generator terminal voltage regulation accuracy.

Key words: nonlinear predictive control(NPC); power system stability; excitation controller

1 引言

近 20 年来, 非线性系统控制理论在电力系统的应用得到广泛的研究, 主要方法有: 基于微分几何理论的精确线性化、直接反馈线性化、基于 Lyapunov 稳定理论的控制、非线性变结构控制、非线性自适应控制、非线性 PD 控制、自抗扰控制等^[1,2]。然而, 具有良好控制性能及抗干扰性和鲁棒性的预测控制理论在电力系统应用的研究却不多见。这主要是因为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^[3]。

本文利用非线性预测控制理论, 设计出具有闭

合解析形式控制律的励磁控制器。该控制器并不要求进行在线优化计算, 避免了繁重的计算负担, 因而可满足实时控制的要求。以功角、有功功率、角速度这些可测量作为反馈量, 且控制器的设计参数只有滚动预测时间 T 和控制阶 r , 因而便于工程实现和调试。

2 非线性预测控制器的设计方法^[4]

2.1 滚动优化性能指标

考虑仿射非线性系统

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

其中: $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T \in R^m$, 分别为状态矢量、控制矢量和输出矢量。对系统作如下

收稿日期: 2004-06-10; 修回日期: 2004-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(50307007)。

作者简介: 蒋铁铮(1965—), 男, 湖南邵阳人, 副教授, 博士生, 从事电力系统稳定分析、非线性控制的研究; 陈陈(1938—), 女, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事电力系统稳定与控制、FACTS 技术等研究。

假设: 1) 零动态是稳定的; 2) 所有状态变量均可用; 3) 输出 $y(t)$ 与参考轨线 $W(t)$ 对时间 t 连续充分可微

为避免非线性最优控制需求解偏微分方程的困难, 文中非线性预测控制采取滚动闭环优化的控制算法, 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, 最优跟踪期望的参考轨线 $w(t)$. 因此, 滚动优化^[5]性能指标可表示为

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

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

2.2 输出预测

设非线性系统(1)的关系度^[6]为 ρ 取控制矢量 $u(t)$ 的 r 次导数(称为控制阶 $r^{[4]}$), 则输出 $\hat{y}(t)$ 的 Taylor 级数展开至少为 $\rho+r$ 阶. 通过输出 $y(t)$ 对时间 t 反复 $\rho+r$ 次微分, 可得到

$$\hat{Y}(t) = \begin{bmatrix} \hat{y}^{[0]} \\ \hat{y}^{[1]} \\ \vdots \\ \hat{y}^{[\rho]} \\ \vdots \\ \hat{y}^{[\rho+r]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f^1 h(x) \\ \vdots \\ L_f^\rho h(x) \\ \vdots \\ L_f^{\rho+r} h(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{m \times 1} \\ 0_{m \times 1} \\ \vdots \\ 0_{m \times 1} \\ \vdots \\ H(\hat{u}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $H(\hat{u}) \in R^{m \times (\rho+r)}$ 是关于 $\hat{u}(t), \hat{u}'(t), \dots, \hat{u}^{[r]}(t)$ 的函数, 即

$$H(\hat{u}) = \begin{bmatrix} L_g L_f^{\rho-1} h(x) \hat{u}(t) \\ P_{11}(\hat{u}(t), x(t)) + L_g L_f^{\rho-1} h(x) \hat{u}(t) \\ \vdots \\ P_{r1}(\hat{u}(t), x(t)) + P_{r2}(\hat{u}(t), \hat{u}'(t), x(t)) + \dots + P_{rr}(\hat{u}(t), \dots, \hat{u}^{[r-1]}(t), x(t)) + L_g L_f^{\rho-1} h(x) \hat{u}^{[r]}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\hat{u} = [\hat{u}^T(t) \quad \hat{u}'^T(t) \quad \dots \quad \hat{u}^{[r]T}(t)] \quad (5)$$

P_{ij} 是关于 $u(t)$ 及其导数与 $x(t)$ 的函数

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

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

其中

$$\Gamma(\tau) = \left[I \quad \bar{\tau} \quad \dots \quad \frac{\bar{\tau}^{\rho+r}}{(\rho+r)!} \right] \quad (7)$$

式中

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

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

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

其中

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

2.3 最优控制

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(2)最小. 由此不难推导出仿射非线性系统(1)闭合的解析形式的预测控制律^[4]

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

其中

$$M \rho = \begin{bmatrix} h(x) - W(t) \\ L_f^1 h(x) - W^{[1]}(t) \\ \vdots \\ L_f^{\rho-1} h(x) - W^{[\rho-1]}(t) \end{bmatrix} \in R^{m \times \rho} \quad (11)$$

$K \in R^{m \times m \rho}$ 由矩阵 $\bar{\Gamma}_{rr}^{-1} \bar{\Gamma}_{\rho r}^T$ 的前 m 行确定. 这里

$$\bar{\Gamma}_{rr} = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{(\rho+1, \rho+1)} & \dots & \bar{\Gamma}_{(\rho+1, \rho+r+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\Gamma}_{(\rho+r+1, \rho+1)} & \dots & \bar{\Gamma}_{(\rho+r+1, \rho+r+1)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\bar{\Gamma}_{\rho r} = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{(1, \rho+1)} & \dots & \bar{\Gamma}_{(1, \rho+r+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\Gamma}_{(\rho, \rho+1)} & \dots & \bar{\Gamma}_{(\rho, \rho+r+1)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

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

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

3 非线性预测励磁控制器的设计

3.1 电力系统动态数学模型描述

考虑具有双回线的单机无穷大系统, 其系统接线如图1所示

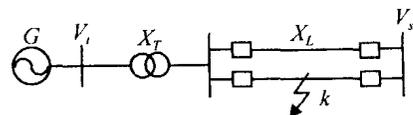


图1 单机无穷大系统

由图1可得三阶模型^[7]

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \Delta\omega \\ \Delta\dot{\omega} = -\frac{D}{2H} \Delta\omega + \frac{\omega}{2H} (P_m - P_e) \\ \dot{E}_q = \frac{1}{T_{d0}} (E_{fd} - E_q) \end{cases} \quad (15)$$

发电机的基本电气方程如下:

$$\begin{cases} E_q = \frac{x_d \Sigma}{x_d \Sigma} E_q - \frac{(x_d - x_d')}{x_d \Sigma} V_s \cos \delta, \\ E_q = x_{ad} I_f, E_{fd} = k_c u_f, \\ P_e = \frac{V_s E_q}{x_d \Sigma} \sin \delta, \\ I_q = \frac{V_s}{x_d \Sigma} \sin \delta = \frac{P_e}{x_{ad} I_f}, \\ Q = \frac{V_s}{x_d \Sigma} E_q \cos \delta - \frac{V_s^2}{x_d \Sigma} \end{cases} \quad (16)$$

其中: δ 为功角, 单位为 rad; $\Delta\omega$ 为转子相对电角速度, 单位为 rad/s; 其余各量为标么值 (参见文献 [7]).

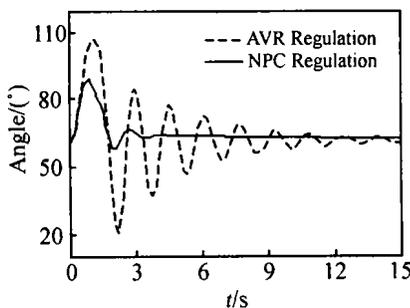
在非线形预测控制中, 要求仿射非线性系统 (1) 的所有状态量是可用的, 然而方程 (15) 中 E_q 在实际中很难测量 为此, 利用式 (15) 和 (16) 导出

$$\begin{aligned} \dot{P}_e = & -\frac{1}{T_{d0}} P_e + \Delta\omega P_e \cot \delta + \\ & \frac{x_d - x_d'}{x_d \Sigma x_d \Sigma} V_s^2 \Delta\omega \sin^2 \delta + \frac{k_c V_s}{T_{d0} x_d \Sigma} \sin \delta u_f, \end{aligned} \quad (17)$$

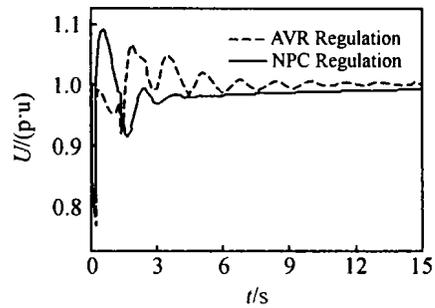
其中 $T_{d0} = \frac{x_d \Sigma}{x_d} T_{d0}$

将式 (17) 替代式 (15) 的第 3 个方程, 构成以 $[\delta, \Delta\omega, P_e]$ 为状态变量的状态方程 改写成仿射非线性系统 (1) 的形式, 有

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\Delta\omega} \\ \dot{P}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ -\frac{D}{2H} \Delta\omega + \frac{\omega}{2H} (P_m - P_e) \\ -\frac{1}{T_{d0}} P_e + \Delta\omega P_e \cot \delta + \\ \frac{x_d - x_d'}{x_d \Sigma x_d \Sigma} V_s^2 \Delta\omega \sin^2 \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_c V_s}{T_{d0} x_d \Sigma} \sin \delta \end{bmatrix} u_f \quad (18)$$



(a) 功角



(b) 机端电压

3 2 输出函数的选取

电力系统无论是运行方式的改变还是故障后的运行状态, 每台发电机稳态的工作频率应是确定的或可预测的, 即应满足 $\lim \Delta\omega = 0$ 因此, 在非线形预测控制中, 跟踪目标即参考轨线 $W(t)$ 可选为转子相对电角速度 $\Delta\omega$ 输出函数可由下式给出:

$$y = h(x) = \Delta\omega \quad (19)$$

3 3 非线性预测励磁控制器

以单机无穷大系统为研究对象, 不考虑调速器的作用, 即 $P_m = P_{m0}$ 由式 (18) 和 (19) 构成的非线性系统, 根据文献 [6] 不难求得关系度 $\rho = 2$ 由式 (10) ~ (14), (18) 和 (19), 可得出非线性预测励磁控制器的控制律

$$\begin{aligned} u_f(t) = & \frac{2HT_{d0}x_d\Sigma}{\omega k_c V_s \sin \delta} \left\{ KM_\rho + \frac{D^2}{4H^2} \Delta\omega - \right. \\ & \frac{D\omega}{4H^2} (P_{m0} - P_e) + \frac{\omega}{2T_{d0}H} P_e - \\ & \left. \frac{\omega}{2H} \Delta\omega P_e \cot \delta - \frac{\omega(x_d - x_d') V_s^2}{2H x_d \Sigma x_d \Sigma} \Delta\omega \sin^2 \delta \right\}, \end{aligned} \quad (20)$$

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

$$\begin{aligned} KM_\rho = & \left(\frac{10}{3T^2} - \frac{5D}{4HT} \right) \Delta\omega + \\ & \frac{5\omega}{4HT} (P_{m0} - P_e). \end{aligned} \quad (21)$$

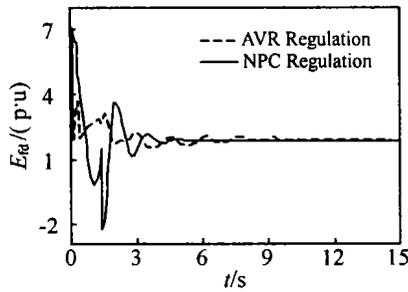
4 仿真研究

本文利用加拿大 Powertech Labs 公司的 TSA T 软件, 对图 1 所示的单机无穷大系统进行仿真研究 仿真系统参数为

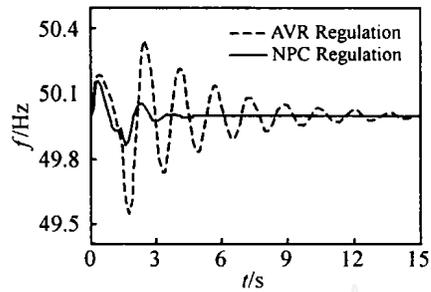
$$x_d = 1.863, x_d' = 0.257, x_T = 0.127,$$

$$x_L = 0.4853, T_{d0} = 6.58, H = 4.0, D = 3.0$$

非线性预测控制器的参数选为: 预测时间段 $T = 0.5$, 控制阶 $r = 0$



(c) 励磁电压



(d) 频率变化

图2 系统仿真曲线

故障方式为:当 $t = 0.1$ s时,系统在 k 点发生三相相对地短路;当 $t = 0.25$ s时,故障线路被跳开;当 $t = 1.4$ s时,故障线路重合闸成功

在传统的AVR励磁控制和非线性预测励磁控制作用下,系统的响应曲线如图2所示

从图2的仿真结果不难看出,与传统的AVR励磁控制相比,采用非线性预测控制设计的励磁控制器,在系统故障后能以较快的速度回到系统稳定的平衡点(图2(a)和(d)),较好地维持了发电机机端电压的静态调节精度(图2(b)),且电压超调现象得到很好的抑制

5 结 论

本文以提高电力系统稳定性为目的,提出了应用非线性预测控制理论来设计励磁控制器的方法。该方法具有以下优点:1)通过建立在实际反馈基础上的反复滚动优化,能不断顾及不确定性的影响,并及时加以校正,因而具有良好的鲁棒性;2)给出了具有闭合形式的解析控制律,从而避免了非线性预测控制因繁重的计算量而无法实时控制的要求;3)控制器设计参数较少,便于工程实现与调试。仿真结果表明,所设计的励磁控制器能使系统提高稳定性,具有良好的动态品质,较好地维持了发电机机端电压的静态调节精度

参考文献(References)

- [1] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:科学出版社,1993
- [2] 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(3):1-10
(Wu Q H, Jiang L. Survey on nonlinear control theory and its applications in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(3): 1-10.)
- [3] 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 H, Xi Y G, Zhang Z J. Model predictive control algorithm for a class of nonlinear systems[J]. J of Shanghai Jiaotong University, 1994, 28(4): 68-75.)
- [4] Chen W H, Donald J Balance, Peter J Gawthrop. Optimal control of nonlinear systems: A predictive control approach[J]. Automatica, 2003, 39: 633-641.
- [5] 王伟. 广义预测控制理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998
- [6] Isidori A. Nonlinear control systems: An introduction[M]. 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995
- [7] Guo Y, David J Hill, Wang Y Y. Global transient stability and voltage regulation for power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 678-688