

# 预测函数算法在同步发电机励磁系统中的应用

倪家健<sup>1</sup> 郭伟<sup>1</sup> 王波<sup>1</sup> 吴青<sup>1</sup> 曹雷<sup>1</sup> 尤辉<sup>1</sup> 方灏<sup>1</sup>

## 摘要

预测函数控制(Predictive Function Control)方法克服了传统预测控制算法复杂、在线计算量大的缺点,具有算法简单、计算量小、跟踪速度快和精度高等优点,适合同步发电机励磁等快速系统.介绍了预测函数控制(PFC)的基本原理和特点,成功地将预测函数控制算法运用到同步发电机励磁系统中.仿真结果表明:预测函数控制算法的控制效果明显优于PID和分数阶PID控制器,其对同步发电机启动时的机端电压、短路时的电压和断路时的电压等都能起到良好的控制作用.

## 关键词

预测函数控制;同步发电机;励磁控制

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

收稿日期 2010-10-21

资助项目 南京信息工程大学大学生实践创新训练计划项目(10CX039)

## 作者简介

倪家健,男,硕士生,主要研究方向为计算机控制与仿真,电力系统励磁控制.

njjnuistedu@sina.com

郭伟(通信作者),男,教授,主要从事计算机控制与仿真,预测控制方法等方面的研究. guowei@nuist.edu.cn

## 0 引言

传统的预测控制算法复杂、在线计算量大,而预测函数控制(Predictive Function Control, PFC)作为第3代模型预测控制算法<sup>[1-2]</sup>是应快速过程的需要,基于预测控制原理发展起来的一种新的预测控制方法.它具有一般预测控制方法的基本特征,还具有算法简单、计算量小、跟踪快速和精度高等特点.它与其他预测控制方法的最大区别是注重控制量的结构形式,认为控制量是一组预先选定的基函数的线性组合,基函数的选择与过程特性和拟跟踪设定值有关<sup>[3]</sup>.

在传统的对反应速度要求不高的系统中,预测函数控制器取得了良好的控制效果.例如文献[4]将预测函数算法运用到了反应器的温度控制中;文献[5]将预测函数控制运用到了聚合反应的控制中.更主要的是在快速系统中,预测函数控制算法取得了传统预测控制和PID控制不可能取得的良好控制效果.文献[1-2]成功地将预测函数应用于工业机器人的快速高精度控制;文献[6]将预测函数控制算法成功地运用到了电机伺服系统中.将预测控制运用到同步电机励磁控制中的文献较少,并且大都停留在理论分析阶段,工程实现可操作性较小.如文献[7]基于预测控制基本原理,推导了一种非线性多变量的励磁控制算法,但其未考虑实际系统中测量、功率放大等环节有一定的延迟,所以这种理想化的模型在实际中很难实现.预测函数控制在同步电机励磁控制中的应用则未见报道.本文针对同步电机励磁控制系统速度快、精确模型难以建立、扰动多、常规PID控制难以取得良好的效果的特点,将预测函数控制运用到同步发电机的励磁控制中.仿真实验表明:预测函数控制算法对同步发电机启动时的机端电压能起到良好的控制作用,在克服大小干扰时效果优于PID与分数阶PID控制器,其动态品质也明显优于采用PID或分数阶PID控制策略的系统.

## 1 预测函数控制算法<sup>[3]</sup>

PFC控制是第3代预测控制算法,仍然属于预测控制的范畴,因此它具有预测函数的3个基本特征:模型预测、滚动优化和反馈校正.其主要特点是将控制输入结构看作影响系统性能的关键.其设计步骤如下.

<sup>1</sup> 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京, 210044

## 1.1 基函数

预测函数控制把控制输入结构看作影响系统性能的关键. 在输入信号频谱有限的情况, 控制输入仅属于一组与参考轨迹和对象性质有关的特定基函数族, 基函数的选取的重要性是显而易见的. 特别地, 对于线性, 系统的输出将是基函数作用于对象模型响应的加权组合. 控制输入被表示为一系列已知基函数  $\{f_n\}$  的线性组合, 即:

$$u(n+i) = \sum_{j=1}^J \mu_j(n) f_{nj}(i). \quad (1)$$

式中:  $u(n+i)$  为在  $n+i$  时刻的控制量;  $\mu_j(n)$  为基函数加权系数;  $f_{nj}(i)$  为基函数在  $iT$  时的取值;  $J$  为基函数的阶数.

基函数的选取依赖于对象及期望轨迹的性质, 例如可以取阶跃、斜坡、指数函数等. 对于任意选定的基函数  $f_{nj}(i)$ , 可离线算出在其作用下的对象输出响应  $g_{nj}(i)$ , 加权组合即得系统输出.

## 1.2 参考轨迹

与模型算法控制一样, 在 PFC 中, 为了使系统的输出能够平缓地逐渐达到设定值, 避免出现超调, 根据预测输出值和过程输出值, 可以规定一条渐进趋向于未来设定值的曲线, 称为参考轨迹. 其选定完全取决于设计者对系统的要求. 常见的参考轨迹为

$y_r(n+i) = C(n+i) - \alpha^i [C(n) - y_p(n)]$ . (2)  
式中:  $y_r(n+i)$  为  $(n+i)$  时刻的参考轨迹;  $C(n+i)$  为  $(n+i)$  时刻的设定值;  $y_p(n)$  为  $n$  时刻的过程实际输出值;  $\alpha$  为参考轨迹趋于设定值的快慢程度, 一般取  $\alpha = \exp\left[-\frac{3T}{T_r}\right]$ , 其中  $T$  是采样时间,  $T_r$  是参考轨迹的期望响应时间.

由滚动优化原理可知, 每一步优化均是建立在实际过程得到的最新数据基础上, 故  $y_r(n) = y_p(n)$ .

对于拟跟踪设定值, 通常可以认为

$$C(n+i) = C(n), \quad (3)$$

式(3)中  $C(n)$  为  $n$  时刻的设定值.

由式(2)及(3)可得参考轨迹详细表达式为

$$y_r(n+i) = C(n) - \alpha^i [C(n) - y_p(n)]. \quad (4)$$

## 1.3 预测模型

PFC 中, 常用离散状态空间模型作为预测模型, 利用预测模型, 可由系统输入量直接预测其输出. 模型由以下状态空间方程构成:

$$\begin{cases} x_m(n) = Ax_m(n-1) + Bu(n-1); \\ y_m(n) = Cx_m(n). \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中:  $y_m(n)$  为  $n$  时刻模型预测输出;  $x_m(n)$  为  $n$  时刻模型状态值;  $u(n-1)$  为  $(n-1)$  时刻的控制输入;  $A, B, C$  为矩阵方程系数.

对于  $(n+i)$  时刻的模型状态值  $x_m(n+i)$ , 由式(5)可以递推得

$$\begin{aligned} x_m(n) &= Ax_m(n-1) + Bu(n-1), \\ x_m(n+1) &= Ax_m(n) + Bu(n), \\ &\dots \end{aligned}$$

$$x_m(n+i) = Ax_m(n+i-1) + Bu(n+i-1).$$

进一步可以算出

$$x_m(n+i) = A^i x_m(n) + A^{i-1} Bu(n) + A^{i-2} Bu(n+1) + \dots + ABu(n+i-2) + Bu(n+i-1).$$

由此可知,  $(n+i)$  时刻的模型预测为  
 $y_m(n+i) = Cx_m(n+i) = CA^i x_m(n) + CA^{i-1} Bu(n) + CA^{i-2} Bu(n+1) + \dots + CABu(n+i-2) + CBu(n+i-1)$ .  
将式(1)代入可得

$$\begin{aligned} y_m(n+i) &= CA^i x_m(n) + CA^{i-1} B \sum_{j=1}^J \mu_j(n) f_{nj}(0) + \\ &CA^{i-2} B \sum_{j=1}^J \mu_j(n) f_{nj}(1) + \dots + \\ &CAB \sum_{j=1}^J \mu_j(n) f_{nj}(i-2) + CB \sum_{j=1}^J \mu_j(n) f_{nj}(i-1) = \\ &CA^i x_m(n) + \mu_1(n) [CA^{i-1} Bf_{n1}(0) + \\ &CA^{i-2} Bf_{n1}(1) + \dots + CBf_{n1}(i-1)] + \\ &\mu_2(n) [CA^{i-1} Bf_{n2}(0) + CA^{i-2} Bf_{n2}(1) + \dots + \\ &CBf_{n2}(i-1)] + \dots + \mu_j(n) [CA^{i-1} Bf_{nj}(0) + \\ &CA^{i-2} Bf_{nj}(1) + \dots + CBf_{nj}(i-1)] = \\ &CA^i x_m(n) + \sum_{j=1}^J \mu_j(n) g_{nj}(i) = \\ &CA^i x_m(n) + \mu(n)^T g_n(i). \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中:  $\mu(n) = [\mu_1(n), \mu_2(n), \dots, \mu_j(n)]^T$ ;  
 $g_n(i) = [g_{n1}(i), g_{n2}(i), \dots, g_{nj}(i)]^T$ .

同时, 基函数的过程响应函数  $g_{nj}(n)$  可在基函数已知的前题下离线计算出:

$$g_{nj}(n) = CA^{i-1} Bf_{nj}(0) + CA^{i-2} Bf_{nj}(1) + \dots + CBf_{nj}(i-1). \quad (7)$$

模型中加入的控制量并非是在时间上相互独立的量, 而是所用基函数的线性组合, 因此, 其引起的输出变化便表现为各个基函数响应  $g_{nj}(n)$  的线性叠加, 而非不同时间点控制效应的叠加.  $g_{nj}(n)$  可以离线算出, 未知的只有线性组合系数  $\mu_j(n)$ .

## 1.4 误差补偿

在实际工业过程中, 由于模型失配、噪声等原

因,模型输出与过程输出之间存在一定的误差,即:

$$e(n) = y_p(n) - y_m(n).$$

对于未来 $(n+i)$ 时刻误差的预测,通常表示为

$$e(n+i) = e(n) = y_p(n) - y_m(n). \quad (8)$$

式(8)中: $e(n)$ 为 $n$ 时刻的误差; $y_p(n)$ 为 $n$ 时刻的过程实际输出; $y_m(n)$ 为 $n$ 时刻的模型预测输出.

### 1.5 过程预测输出

实际过程预测输出表达式为

$$y_p(n+i) = y_m(n+i) + e(n+i). \quad (9)$$

将式(6)、(8)代入式(9)可以得到

$$y_p(n+i) =$$

$$CA^i x_m(n) + \boldsymbol{\mu}(n)^T \mathbf{g}_n(i) + y_p(n) - y_m(n). \quad (10)$$

### 1.6 目标函数及控制量计算方程

预测函数的控制目的之一就是过程输出对参考轨迹有良好的跟踪性能.为此,目标函数通常设为使得在预测实域的各个拟合点上,过程预测输出与参考轨迹差值的平方和最小,即:

$$D = \sum_{i=1}^{n_s} [y_p(n+h_i) - y_r(n+h_i)]^2. \quad (11)$$

其中: $n_s$ 为优化时域拟合点的个数; $h_i$ 为第 $i$ 个拟合点上的数值.

又因为

$$\begin{aligned} & y_p(n+h_i) - y_r(n+h_i) = \\ & y_m(n+h_i) + e(n+h_i) - y_r(n+h_i) = \\ & CA^{h_i} x_m(n) + \sum_{j=1}^J \mu_j(n) g_{nj}(h_i) + y_p(n) - \\ & y_m(n) - C(n) + \alpha^{h_i} [C(n) - y_p(n)] = \\ & \sum_{j=1}^J \mu_j(n) g_{nj}(h_i) - \{ (1 - \alpha^{h_i}) [C(n) - \\ & y_p(n)] - C(A^i - I)x_m(n) \}. \end{aligned} \quad (12)$$

于是,目标函数可以化简为

$$D = \sum_{i=1}^{n_s} [\boldsymbol{\mu}(n)^T \mathbf{g}_n(h_i) - d(n+h_i)]^2. \quad (13)$$

其中: $\boldsymbol{\mu}(n) = [\mu_1(n), \mu_2(n), \dots, \mu_J(n)]^T$ ;  
 $\mathbf{g}_n(h_i) = [g_{n1}(h_i), g_{n2}(h_i), \dots, g_{nJ}(h_i)]^T$ ;  
 $d(n+h_i) = (1 - \alpha^{h_i}) [C(n) - y_p(n)] - C(A^i - I)x_m(n)$ .

优化的目的就是寻找一组最优系数 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_J$ ,使在整个优化时域内,预测输出尽可能接近参考轨迹,即 $D$ 得极小值.

由 $\frac{\partial D}{\partial \boldsymbol{\mu}(n)} = 0$ ,可知:

$$\frac{\partial D}{\partial \boldsymbol{\mu}(n)} = 2\mathbf{g}_n \mathbf{g}_n^T \boldsymbol{\mu}(n) - 2\mathbf{g}_n d(n) = 0;$$

$$\boldsymbol{\mu}(n) = (\mathbf{g}_n \mathbf{g}_n^T)^{-1} \mathbf{g}_n d(n). \quad (14)$$

其中: $\mathbf{g}_n = [\mathbf{g}_n(h_1), \mathbf{g}_n(h_2), \dots, \mathbf{g}_n(h_i)]^T =$

$$\begin{bmatrix} g_{n1}(h_1) & g_{n1}(h_2) & \dots & g_{n1}(h_{n_s}) \\ g_{n2}(h_1) & g_{n2}(h_2) & \dots & g_{n2}(h_{n_s}) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_{nJ}(h_1) & g_{nJ}(h_2) & \dots & g_{nJ}(h_{n_s}) \end{bmatrix};$$

$$d(n) = \begin{bmatrix} d(n+h_1) \\ d(n+h_2) \\ \vdots \\ d(n+h_{n_s}) \end{bmatrix}$$

不妨令 $N = (\mathbf{g}_n \mathbf{g}_n^T)^{-1} \mathbf{g}_n$ ,代入(14),可以简化为

$$\boldsymbol{\mu}(n) = Nd(n). \quad (15)$$

控制量方程为

$$u(n) = \sum_{j=1}^J \mu_j(n) f_{nj}(0) =$$

$$\boldsymbol{\mu}(n)^T \mathbf{f}_n(0) = \mathbf{f}_n(0)^T \boldsymbol{\mu}(n) =$$

$$[f_{n1}(0) f_{n2}(0) \dots f_{nJ}(0)] N \begin{bmatrix} d(n+h_1) \\ d(n+h_2) \\ \vdots \\ d(n+h_{n_s}) \end{bmatrix} =$$

$$\mathbf{f}_n(0)^T N \begin{bmatrix} 1 - \alpha^{h_1} \\ 1 - \alpha^{h_2} \\ \vdots \\ 1 - \alpha^{h_{n_s}} \end{bmatrix} [C(n) - y_p(n)] -$$

$$\mathbf{f}_n(0)^T N C \begin{bmatrix} A^{h_1} - I \\ A^{h_2} - I \\ \vdots \\ A^{h_{n_s}} - I \end{bmatrix} =$$

$$k_0 [C(n) - y_p(n)] + k_m x_m(n). \quad (16)$$

$$\text{其中: } k_0 = \mathbf{f}_n(0)^T N \begin{bmatrix} 1 - \alpha^{h_1} \\ 1 - \alpha^{h_2} \\ \vdots \\ 1 - \alpha^{h_{n_s}} \end{bmatrix}; k_m = -\mathbf{f}_n(0)^T N C \begin{bmatrix} A^{h_1} - I \\ A^{h_2} - I \\ \vdots \\ A^{h_{n_s}} - I \end{bmatrix}$$

由以上推导可知,PFC控制输入可简单表示为

$$u(n) = k_0 [C(n) - y_p(n)] + k_m x_m(n). \quad (18)$$

式(18)中,系数 $k_0, k_m$ 均可以离线计算, $C(n), y_p(n)$ 均已知,需要在线计算的量只有模型状态值 $x_m(n)$ 、控制量 $u(n)$ 、过程和模型的预测误差.因此,与其他预测控制方法相比,PFC具有算法简单、计算量小的优点.

## 2 仿真研究及分析

本文取文献[8]中的励磁系统模型,具体参数为:发电机放大系数  $K_G = 20.15$ ;电压传感器的输入输出比例  $K_R = 0.015$ ;放大环节的电压比例  $K_{SCR} = 2.82$ ;发电机时间常数  $T_G = 5$  s;滤波回路时间常数  $T_R = 0.05$  s;放大环节时间常数  $T = 0.0045$  s.

将模型离散化,表示成状态空间方程(5)的形式为

$$\begin{cases} x_m = \begin{pmatrix} 0.1084 & 0 & 0 \\ 0.0403 & 0.9980 & 0 \\ 0 & 0.0027 & 0.8187 \end{pmatrix} x_m(n-1) + \\ \begin{pmatrix} 2.5143 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u(n-1), \\ y_m = (0 \ 0 \ 1) x_m. \end{cases} \quad (22)$$

同时在本文中 PFC 采用的基函数为阶跃函数,取采样周期为  $T = 0.01$  s,期望参考时间为  $T_r = 0.5$  s.

同步发电机励磁系统是典型的非线性系统,难以确定精确的数学模型,所以研究模型失配时的控制效果是十分有意义的.在仿真中,取失配模型参数为  $K_G = 10, K_R = 0.015, K_{SCR} = 2, T_G = 5$  s,  $T_R = 0.05$  s,  $T = 0.0045$  s.

从以上参数可以看出,模型的失配程度是比较大的,  $K_G$  减小到原来的一半,仿真结果如图 1 所示.从图 1 中可以看出:在模型失配程度很大的情况下, PFC 仍然可以取得较好的控制效果,且动态性能和克服干扰的性能均没有受到影响.

通过参数整定,使 PID 与分数阶 PID 控制器都得到较好的控制效果,仿真输出拟合曲线如图 2 所示.从图 2 中可以初步得出:预测函数控制器的控制效果要明显好于分数阶 PID 和 PID 控制器.为了进一步研究,将图 2 关键点进行局部放大,如图 3 和 4 所示.图 3 是同步发电机启动过程输出拟合曲线,即图 2 中启动部分的放大图;图 4 是同步发电机遇干扰时的输出拟合曲线,即图 2 中 5 s 部分的放大图.

从图 3 中可以看出:从稳定时间来看, PFC 控制器在 0.8 s 左右达到稳定,而分数阶 PID 和 PID 控制器则需要 1.2 s 左右;从超调量来看, PFC 控制器几乎没有超调,而分数阶 PID 和 PID 控制器的超调量都较大;另外, PFC 控制器调整时间很短,而分数阶 PID 和 PID 控制器调整时间较长且振荡严重,这样

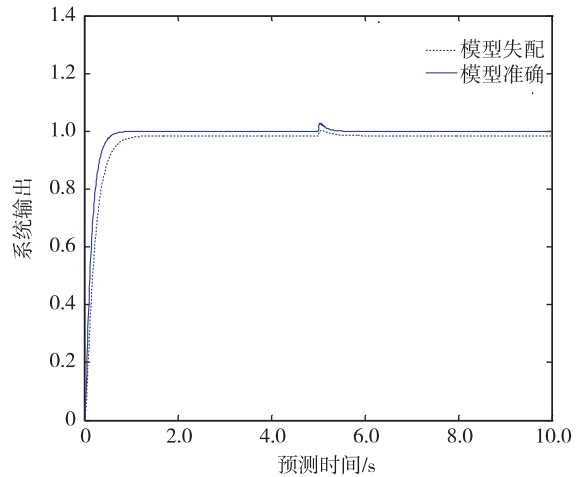


图 1 模型失配拟合曲线

Fig. 1 The fitting curve of inaccurate model output

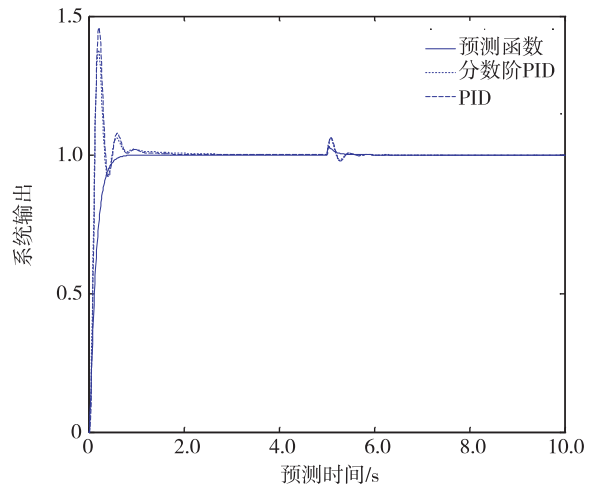


图 2 系统输出拟合曲线

Fig. 2 The fitting curve of system output

PID 和 PID 控制器很容易引起电网低频振荡.通过以上 3 个方面的对比,表明电机在启动阶段预测函数控制器的控制效果要明显优于分数阶 PID 和 PID 控制器.

由图 4 可知:1) 在遇同样大小干扰的情况下, PFC 控制器的超调量小于分数阶 PID 和 PID 控制器,使其对系统绝缘的要求就小于分数阶 PID 和 PID 控制器,也更经济,特别是对于未来的超高压输电, PFC 控制器的这一优点将表现得更加明显;2) PFC 控制器的调整时间只要 0.5 s 左右,而分数阶 PID 和 PID 控制器则需要 1 s 左右,是 PFC 控制器的调整时间的 1 倍;3) 与电机启时的情况类似,预测函数控制器可以有效减少由于控制器给电网带来的低

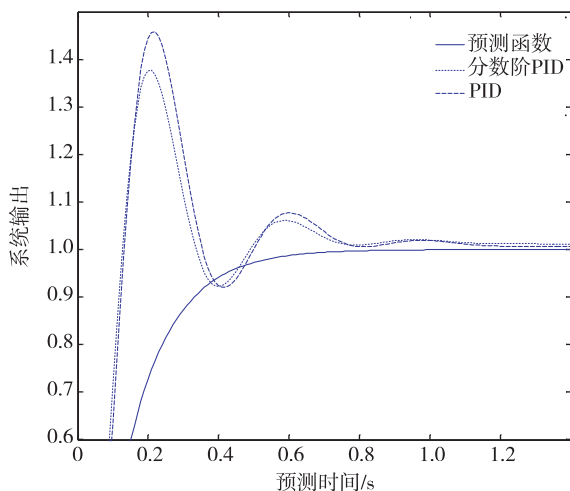


图3 启动输出拟合曲线

Fig. 3 The fitting curve of starting output

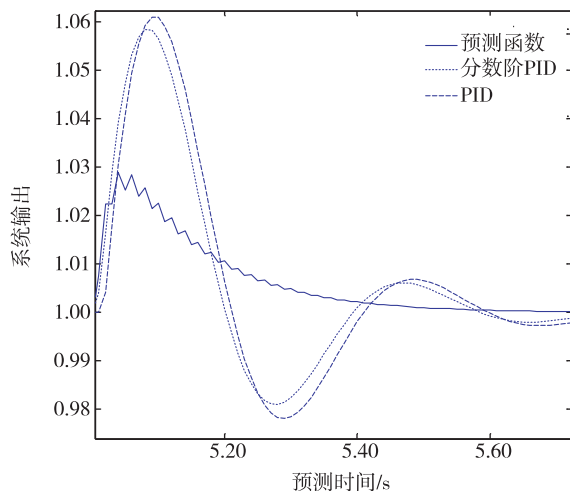


图4 干扰输出拟合曲线

Fig. 4 The fitting curve of interference output

频振荡。所以在克服干扰方面,预测函数控制器相对于传统控制器有了很大的改进。

### 3 结论

本文把预测函数控制算法成功地运用到同步发电机励磁控制系统中。仿真结果表明:预测函数控制对励磁系统的模型要求不高,在模型失配时同样可以取得比较好的控制效果;在同步发电机的启动过程中,系统稳定性好、超调和稳态误差均很小;在面对干扰时,系统达到再次稳定所用时间较短,所以无论从技术指标还是经济指标上来看,预测函数控制器的控制效果明显优于分数阶PID和PID控制器。

预测函数控制算法为电力系统稳定器的设计提供了一种新的选择。

### 参考文献

#### References

- [1] Kuntze H B, Jacobasch A, Richalet J, et al. On the predictive functional control of an elastic industrial robot [C] // Proceedings of 25th Conference on Decision and Control. Athens, 1986: 1877-1881
- [2] Schill J W. Predictive functional control: application to fast and accurate robots [C] // Proceedings of the 10th IFAC World Congress. Munich, 1997: 251-258
- [3] 王树青, 金晓明. 先进控制技术应用实例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 259-272  
WANG Shuqing, JIN Xiaoming. Application examples of advanced control technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 259-272
- [4] 张泉灵, 王树青. 化学反应器温度跟踪预测函数控制的研究及应用 [J]. 控制理论与应用, 2001, 18(4): 559-563  
ZHANG Quanling, WANG Shuqing. Studies and applications of predictive functional control in temperature tracking of chemical reactors [J]. Control Theory and Applications, 2001, 18(4): 559-563
- [5] 潘红华, 金建祥, 苏宏业, 等. 聚氯乙烯聚合反应过程的串级预测函数控制 [J]. 化工自动化及仪表, 1998, 25(A12): 26-29  
PAN Honghua, JIN Jianxiang, SU Hongye, et al. Application of cascade predictive functional control in PVC polymerization process [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 1998, 25(A12): 26-29
- [6] 曲峰林. 预测函数控制及其在伺服系统中的应用研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学计算机科学与技术学院, 2006  
QU Fenglin. A study on predictive functional control technology and its application in servo system [D]. Wuhan: College of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, 2006
- [7] 刘辉, 李啸骢, 韦化. 一种基于MAC的非线性预测励磁控制器的设计 [J]. 继电器, 2005, 33(8): 1-5  
LIU Hui, LI Xiaocong, WEI Hua. Design of nonlinear predictive excitation control based on MAC [J]. Relay, 2005, 33(8): 1-5
- [8] 黄小锋. PID在发电机励磁控制系统中的应用 [J]. 电工技术, 2007(9): 79-80  
HUANG Xiaofeng. Application of PID in excitation control system of synchronous generator [J]. Electric Engineering, 2007(9): 79-80

## Application of predictive function control algorithm in excitation system of synchronous generator

NI Jiajian<sup>1</sup> GUO Wei<sup>1</sup> WANG Bo<sup>1</sup> WU Qing<sup>1</sup> CAO Lei<sup>1</sup> YOU Hui<sup>1</sup> FANG Hao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Information and Cybernetics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Predictive Function Control (PFC) shares the same working principle with traditional predictive control methods, namely model prediction, rolling optimization and feedback compensation. Yet the PFC overmatches traditional ones in its simple algorithm, low computational burden, fast tracking and high precision, which makes it suitable to fast systems, such as excitation system of synchronous generator. This paper introduces the basic principles and characteristics of PFC and applies it to the synchronous generator excitation system. Simulation results show that the PFC can control the synchronous generator's port voltage, short circuit voltage and open circuit voltage, and the control effect of PFC is better than that of PID and FOPID.

**Key words** predictive functional control; synchronous generator; excitation control