

# 基于预测函数与线性多变量反馈控制的 同步发电机励磁控制

肖健梅, 张 科, 王锡淮

(上海海事大学 电气自动化系, 上海 201306)

**摘要:** 基于预测函数设计了励磁控制器对发电机端电压进行控制。同时设计一种以发电机功角偏差、角速度偏差以及有功功率偏差的线性组合作为控制目标的线性多变量励磁控制器。将 2 种励磁控制器进行结合, 以实现预测函数和线性多变量并行励磁控制, 在有效提高电力系统稳定性的前提下还能解决发电机端电压的稳定问题。最后通过 MATLAB/Simulink 仿真证明了改进后的励磁控制器的有效性。

**关键词:** 同步发电机; 励磁控制; 预测函数控制; 线性多变量控制; 电压控制; 稳定性; MATLAB

**中图分类号:** TM 31

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.024

## 0 引言

同步发电机励磁控制系统是电力系统的重要组成部分, 其控制性能的好坏直接影响电力系统运行的可靠性和稳定性<sup>[1]</sup>。目前对励磁系统所用的控制方法通常还是运用常规 PID 算法进行控制。随着电力系统的规模越来越大, 常规 PID 控制已不能满足系统的动态和静态运行性能要求。近几年, 鲁棒控制、迭代学习控制, 预测控制、自适应控制等新型励磁控制方法得到了广泛的研究<sup>[2-7]</sup>。

本文首先对预测函数控制(PFC)算法进行分析, 将 PFC 应用到励磁系统的机端电压控制中, 设计出一种 PFC 励磁控制器; 并设计了一种线性多变量励磁控制器, 能有效地控制发电机有功功率、发电机功角以及转子角速度, 但是对机端电压的控制不太理想。因此, 将 2 种控制方法并行对励磁系统进行控制。改进后的 PFC 和线性多变量并行的励磁控制器能在保证电力系统稳定的同时稳定发电机端电压。最后, 通过仿真验证了其有效性。

## 1 同步发电机励磁系统的数学模型

本文采用单机无穷大电力系统模型来研究发电机的励磁控制问题。其模型如图 1 所示。图中, G 为发电机;  $U_i$  为发电机机端电压;  $x_T$  为变压器电抗;

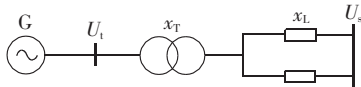


图 1 单机无穷大电力系统模型

Fig.1 Model of single-machine infinite-bus power system

收稿日期: 2014-06-02; 修回日期: 2015-03-23  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175321); 上海市教委科研创新重点项目(12ZZ158)  
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51175321) and the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission(12ZZ158)

$x_L$  为线路电抗;  $U_s$  为无穷大母线电压。

图 1 所示的发电机励磁控制系统的数学模型可用式(1)来表示<sup>[5,8]</sup>:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega_0}{H} \left[ P_m - P_e - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) \right] \\ \dot{E}'_q &= -\frac{1}{T'_d} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_d \Sigma} U_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} U_f \\ T'_d &= T_{d0} x'_d \Sigma / x_d \Sigma \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $\delta$  为发电机功角;  $\omega$  为发电机转子角速度;  $\omega_0$  为发电机稳态角速度;  $H$  为机械转子惯量;  $E'_q$  为  $q$  轴暂态电势;  $D$  为阻尼系数;  $x_d$  和  $x'_d$  分别为发电机  $d$  轴同步电抗和瞬变电抗;  $T_{d0}$  为发电机定子开路时励磁绕组的时间常数;  $T'_d$  为发电机定子闭路时励磁绕组时间常数;  $x_d \Sigma = x_d + x_T + x_L$ ;  $x'_d \Sigma = x'_d + x_T + x_L$ ;  $U_f$  为励磁控制输出电压;  $P_m$  为发电机的机械功率;  $P_e$  为发电机电磁有功功率。

## 2 线性多变量励磁控制器设计

式(1)中, 发电机电磁有功功率  $P_e$  的表达式为:

$$P_e = \frac{E'_q U_s}{x'_d \Sigma} \sin \delta + \frac{U_s^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x'_d \Sigma x_q \Sigma} \sin(2\delta) \quad (2)$$

其中,  $x_q$  为发电机  $q$  轴同步电抗;  $x_q \Sigma = x_q + x_T + x_L$ 。

若忽略瞬变的凸极效应, 则  $x'_d = x_q$ ,  $P_e$  可表示为:

$$P_e = (E'_q U_s / x'_d \Sigma) \sin \delta = E'_q I_q \quad (3)$$

把式(1)的发电机三阶状态方程用矩阵形式表示为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \\ \mathbf{x} &= [\delta \quad \omega \quad E'_q]^T \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \frac{\omega_0}{H} P_m - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} \frac{E'_q U_s}{x'_d \Sigma} \sin \delta \\ -\frac{1}{T'_d} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_d \Sigma} U_s \cos \delta \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = [0 \quad 0 \quad 1/T_{d0}]^T$$

其中,  $u$  为系统的控制量输入。

为了保证发电机外部的动态品质和发电机功角的稳定, 也为了能更容易地实现控制, 把第 1 个坐标变换方程写为:

$$z_1 = y = h(\mathbf{x}) = \delta - \delta_0 \quad (5)$$

经过李导数的分析计算可得:

$$\begin{aligned} L_g L_g^0 h(\mathbf{x}) &= \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} g(\mathbf{x}) = 0 \\ L_g L_f h(\mathbf{x}) &= 0 \\ L_g L_f^2 h(\mathbf{x}) &= -\frac{\omega_0}{HT_{d0}} \frac{U_s}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta \neq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

因此在发电机运行范围内  $h(\mathbf{x})$  对系统的关系度为 3, 所以原三阶系统可以通过三阶反馈线性化来实现。

由微分几何理论, 可以得出第 2 及第 3 个坐标方程式为:

$$z_2 = \dot{z}_1 = L_f h(\mathbf{x}) = \Delta \omega \quad (7)$$

$$z_3 = \dot{z}_2 = L_f^2 h(\mathbf{x}) = \dot{\omega} \quad (8)$$

结合这 3 个坐标变换方程得到了  $\mathbf{z} = \Phi(\mathbf{x})$  的坐标变换, 接着检验此变换是否为同胚变换。首先计算  $\Phi(\mathbf{x})$  的雅可比矩阵, 即:

$$J_\Phi = \frac{\partial \Phi(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{\omega_0 E'_q U_s}{H x'_{d\Sigma}} \cos \delta & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0 U_s}{H x'_{d\Sigma}} \sin \delta \end{bmatrix} \quad (9)$$

当  $\cos \delta \neq 0$  即  $\delta \neq \pm 90^\circ$  时,  $J_\Phi$  为非奇异矩阵, 那么  $\mathbf{z} = \Phi(\mathbf{x})$  就为同胚变换。通过坐标变换可以把原系统变换成完全可控线性系统, 即将式(1)变换成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = V \end{cases} \quad (10)$$

根据现代控制理论可得式(10)的最优线性控制规律, 即:

$$V = -k_1 z_1 - k_2 z_2 - k_3 z_3 \quad (11)$$

其中,  $k_1, k_2, k_3$  为最优反馈增益系数。

将式(10)和(11)表示为矩阵形式:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A} \mathbf{z} \quad (12)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 \end{bmatrix}$$

选择李雅普诺夫(Lyapunov)函数<sup>[2-3]</sup>为:

$$V(\mathbf{z}) = \mathbf{z}^T \mathbf{P} \mathbf{z} \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{P}$  为正定实对称矩阵, 那么  $V(\mathbf{z})$  也是正定的。

$$\dot{V}(\mathbf{z}) = \mathbf{z}^T (\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P}) \mathbf{z} = -\mathbf{z}^T \mathbf{Q} \mathbf{z} \quad (14)$$

$$\mathbf{Q} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A})$$

若在保证系统能在原点渐近进入稳定, 可以通过参数  $k_1, k_2, k_3$  的选择使得  $\mathbf{Q} > 0$ 。

通过式(11)可更进一步得到:

$$V = -k_1 \Delta \delta - \left( k_2 - k_3 \frac{D}{J} \right) \Delta \omega + k_3 \frac{\omega_0}{J} \Delta P_e \quad (15)$$

取  $k_\delta = -k_1, k_\omega = -\left( k_2 - k_3 \frac{D}{J} \right), k_p = k_3 \frac{\omega_0}{J}$ 。由式(15)可得线性多变量反馈的最优控制规律为:

$$V_{\text{PI}} = k_\delta \Delta \delta + k_\omega \Delta \omega + k_p \Delta P_e \quad (16)$$

其中,  $k_\delta, k_\omega, k_p$  为最优反馈增益系数。

### 3 PFC 励磁控制器设计

预测控制算法与经典控制算法的不同在于其不依赖于精确的模型作为参考, 还可以同现代控制的最优方法进行结合, 目前在工业过程控制中也取得了非常好的控制效果。但是其也存在着一些自身的不足, 例如对实时性要求较低的系统的控制效果较好, 但是对实时性要求高的系统的控制却不尽如人意, 且存在算法过于复杂、计算时间过长等问题。因此, 提出了一种改进的预测控制方法, 即 PFC 算法<sup>[9-16]</sup>。PFC 相比于传统的预测控制拥有算法简便、计算量不大、跟踪迅速且精度高等优点。

#### 3.1 PFC 算法

由于 PFC 属于预测控制的一种, 因此它也具有预测控制的 3 个基本特征(预测模型、滚动优化和反馈校正)。不同的是 PFC 中引入了基函数这个重要的概念。在 PFC 中, 新加入的未来控制作用被表示为若干已知函数  $f_j(i)$  ( $j=1, 2, \dots, n_B$ ) 的线性组合, 即:

$$u(k+i) = \sum_{j=1}^{n_B} \mu_j(n) f_j(i) \quad (17)$$

其中,  $\mu(k+i)$  为在  $k+i$  时刻的控制量;  $n_B$  为基函数的个数;  $f_j(i)$  为第  $j$  个基函数在  $t=iT$  时刻的值,  $T$  为采样周期;  $\mu_j(n)$  为基函数的线性组合系数。

PFC 的参考轨迹可以取多种形式, 对于一个渐近稳定的系统, 通常采用一阶指数形式:

$$y_r(k+i) = c(k+i) - \beta^i [c(k) - y_p(k)] \quad (18)$$

其中,  $y_r(k+i)$  为  $k+i$  时刻的参考轨迹值;  $c(k+i)$  为  $k+i$  时刻的设定值;  $y_p(k)$  为  $k$  时刻的模型预测输出;

$\beta$  为衰减系数, 一般取  $\beta = \exp\left(\frac{-3T}{T_r}\right)$ ,  $T_r$  为参考轨迹的期望闭环响应时间。

目前 PFC 的预测模型常采用离散状态空间模型。预测模型状态空间表达式可写为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_m(k) = \mathbf{G}_m \mathbf{X}_m(k-1) + \mathbf{H}_m u(k-1) \\ y_m(k) = \mathbf{C}_m \mathbf{X}_m(k) \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $\mathbf{X}_m$  为预测模型的状态向量;  $y_m$  为预测模型的输出;  $\mathbf{G}_m, \mathbf{H}_m, \mathbf{C}_m$  为预测模型状态方程的系数矩阵。

将式(19)推导可得:

$$y_m(k+i) = C_m G_m^i X_m(k) + (\mu(k))^T g_k(i) \quad (20)$$

$$\mu(k) = [\mu_1(k), \mu_2(k), \dots, \mu_{n_b}(k)]^T$$

$$g_k(i) = [g_{k1}(i), g_{k2}(i), \dots, g_{kn_b}(i)]^T$$

如果基函数已经确定,可以通过式(21)来离线算出  $g_{kj}(k)$ :

$$g_k(i) = C_m G_m^{i-1} H_m f_{kj}(0) + \dots + C_m G_m^0 H_m f_{kj}(i-1) \quad (21)$$

对于线性系统,经过误差补偿后的预测输出可表示为:

$$y_p(k+i) = C_m G_m^i X_m(k) + (\mu(k))^T g_k(i) + y_p(k) - y_m(k) + \sum_{j=1}^{n_s} e_j(k) i^j \quad (22)$$

其中,  $e_j(k)$  为过程与模型的预测误差,它是由  $k$  时刻的误差和一个修正误差组成,这个过程称为自补偿;  $n_s$  为误差补偿的阶数。

优化目标就是要寻求一组加权系数,使预测输出在优化时域内尽可能接近参考轨迹,通常采用如下的二次型优化性能指标,即:

$$J_{PFC} = \sum_{i=1}^{n_H} [y_r(k+h_i) - y_p(k+h_i)]^2 \quad (23)$$

其中,  $n_H$  为拟合点个数,它应该大于或等于  $n_B$ ;  $h_i (i=1, 2, \dots, n_H)$  为选定的拟合点。

将上式进行简化,令  $\frac{\partial J_{PFC}}{\partial \mu(k)} = 0$ , 可求得控制量的方程为:

$$u(k) = k_0 [c(k) - y(k)] + k_m X_m(k) \quad (24)$$

其中,系数  $k_0, k_m$  可在离线下先计算出来;  $c(k), y(k)$  为已知函数。所以,在 PFC 中需要在线计算的只有模型状态值  $X_m(k)$  和控制量  $u(k)$ , 预测函数的计算相对其他控制而言简化了很多。

PFC 的原理图如图 2 所示,图中  $d$  为扰动。

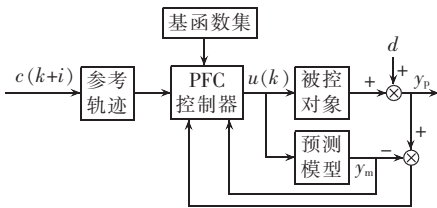


图 2 预测函数控制的原理图

Fig.2 Schematic diagram of predictive function control

### 3.2 预测模型的建立

预测模型是 PFC 非常重要的部分,只有选定好预测模型才能实现 PFC。PFC 算法是在传统的预测控制算法上改进得到的,所以它也具备预测控制算法的特点,即被控对象并不需要其精确的数学模型。在预测模型失配的情况下,PFC 仍然可以很好地进行控制。这就为许多数学模型不易获得的大型系统或者数学模型过于复杂的非线性系统提供了一种简便且有效的控制方法。

励磁系统是一个复杂的非线性系统,因此要获

得被控量和状态变量之间的传递函数是十分困难的。先对一个具体的非线性励磁系统进行系统辨识,得到系统的近似线性传递函数;然后将得到的传递函数作为预测模型来设计一种 PFC 励磁控制器。

根据式(1)所表示的单机无穷大系统的状态方程,在 MATLAB/Simulink 中用 S-函数编写一个非线性励磁系统,其中系统的各项参数取值如下:同步发电机参数<sup>[13]</sup>,  $H=12.922$  s,  $D=0.15$  p.u.,  $U_s=1.0$  p.u.,  $T_{d0}=6.55$  s,  $x_d=0.8258$  p.u.,  $x'_d=0.1045$  p.u.; 线路及变压器参数,  $x_T=0.0292$  p.u.,  $x_L=0.0266$  p.u.; 系统平衡点的参数,  $\delta_0=0.7439$  rad,  $\omega_0=314.16$  rad/s,  $E'_{d0}=0.9361$  p.u.,  $U_{i0}=1.0253$  p.u.,  $U_{l0}=1.838$  p.u.。

在状态方程(1)中,励磁绕组电压  $U_f$  为被控量,要控制的是输出量机端电压  $U_t$ ,所以需要获得  $U_t$  和  $U_f$  之间的传递函数。

基于最小二乘法,在 MATLAB 仿真环境下,将上述励磁系统模型的输入输出数据导入工具箱中提供交互式的图形界面工具,能方便地实现数据的预处理、模型类型的选择、参数的估计以及模型验证和比较等功能。

针对所建励磁系统,对输入端加入噪声测试,并将输入输出数据都导入系统辨识工具箱,在工具箱中可以估计出系统的阶数为三阶;然后针对导入的数据采用最小二乘法进行模型参数辨识,其中模型采用自回归各态经历 (ARX) 模型。经过估算可以得到传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.0406s^2 + 0.0085s + 2.8582}{s^3 + 1.0708s^2 + 100.787s + 56.4704} \quad (25)$$

### 3.3 PFC 的励磁控制器设计

通过系统辨识得到了预测模型的传递函数,接下来对所得预测模型设计 PFC 励磁控制器。设计步骤如下。

a. 由于式(19)的 PFC 的预测模型表达式采用的是离散的状态空间模型,因此将式(25)的传递函数进行离散化,取采样周期  $T=0.005$  s。离散化后,所得各项系数矩阵为:

$$G_m = \begin{bmatrix} 0.9934 & -0.03144 & -0.008796 \\ 0.07975 & 0.9987 & -0.0003522 \\ 0.003992 & 0.009996 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_m = \begin{bmatrix} 0.002492 \\ 9.98 \times 10^{-5} \\ 3.328 \times 10^{-7} \end{bmatrix}$$

$$C_m = [0.0812 \quad 0.001063 \quad 0.1786]$$

b. 根据采样周期  $T=0.005$  s 和参考轨迹的期望闭环响应时间  $T_r=0.5$  s, 确定参考轨迹的衰减系数  $\beta = \exp\left(\frac{-3T}{T_r}\right) = 0.97$ 。

c. 取 3 个拟合点,分别为  $h_1=3, h_2=5, h_3=7$ 。基

函数采用一个阶跃响应,即  $n_B=1$ 。将上述所得参数  $G_m$ 、 $H_m$ 、 $C_m$  代入式(21),可得: $g_1(3)=6.0433 \times 10^{-4}$ ;  
 $g_1(5)=0.001$ ; $g_1(7)=0.0014$ 。

d. 进而离线算出:

$$k_0=137.2822, \quad k_m=[2.617 \quad 3.7368 \quad 3.5163]$$

e. 通过编写 S-函数实现对预测模型的状态向量  $X_m(k)$  的计算,因为是一个三阶模型,所以 S-函数是一个单输入三输出模型。

f. 将所得  $X_m(k)$  和所求  $k_0$ 、 $k_m$ ,通过编写嵌入式 MATLAB 函数模块实现 PFC,其中 PFC 的控制输出量  $u(k)$  的计算式如式(24)所示。

g. 将控制输出量  $u(k)$  连接到励磁系统的输入端  $U_f$  来对机端电压  $U_t$  进行 PFC,对其控制规律用  $U_{f2}$  来表示。

### 3.4 基于 PFC 和线性多变量并行的励磁控制器设计

在式(16)中线性多变量反馈控制能有效地控制发电机功角  $\delta$ 、转子角速度  $\omega$  以及发电机电磁有功功率  $P_e$ ,但对发电机端电压的控制效果不太理想。

对此,设计了一种改进的励磁控制器,即 PFC 和线性多变量并行的励磁控制器。这种励磁控制器在保证发电机功角、转子角速度以及电磁有功功率稳定的同时,能对机端电压实现有效控制。用  $U_{f1}$  表示线性多变量励磁控制,用  $U_{f2}$  来表示 PFC 励磁控制,则改进后的励磁控制器的控制规律可表示为:

$$U_f = U_{f1} + U_{f2} \quad (26)$$

## 4 仿真研究

对 3 种励磁控制器进行 MATLAB/Simulink 仿真实验。励磁系统的仿真模型采用 3.2 节中所建立模型,并对此励磁系统设置三相短路、机械功率小扰动和机械功率大扰动 3 种故障<sup>[8]</sup>。观察当系统出现突发故障时,3 种励磁控制器对机端电压  $U_t$ 、发电机电磁有功功率  $P_e$ 、发电机功角  $\delta$  以及转子角速度  $\omega$  的控制效果。

### 4.1 三相短路实验

励磁系统 0.5 s 发生三相短路故障,0.2 s 后切除,机端电压  $U_t$ (标么值)、发电机电磁有功功率  $P_e$ (标么值)、发电机功角  $\delta$  及转子角速度  $\omega$  的动态响应曲线分别如图 3—6 所示(图中粗实线表示 PFC 和线性多变量并行控制,虚线表示线性多变量控制,细实线表示 PFC;后同)。从图 3 中可以很明显看出,线性多变量控制机端电压时,超调大,振荡次数多且收敛速度慢,对机端电压的控制确实不理想;PFC 和线性多变量并行控制有很大的改善,超调明显小于线性多变量控制,振荡次数是 3 种控制中最少的,收敛速度也是最快的,虽然在初阶段的超调稍稍大于 PFC,但在振荡次数和收敛时间方面相对于 PFC 有着很明显的改善。从图 4—6 中都能明显看

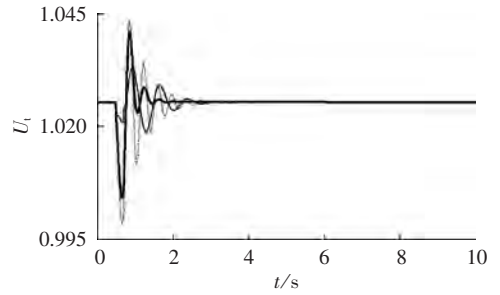


图 3 三相短路时机端电压仿真波形

Fig.3 Simulative curves of generator terminal voltage for three-phase short circuit

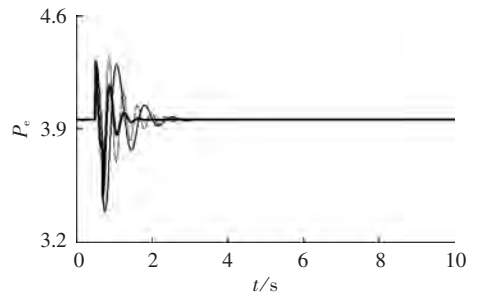


图 4 三相短路时有功功率仿真波形

Fig.4 Simulative curves of active power for three-phase short circuit

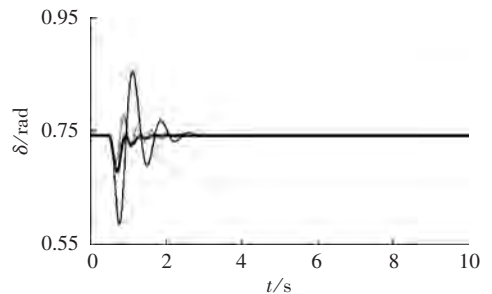


图 5 三相短路时发电机功角仿真波形

Fig.5 Simulative curves of generator phase angle for three-phase short circuit

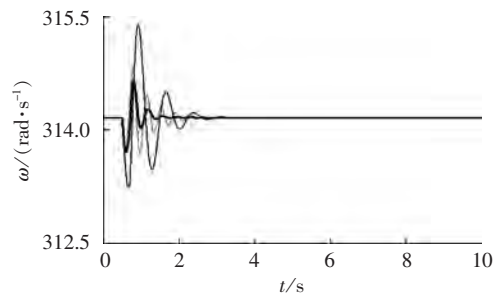


图 6 三相短路时转子角速度仿真波形

Fig.6 Simulative curves of angular velocity for three-phase short circuit

到改进后的励磁控制器是最好的,PFC 是最差的。通过仿真对比可以明显看出,PFC 对机端电压的控制有着不错的效果,线性多变量控制对其他 3 个变量的控制比较有优势,而改进后的 PFC 和线性多变量并行控制结合了 2 种控制方法的优点,在稳定系统的同时,也能保证机端电压的稳定。综上所述,当

系统发生三相短路故障时,PFC 和线性多变量并行励磁控制器在励磁控制方面最为理想。

### 4.2 机械功率小扰动实验

发电机机械功率  $P_m$  在  $t=0.5\text{s}$  时发生  $\Delta P_m=5\%$  的阶跃扰动。机端电压  $U_t$ (标么值)、发电机电磁有功功率  $P_e$ (标么值)、发电机功角  $\delta$  及转子角速度  $\omega$  的动态响应曲线分别如图 7—10 所示。从图 7 可以看到,PFC 和线性多变量并行控制在系统发生机械功率小扰动时,对机端电压的控制超调量有所改善,在振荡次数及收敛时间方面相比其他 2 种控制都有很明显的改善。从图 8—10 中可以看到,PFC 和线性多变量并行控制在超调量、振荡次数和收敛时间方面相比其他 2 种控制都有着很明显的优势,而在电磁有功功率、发电机功角以及转子角速度的控制方面,线性多变量控制相对于 PFC 有很大的改善,这也证明了线性多变

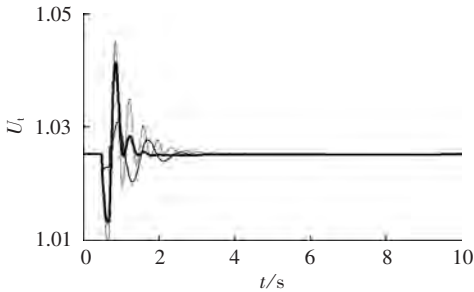


图 7 机械功率小扰动时机端电压仿真波形  
Fig.7 Simulative curves of generator terminal voltage for small mechanical power disturbance

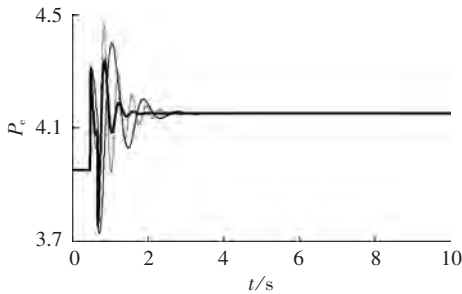


图 8 机械功率小扰动时有功功率仿真波形  
Fig.8 Simulative curves of active power for small mechanical power disturbance

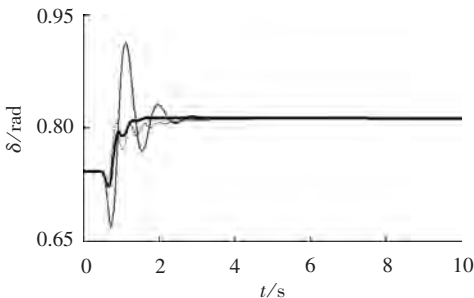


图 9 机械功率小扰动时发电机功角仿真波形  
Fig.9 Simulative curves of generator phase angle for small mechanical power disturbance

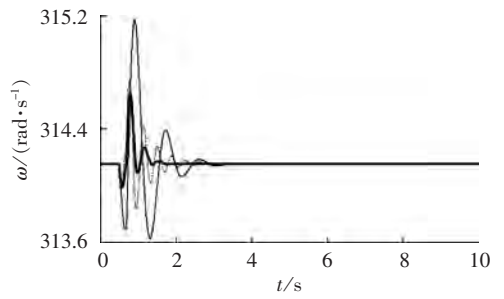


图 10 机械功率小扰动时转子角速度仿真波形  
Fig.10 Simulative curves of angular velocity for small mechanical power disturbance

量控制对有功功率、发电机功角和转子角速度有不错的控制效果。因此,当系统发生机械功率小扰动故障时,PFC 和线性多变量并行的励磁控制器也是最有效的。

### 4.3 机械功率大扰动实验

发电机机械功率在  $t=0.5\text{s}$  发生 20% 阶跃扰动,机端电压  $U_t$ (标么值)、发电机电磁有功功率  $P_e$ (标么值)、发电机功角  $\delta$  及转子角速度  $\omega$  的动态响应曲线分别如图 11—14 所示。从图 11 中可以看到,当系统机械功率发生大扰动故障时,线性多变量控制对机端电压的控制发生了偏离,而在 PFC 和线性多变量并行的励磁控制器的控制下,机端电压不仅能回到之前的稳定状态,而且收敛时间比 PFC 还要短,且振荡次数也有减少。所以,当系统面临大扰动时,PFC 和线性多变量并行控制对励磁系统机端电压的控制是最为有效的。从图 13 中看到,对于发电

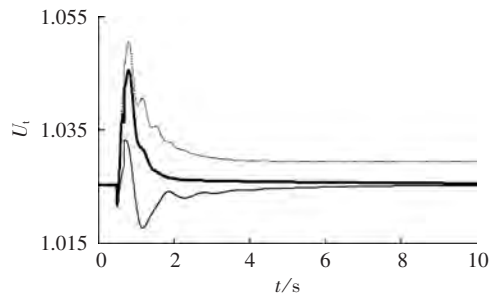


图 11 机械功率大扰动时机端电压仿真波形  
Fig.11 Simulative curves of generator terminal voltage for large mechanical power disturbance

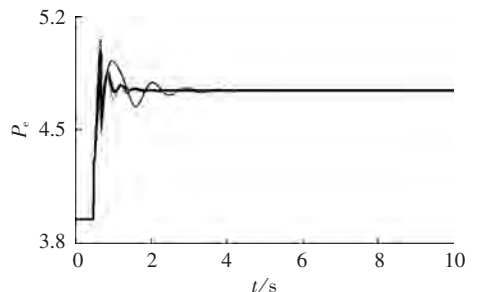


图 12 机械功率大扰动时有功功率仿真波形  
Fig.12 Simulative curves of active power for large mechanical power disturbance

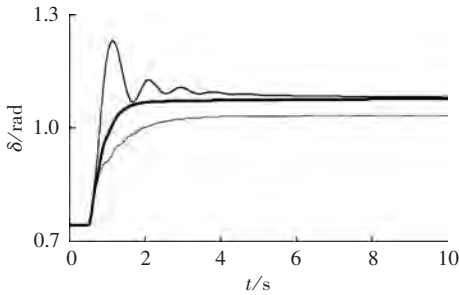


图 13 机械功率大扰动时发电机功角仿真波形

Fig.13 Simulative curves of generator phase angle for large mechanical power disturbance

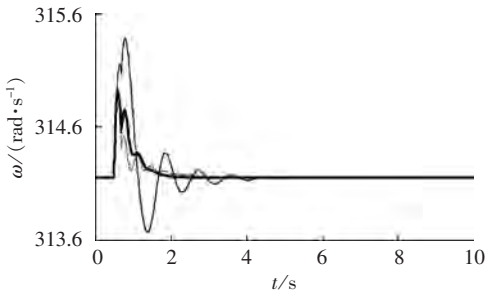


图 14 机械功率大扰动时转子角速度仿真波形

Fig.14 Simulative curves of angular velocity for large mechanical power disturbance

机功角,线性多变量控制也存在着偏离的现象,而 PFC 和线性多变量并行控制基本没有超调,收敛时间也大幅减少,并且振荡也几乎没有出现。从图 12 和图 14 中可以看到,对于有功功率和转子角速度, PFC 和线性多变量并行控制不管是在超调、振荡次数还是收敛时间方面相对于 PFC 都有着非常明显的改善,且相对于线性多变量控制也有相对的改善。综上所述,PFC 和线性多变量并行的励磁控制器在励磁控制方面确实有很大的提高。

## 5 结论

本文将 PFC 应用到励磁系统的机端电压控制中;同时还提出了一种线性多变量控制,它能很好地控制励磁系统的发电机电磁有功功率、发电机功角以及转子角速度,但是对机端电压的控制却不理想,尤其是在系统遭遇大扰动时,甚至发生了偏离的现象。在此基础上,本文将 PFC 和线性多变量控制进行结合,这种并行励磁控制器能在保证有功功率、发电机功角以及转子角速度稳定的情况下有效地控制机端电压。

## 参考文献:

[1] 程启明,程尹曼,薛阳,等. 同步发电机励磁控制方法的发展与展望[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):108-117.  
CHENG Qiming,CHENG Yinman,XUE Yang,et al. Development and prospects of excitation control methods for synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):

108-117.  
[2] 杨帆,阮阳,袁荣湘. 基于输出反馈的同步发电机非线性鲁棒励磁控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):65-71.  
YANG Fan,RUAN Yang,YUAN Rongxiang. Nonlinear robust excitation control based on output feedback for synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):65-71.  
[3] 徐敏,林辉. 基于迭代学习控制理论的励磁控制器设计[J]. 电力自动化设备,2006,26(3):69-72.  
XU Min,LIN Hui. Excitation controller design based on iterative learning control[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(3):69-72.  
[4] 赵洪山,兰晓明,周雪青. 基于平衡降阶模型的多机系统非线性励磁预测控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):61-67.  
ZHAO Hongshan,LAN Xiaoming,ZHOU Xueqing. Nonlinear excitation prediction control of multi-machine power systems based on balanced reduced model[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(22):61-67.  
[5] 胡伟,梅生伟,卢强,等. 多机系统的非线性自适应分散稳定控制[J]. 电力系统自动化,2000,24(21):7-10.  
HU Wei,MEI Shengwei,LU Qiang,et al. Nonlinear adaptive decentralized stabilizing control of multimachine system[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(21):7-10.  
[6] 石访,王杰,薛贵挺. 基于 Hamilton 理论改善多机系统暂态稳定性的励磁与 SVC 协调控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):48-52.  
SHI Fang,WANG Jie,XUE Guiting. Coordinated excitation and SVC control based on Hamilton theory for improving transient stability of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):48-52.  
[7] 李江,李国庆,邹维,等. 固定增益与变增益最优励磁控制策略的小扰动稳定域研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):97-100.  
LI Jiang,LI Guoqing,ZOU Wei,et al. Small signal stability region of power system with fixed or variable gain optimal excitation control[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):97-100.  
[8] 王锡淮,郑天府,肖健梅. 带电压调节的非线性鲁棒励磁控制策略研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(8):38-42.  
WANG Xihuai,ZHENG Tianfu,XIAO Jianmei. Nonlinear robust excitation control strategy with voltage regulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(8):38-42.  
[9] 张培建,梅杨. 非线性预测函数控制研究与应用[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):101-104.  
ZHANG Peijian,MEI Yang. Study and application of nonlinear predictive functional control[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(12):101-104.  
[10] 张嘉英,王秀玲,武欣梅. 火电厂制粉系统预测函数控制策略仿真[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):105-107.  
ZHANG Jiaying,WANG Xiuling,WU Xinmei. Simulation of predictive function control for pulverizing system of power plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):105-107.  
[11] RICHALET J,ABU E,ARBER C,et al. Predictive functional control:application to fast and accurate robots[C]//IFAC 10th World Congress. Munich,German:IFAC,1987:251-258.  
[12] KUNTZE H B,JACUBASCH A,RICHALET J,et al. On the predictive functional control of an elastic industrial robot[C]//

- 25th Control Decision Conference. Athens, Greece; [s.n.], 1986; 1877-1881.
- [13] HAN Pu, YU Ping, WANG Guoyu, et al. Predictive functional control in thermal power unit load systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10):47-52.
- [14] 郭伟, 吴东, 吴青. 基于 PID 预测函数的励磁控制研究[J]. 控制过程, 2012, 19(5):757-760.
- GUO Wei, WU Dong, WU Qing. Application of PID-type predict function of control algorithm in the excitation control [J]. Control Engineering of China, 2012, 19(5):757-760.
- [15] HU Jiasheng, PAN Honghua, SU Hongye, et al. Performance analysis for predictive functional control system[J]. Control Theory and Applications, 2007, 18(5):775-778.
- [16] 侯宁, 费树岷, 周磊. 基于小波函数的预测函数控制方法研究[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2014, 36(2):1-7.
- HOU Ning, FEI Shumin, ZHOU Lei. Study of the predictive

functional control algorithm based on wavelet function[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2014, 36(2):1-7.

#### 作者简介:



肖健梅

肖健梅(1962—),女,辽宁大连人,教授,硕士,主要研究方向为电力系统智能控制;

张科(1988—),男,江西南昌人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化与调度;

王锡淮(1961—),男,江苏淮安人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统建模与控制、系统优化(E-mail: wxh@shmtu.edu.cn)。

## Excitation control based on predictive function control and linear multi-variable feedback control for synchronous generator

XIAO Jianmei, ZHANG Ke, WANG Xihuai

(Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** An excitation controller based on predictive function is designed to control the terminal voltage of generator. A linear multi-variable excitation controller is designed as well, which takes the linear combination of the generator power angle deviation, angular velocity deviation and active power deviation as its control target. Two excitation controllers are integrated to realize the parallel excitation control based on the predictive function control and the linear multi-variable control, which ensures the terminal voltage stability of generator while improves the stability of power system effectively. The effectiveness of the integrated controller is proved by the simulative results of MATLAB/Simulink.

**Key words:** synchronous generator; excitation control; predictive function control; linear multi-variable control; voltage control; stability; MATLAB

(上接第 152 页 continued from page 152)

## Design and development of measuring & control system for wireless power transfer system

DENG Qijun<sup>1</sup>, LIU Jiangtao<sup>2</sup>, ZHOU Hong<sup>1</sup>, HU Wenshan<sup>1</sup>

(1. Department of Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Physics and Electrical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** During WPT(Wireless Power Transfer) system commissioning, some parameters should be adjusted, such as operating frequency, duty cycle & dead time of switch transistor, etc., some parameters should be sampled, such as voltage, current, etc., and the zero-voltage open-state of switch transistor operation should be ensured to obtain larger transmission power and higher transmission efficiency. A measuring & control system based on ARM and FPGA with corresponding host-computer software is designed. Its measuring & control board acquires the inputs of DC voltage and current, the outputs of high-frequency AC voltage and current, and the phase angle difference between AC voltage and current, based on which, the efficiency of WPT system is calculated. The designed system has been successfully applied to the wireless EV charging system, long-distance WPT system and experimental train system with on-rail wireless power supply.

**Key words:** magnetic resonant coupling; wireless power transfer; electric inverters; zero-voltage switching; measuring & control system