

基于强跟踪滤波器的自适应励磁控制器

张风营, 朱守真

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

AN ADAPTIVE EXCITATION CONTROLLER BASED ON STRONG TRACKING FILTER

ZHANG Feng-ying, ZHU Shou-zhen

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: A novel adaptive excitation controller is developed by introducing strong tracking filter in design of excitation controller of generators. According to the running status of the generator the strong tracking filter can acquire real time system parameters of the one machine-infinity bus system accurately. With the real time parameters the excitation controller adjusts itself on line to adapt the change of operating point of the system and disturbances of the system. The simulation results indicate that the presented adaptive excitation controller can improve stability of power system effectively and has good dynamic and static performance towards various disturbances.

KEY WORDS: Power system; Strong tracking filter; Adaptive control; Excitation controller

摘要: 该文引入强跟踪滤波器用于发电机励磁控制, 建立了一种新的自适应励磁控制器。该控制器根据发电机运行状态由强跟踪滤波器实时估计系统的扰动信息, 准确地获得单机无穷大模型中的系统参数, 以调整控制器, 使之得以适应系统运行点的变化以及系统遭受的干扰。仿真研究表明, 文中所建立的自适应励磁控制器可以有效地提高电力系统的稳定性, 在系统遭受不同干扰下均表现出良好的动、静态性能。

关键词: 电力系统; 强跟踪滤波器; 自适应控制; 励磁控制器

1 引言

发电机励磁系统除了维持机端电压恒定外, 还能有效地提高系统的稳定性, 因此发电机励磁系统一直是电力系统稳定控制的主要研究对象^[1-12]。一些学者基于现代控制理论建立了线性最优励磁控制器 (LOEC)^[1-4]、基于微分几何方法建立了非线性

控制器^[5-7]等诸多励磁控制器, 取得了很好的效果, 有些还在实际中得到了应用^[4]。不过, LOEC由于使用了系统某一平衡点处近似线性化的模型, 在系统遭受大干扰, 偏离所设计的平衡点较远时, 控制效果就会减弱。针对该缺点, 文[2]采用了由扰动数据求解非线性方程的方法来获得单机无穷大模型中的系统参数, 设计了一种在线实时最优励磁控制器, 其数值仿真结果表明, 在一定程度上可扩大LOEC的适用范围。与LOEC方法不同, 基于微分几何方法的非线性控制在设计过程中采用的是精确的电力系统非线性模型, 故能适应系统状态的大范围变化, 从而比各种基于近似线性化数学模型设计的励磁控制器能在更大程度上改善系统大干扰的稳定性^[5], 但是当系统参数发生较大变化时, 基于微分几何方法设计的励磁控制性能有所下降甚至恶化。

为确保基于微分几何方法设计的励磁控制器对系统扰动和系统参数不确定性具有较好的抑制能力, 本文引入强跟踪滤波器(STF)用于发电机励磁控制器设计, 据此设计了一种新的自适应励磁控制器(AEC)。该控制器根据发电机运行状态的变化由强跟踪滤波器实时估计系统的扰动信息, 可准确地获得单机无穷大模型中的系统参数, 从而调整控制器, 使之得以适应系统运行点变化以及系统遭受的干扰。与文[2]中方法不同的是: ①本方法不用精确考虑初值以及根的判别问题, 强跟踪滤波器对初值有很好的适应性; ②强跟踪滤波器既可用于动态跟踪, 同时又能保持良好的稳态跟踪能力, 无需仅在系统出现扰动时启动; ③强跟踪滤波器可以进行状态和参数的联合估计, 在获得无穷大系统参数的同时, 还可得到发电机某些不易测量的状态变量, 方

基金项目: 国家自然科学基金项目(50277021)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50277021).

便了控制器的设计。

2 强跟踪滤波器的基本原理

考虑一类如下形式的离散时间非线性系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}_d[k, \mathbf{u}(k), \mathbf{x}(k)] + \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{h}_d[k+1, \mathbf{x}(k+1)] + \mathbf{e}(k+1) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{x} \in R^n$, $\mathbf{u} \in R^p$, $\mathbf{y} \in R^m$; 非线性函数 $\mathbf{f}_d: R^p \times R^n \rightarrow R^n$ 和 $\mathbf{h}_d: R^n \rightarrow R^m$ 对 \mathbf{x} 有连续的偏导数; 过程噪声 $\mathbf{v}(k)$ 和测量噪声 $\mathbf{e}(k)$ 为零均值, 方差分别为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 的高斯白噪声。

对于上述系统, 有强跟踪滤波器^[13-14]算法为

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)\boldsymbol{\gamma}(k+1) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{L}(k+1)\mathbf{F}\mathbf{P}(k|k)\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}$;

$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T[\mathbf{H}\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1}$;

$\mathbf{F} = \partial \mathbf{f}_d[k, \mathbf{u}(k), \mathbf{x}(k)] / \partial \mathbf{x}|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}(k|k)}$;

$\mathbf{P}(k+1|k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{H}]\mathbf{P}(k+1|k)$;

$\mathbf{H} = \partial \mathbf{h}_d[k+1, \mathbf{x}(k+1)] / \partial \mathbf{x}|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)}$;

$\mathbf{L}(k+1) = \text{diag}\{L_1(k+1), L_2(k+1), \dots, L_n(k+1)\}$;

$L_i(k+1) = \begin{cases} \mathbf{a}_i \mathbf{h}(k+1), & \mathbf{a}_i \mathbf{h}(k+1) > 1 \\ 1, & \mathbf{a}_i \mathbf{h}(k+1) \leq 1 \end{cases}$;

$\mathbf{h}(k+1) = \text{tr}[\mathbf{N}(k+1)] / \sum_{i=1}^n \mathbf{a}_i \mathbf{M}_{ii}(k+1)$;

$\mathbf{N}(k+1) = \mathbf{V}_0(k+1) - \mathbf{b}\mathbf{R} - \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^T$;

$\mathbf{M}(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{P}(k|k)\mathbf{F}^T\mathbf{H}^T\mathbf{H} = (\mathbf{M}_{ij})$;

$\mathbf{V}_0(k+1) = E[\mathbf{g}(k+1)\mathbf{g}^T(k+1)] \approx$

$$\begin{cases} \mathbf{g}(1)\mathbf{g}^T(1), & k=0 \\ [r\mathbf{V}_0(k) + \mathbf{g}(k+1)\mathbf{g}^T(k+1)] / (1+r), & k \geq 1 \end{cases}$$

在上述各式中, $r=0.95$, 为遗忘因子; $\mathbf{b} \geq 1$, 为一预先选定的弱化因子, 选择一个较大的 \mathbf{b} 能使状态估计更为平滑; $\mathbf{a}_i \geq 1, i=1, 2, \dots, n$, 均为预先选定的系数。若从先验知识中可预知 x_i 变换很快, 则可选择选择一个较大的 \mathbf{a}_i 进一步提高 STF 的跟踪能力。若无任何先验知识, 可选择 $\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_2 = \dots = \mathbf{a}_n = 1$ 。

STF 计算量与扩展卡尔曼滤波器相当, 但具有扩展卡尔曼滤波器所不具有的以下优点:

(1) 对于模型的初始状态和系统测量噪声的统计性质不敏感。

(2) 在滤波器达稳态时, 对过程的突变状态仍具有很强的跟踪能力。

鉴于 STF 具有以上诸多优点, 本文将之用于自适应励磁控制器设计。

3 自适应励磁控制器设计

3.1 STF 设计

对于远距离输电系统中远离负荷中心的同步发电机来讲, 可以将其外部等值为一个无穷大系统, 以这样一个单机无穷大模型为基础设计出的励磁控制器是可以得到令人满意的控制效果的^[2]。考虑如图 1 所示的单机无穷大系统, 其数学模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{d}} = \mathbf{w} - \mathbf{w}_0 = f_1 \\ \dot{\mathbf{w}} = (\mathbf{w}_0 P_m / H) - (\mathbf{w}_0 P_e / H) - D(\mathbf{w} - \mathbf{w}_0) / H = f_2 \\ \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_d} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} V_s \cos \mathbf{d} + \frac{1}{T_{d0}} V_f = f_3 \end{cases} \quad (3)$$

电气约束方程为

$$\begin{cases} E_q = [E'_q x_{ds} - (x_d - x'_d) V_s \cos \mathbf{d}] / x'_{ds} \\ V_t = \sqrt{E_q^2 x_s^2 + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d E_q V_s \cos \mathbf{d}} / x_{ds} \\ P_e = E_q V_s \sin \mathbf{d} / x_{ds} \\ Q_e = (E_q - E_q V_s \cos \mathbf{d}) / x_{ds} - x_d (E_q^2 - 2E_q V_s \cos \mathbf{d} + V_s^2) / x_{ds}^2 \end{cases} \quad (4)$$

式(3)和(4)中, \mathbf{d} 为发电机功角; \mathbf{w} 为发电机转速, $\mathbf{w}_0 = 314.16 \text{ rad/s}$; E'_q 为 q 轴暂态电势; V_s 为无穷大母线电压; H 为机械转动惯量; D 为阻尼系数; P_m 为汽轮机机械功率; T_{d0} 为发电机定子开路时励磁绕组的时间常数; $x_s = x_T + x_l$, 为输电系统总电抗; x'_d 和 x'_{ds} 分别为发电机的 d 轴暂态电抗和计入了输电系统总电抗后的 d 轴暂态总电抗; x_d 和 x_{ds} 分别为发电机的 d 轴同步电抗和计入了输电系统总电抗后的 d 轴总同步电抗; $T'_d = T_{d0} x'_{ds} / x_{ds}$, 为定子闭路时励磁绕组时间常数; V_f 为励磁控制输入。

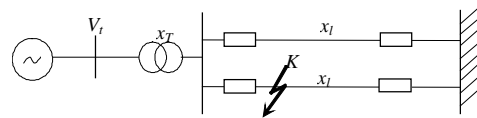


图 1 单机无穷大系统结构示意图

Fig. 1 Structure of single-machine infinite-bus system

当发电机以外系统的运行方式及结构发生变化时, 可以等值为系统电抗 x_l 和无穷大母线电压 V_s 的变化。如果控制器能够实时得知系统的这种变化, 便能自动地进行调整, 以适应系统结构以及运行方式的变化, 从而获得良好的控制效果。本文正是基

于这种思路,利用 STF 实时估计系统电抗和无穷大母线电压,继而设计相应的自适应控制器。

在设计 STF 时,本文选择的系统输出为

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T = [V_t, P_e, Q_e, \mathbf{w}]^T \quad (5)$$

将式(3)和式(5)进行 Euler 离散化写成形式如式(1)的系统 II, 则有

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}_d[k, \mathbf{u}(k), \mathbf{x}(k), \mathbf{q}(k)] + \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{h}_d[k+1, \mathbf{x}(k+1), \boldsymbol{\theta}(k+1)] + \mathbf{e}(k+1) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{x}(k+1) = [d(k+1), \mathbf{w}(k+1), E'_q(k+1)]^T$;

$$\mathbf{q} = [x_l, V_s]^T;$$

$$\mathbf{f}_d = \begin{bmatrix} d(k) + \Delta t(\mathbf{w}(k) - \mathbf{w}_0) \\ \mathbf{w}(k) + \Delta t \left[\frac{w_0}{H} P_m - \frac{w_0}{H} P_e(k) - \frac{D}{H} (\mathbf{w}(k) - \mathbf{w}_0) \right] \\ E'_q(k) + \Delta t \left[-\frac{1}{T_d'} E'_q(k) + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x_d'}{x_{ds}'} V_s \cos d(k) + \frac{1}{T_{d0}} V_f(k) \right] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{h}_d = [V_t(k+1), P_e(k+1), Q_e(k+1), \mathbf{w}(k+1)]^T$$

为同时估计系统 II 中时变参数 $\mathbf{q}(k)$ 和状态变量 $\mathbf{x}(k)$, 定义扩展状态变量 $\mathbf{x}_e = [\mathbf{x}^T, \boldsymbol{\theta}^T]^T$ 并附加状态方程 $\mathbf{q}(k+1) = \mathbf{q}(k)$, 则系统 II 可化为以下的系统 III 形式;

$$\begin{cases} \mathbf{x}_e(k+1) = \mathbf{f}_e[k, \mathbf{u}(k), \mathbf{x}_e(k)] + \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{h}_e[k+1, \mathbf{x}_e(k+1)] + \mathbf{e}(k+1) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中 } \mathbf{f}_e(\mathbf{x}_e(k)) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_d(k, \mathbf{u}(k), \mathbf{x}(k), \mathbf{q}(k)) \\ \mathbf{q}(k) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{h}_e(\mathbf{x}_e(k+1)) = \mathbf{h}_d(k+1, \mathbf{x}(k+1), \mathbf{q}(k+1))。$$

虽然系统 III 只是系统 II 常参数部分,但在不知道时变参数的变化规律时只能采用模型 III 作为 STF 的模型。即便如此,由于 STF 的强跟踪性能,仍能得到状态和参数的准确估计(见本文仿真)。

考虑到基于 PMU 可以很方便地测量功角,故本文在滤波器设计中略去功角状态变量的估计,而使用实测功角,减小了计算量。

3.2 自适应励磁控制规律设计

在获得了系统电抗 x_l 和无穷大母线电压 V_s 的实时估计值后,结合不同的基于精确数学模型的励磁控制器设计方法即可设计出相应的自适应励磁控制器(本文结合微分几何方法进行设计)。

文献[7]通过将输出函数选取为多变量组合的

形式较好地协调了励磁控制各状态量的动、静态性能。本文参照文献[7]将输出函数选为 $h = c_1(V_{tr} - V_t) + c_2(\mathbf{w}_r - \mathbf{w})$ 。文献[7]基于微分几何方法得到没有考虑系统参数变化的控制器(DGC),如下:

$$\mathbf{u} = \left[c_1 V_{tq} x_s / T_{d0} V_t x_{ds}' \right]^{-1} \left[-\mathbf{H}_x \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + k_1 (c_1 (V_{tr} - V_t) + c_2 (\mathbf{w}_r - \mathbf{w})) \right] \quad (8)$$

式中 $\mathbf{H}_x \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} [f_1, f_2, f_3]^T$; V_{tq} 为电压的 q 轴分量。

由于式(8)中含有 E'_q , 因此该控制律实现时需要测量转子电流。本文用 STF 估计得到的 $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\mathbf{w}}, \hat{E}'_q, \hat{x}_l, \hat{V}_s]^T$ 代替式(8)中相对应的量,就得到了自适应励磁控制器(AEC)如下:

$$\mathbf{u} = \left[\frac{c_1 V_{tq} \hat{x}_s}{T_{d0} V_t \hat{x}_{ds}'} \right]^{-1} \left[-\mathbf{H}_x \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t)) + k_1 (c_1 (V_{tr} - V_t) + c_2 (\mathbf{w}_r - \hat{\mathbf{w}})) \right] \quad (9)$$

此时由于式(9)中 E'_q 使用滤波器估计值,故无需测量转子电流。

4 仿真研究

4.1 STF 仿真

本文首先通过仿真验证了 STF 可有效地对状态和参数进行联合估计,并可迅速准确地跟踪系统的不同扰动。仿真系统参数取为^[15]: $x_d = 1.314$, $x_d' = 0.333$, $x_r = 0.1$, $x_l = 1.46$, $H = 7.764$, $D = 1.43$, $T_{d0} = 5.85\text{s}$, $0 \leq V_f \leq 3.0\text{pu}$ (考虑励磁系统的限幅作用),取工作点为 $P_{e0} = 0.456$, $d_0 = 50^\circ$, $V_{t0} = 0.006$ 。仿真滤波器的参数为: $\Delta t = 0.001$, $r = 0.95$, $\mathbf{b} = 1$, $\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_3 = \mathbf{a}_4 = 1$, $\mathbf{Q} = \text{diag}([0.1, 0.1, 0.1, 0.1])$, $\mathbf{R} = \text{diag}([0.005, 0.005, 0.005, 0.005])$ 。

(1) 仿真 STF 对初值的鲁棒性。其目的是校验 STF 是否要求设定比较准确的初值,表 1 给出 2 种不同初值的 STF 计算结果,此处以第一种初值情况下 \hat{V}_s 的计算收敛情况举例说明。如图 2 所示, V_s 在 10 个采样周期之后就收敛到准确值,其它参数的收敛速度与 V_s 相似。由此可看出,STF 在初值存在较大误差时能很快地以很高的精度收敛到稳态值。

表 1 不同初值下的 STF 计算结果

Tab. 1 The calculation results under different initial values

参数	初值 1	STF	初值 2	STF
$\hat{\mathbf{w}}$	0.9	1.00	1.1	1.00
\hat{E}'_q	0.8	0.98	1.1	0.98
\hat{x}_l	1	1.46	2	1.46
\hat{V}_s	0.8	1.00	1.2	1.00

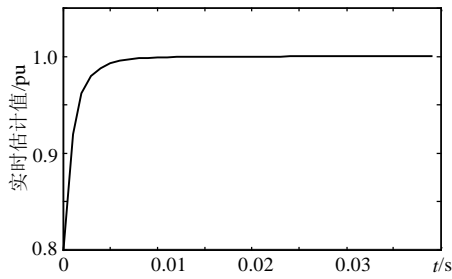


图2 \hat{V}_s 收敛过程

Fig. 2 The convergent process of \hat{V}_s

(2) 仿真 STF 对不同系统扰动的有效性。选取以下连续发生的系统结构及运行工况变化对 STF 进行验证:

1) 1s 时一回线路距离发电机机端 30% 处发生三相接地短路, 1.15s 切除一条线路, 单回路运行。

2) 3s 时无穷大母线电压上升 10%。图 3 和 4 给出了 STF 对 \hat{x}_1 和 \hat{V}_s 实时跟踪的过程。由图 3 和 4 可以看出, STF 对上述扰动均能快速准确地进行跟踪, 特别是在短路期间也具有十分理想的跟踪效果。从这个综合事例可以看出, STF 具有相当强的跟踪能力, 不仅对稳态能进行准确跟踪, 而且对过程的突变状态也能进行准确的跟踪。

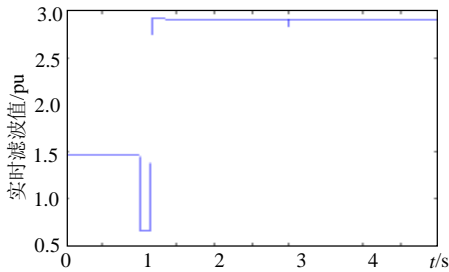


图3 STF 对 x_1 实时跟踪过程

Fig. 3 The real-time tracking process of x_1 with STF

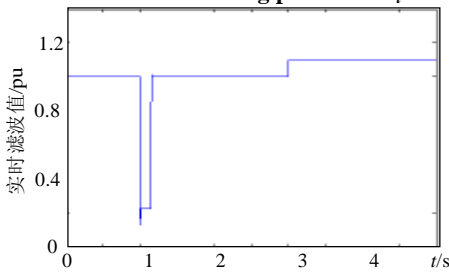


图4 STF 对 V_s 实时跟踪过程

Fig. 4 The real-time tracking process of V_s with STF

(3) 仿真 STF 抗噪性能。考虑到实测信号中不可避免地含有测量噪声, 本项仿真对 STF 的抗噪性能进行验证。仿真时在式(5)所表示的系统输出信号加入白噪声, 信噪比为 20db。选取同上一小节相同的系统结构及运行工况变化对 STF 进行验证。图 5 和 6 给出了 STF 对 \hat{x}_1 和 \hat{V}_s 实时跟踪的过程。由图 5 和 6 可以看出, 在含有较大的测量噪声情况下, STF 仍能对扰动进行快速准确的跟踪。

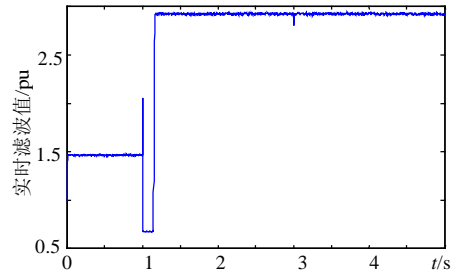


图5 噪声情况下 STF 对 x_1 实时跟踪过程

Fig. 5 The real-time tracking process of x_1 with STF under noise

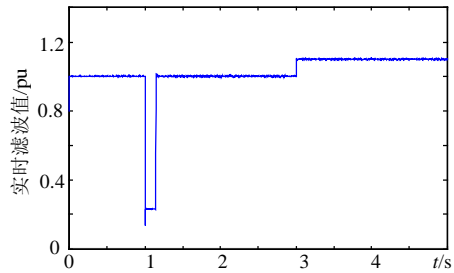
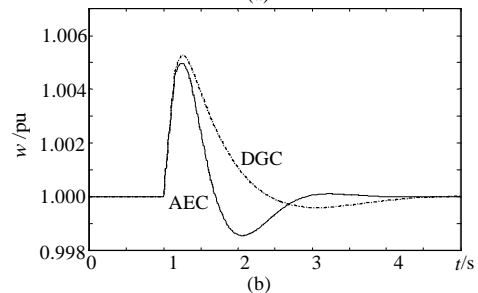
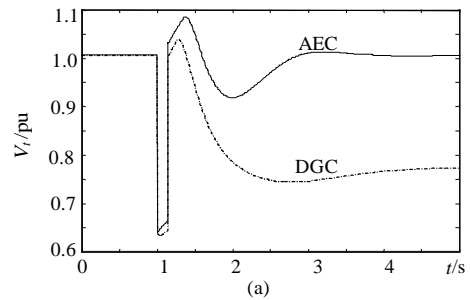


图6 噪声情况下 STF 对 V_s 实时跟踪过程

Fig. 6 The real-time tracking process of V_s with STF under noise

4.2 AEC 仿真

在验证了 STF 的有效性之后, 本文对 AEC 进行仿真研究并与 DGC 比较。仿真研究了输电线路发生永久三相故障扰动 ($t=1s$ 时, 一回输电线路距离发电机端 30% 处发生永久性三相短路, 短路维持 0.15s 后, 保护动作并切除故障线路) 时闭环系统的动态响应。仿真时考虑了噪声的影响。在故障扰动下, 闭环系统主要状态量的动态响应曲线可见图 7 所示。由图 7 可以看出, 当短路切除以后系统结构发生变化时, DGC 已不能维持电压在原来的给定值, 这是由于 DGC 不能实时考虑系统线路电抗和



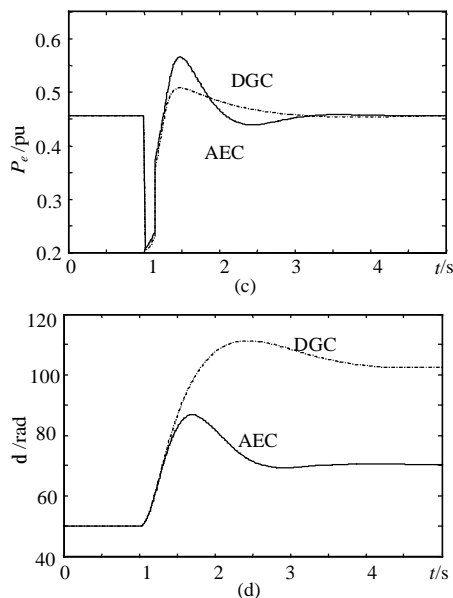


图 7 发电机三相短路扰动时系统响应曲线

Fig.7 Responses of the systems under a three phase fault

无穷大母线电压所造成的。而 AEC 则由于具有参数自适应环节, 在线路发生变化时较 DGC 具有良好的动、静态性能: AEC 功角摆动时间和幅度均小于 DGC; 在短路切除、线路结构发生变化后发电机恢复至原来的运行点。

5 结论

本文针对单机无穷大系统模型中系统电抗 x_l 和无穷大母线电压 V_s 具有时变性和不确定性的特点, 引入强跟踪滤波器对其和系统状态变量进行联合估计, 并将估计得到的结果用于励磁机实时控制器设计, 得到了一种基于强跟踪滤波器的自适应励磁控制器。数值仿真结果表明: 强跟踪滤波器能根据发电机运行状态的变化实时估计系统的扰动信息, 并准确地获得单机无穷大模型中的系统参数; 基于强跟踪滤波器的自适应励磁控制器能有效地适应系统运行点的变化以及系统遭受的干扰, 在系统遭受不同的干扰下均表现出良好的动、静态性能, 控制效果要优于无自适应环节的基于微分几何的控制器。

参考文献

- [1] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [2] 范澍, 毛承雄, 陆继明. 基于在线辨识的实时最优励磁控制器[J]. 电力系统自动化, 2001, 7: 16-20.
Fan Shu, Mao Chengxiong, Lu Jiming. Optimal excitation controller based on online system identification[J]. Automation of electrical power systems, 2001, 7: 16-20.
- [3] 常鲜戎, 万军, 潘云江, 等. 积分型线性最优励磁控制原理及动模实验[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 429-433.
Chang Xianrong, Wan Jun, Pan Yunjiang *et al.* The Integral linear optimal excitation control theory and simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 429-433.

- [4] 李勇, 吕晓东, 黄要桂, 等. 葛洲坝二江电厂线性最优励磁控制建模及参数优化[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 56-59.
Li Yong, Lu Dongxiao, Huang Yaogui *et al.* Modeling and parameters optimization of linear optimal excitation controller for GEZHOUBA ERJIANG hydropower plant[J]. Power system technology, 2002, 26(7): 56-59.
- [5] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [6] 孙元章, 黎雄, 戴和平, 等. 同时改善稳定性和电压精度的非线性励磁控制器[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 332-336.
Sun Yuanzhang, Li Xiong, Dai Heping *et al.* A nonlinear excitation controller to improve both power system stability and voltage regulation accuracy[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 332-336.
- [7] 李啸骢, 程时节, 韦化, 等. 一种高性能的非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 37-42.
Li Xiaocong, Cheng Shijie, Wei Hua *et al.* A high performance nonlinear excitation control for generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 37-42.
- [8] 杨冠鲁. 简化测量通道的优化励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 65-68.
Yang Guanlu. Optimal excitation control simplified measurement channels[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 65-68.
- [9] 谢小荣, 夏祖华, 崔文进, 等. 考虑信息结构约束的协调型非线性优化励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 1-5.
Xie Xiaorong, Xia Zuhua, Cui Wenjin *et al.* Coordinated nonlinear optimal excitation control with information structure constraint [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 1-5.
- [10] 周雪松, 马幼捷, 何彦民. 复杂系统非线性励磁控制的数字仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 32-35.
Zhou Xuesong, Ma Youjie, He Yanmin. A digital simulation for nonlinear excitation control in a multi-machine system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 32-35.
- [11] 常乃超, 郭志忠. 基于广域量测的全局非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 43-48.
Chang Naichao, Guo Zhizhong. Global nonlinear excitation control based on wide-area measurements [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 43-48.
- [12] 郝晋, 王杰, 陈陈, 石立宝. 基于Hamilton系统理论的结构保持多机电力系统非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 6-12.
Hao Jin, Wang Jie, Chen chen, Shi Libao. Nonlinear excitation control of multi-machine power system with structure preserving models based on Hamiltonian system theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 6-12.
- [13] Zhou D H, Frank P M. Strong tracking filter of nonlinear time-varying stochastic systems with colored noise: application to parameter estimation and empirical robustness analysis[J]. Int. J. Control, 1996, 65(2): 295-307.
- [14] 周东华, 王庆林. 有色噪声干扰的非线性系统强跟踪滤波器[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(3): 321-326.
Zhou Donghua, Wang Qinglin. Strong tracking filter of nonlinear systems with colored noise[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1997, 17(3): 321-326.
- [15] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.

收稿日期: 2005-06-09.

作者简介:

张风营 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事发电机参数辨识和电力系统非线性控制的研究;

朱守真 (1950-), 女, 教授, 主要从事电路系统建模、参数辨识、大型发电机组安全监控、电压稳定、电能质量监测和评估的研究。