

DOI: 10.7667/PSPC161076

CMAC 与卡尔曼滤波复合控制 AVR 的优化研究

刘友宽¹, 孙金龙^{1,2}, 朱涛³, 苏杰², 杨建波^{1,2}

(1. 云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院, 云南 昆明 650000;
2. 华北电力大学, 河北 保定 071000; 3. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011)

摘要: 电力系统的动态稳定已成为现代电力系统工程中一个关键性问题。同步发电机自动电压调节器(Automatic Voltage Regular, AVR)对于电力系统的稳定发挥着重要作用。为使 AVR 系统适应更加复杂的工作环境, 增强 AVR 抵抗外界随机干扰和快速跟随输入信号的能力, 提出了小脑模型神经网络、积分分离式 (Proportional Integral Differential, PID)控制器和卡尔曼滤波器复合控制的策略。通过对云南某水电站的一台发电机 AVR 模型的仿真研究可知: 该控制策略对于方波输入信号有很强的跟随能力, 系统响应速度快, 调节时间短, 并且对控制通道和测量通道的干扰有很强的抑制作用。仿真结果充分验证了该控制策略的可行性, 有助于电力系统的稳定。

关键词: AVR; 积分分离式 PID; CMAC; 卡尔曼滤波; 白噪声

CMAC and Kalman filter composite control AVR optimization

LIU Youkuan¹, SUN Jinlong^{1,2}, ZHU Tao³, SU Jie², YANG Jianbo^{1,2}

(1. Yunnan Electric Power Research Institute (Group) Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Kunming 650000, China; 2. North China Electric Power University, Baoding 071000, China;
3. Yunnan Power Control Centers, Kunming 650011, China)

Abstract: Dynamic stability of the power system has become a key issue of modern power system engineering. Synchronous generator automatic voltage regulator (AVR) for the stability of the power system plays an important role. To make AVR system to adapt to a more complex work environment, and enhance AVR ability to resist to outside interference and to follow the input signal fast, a composite control strategy including CMAC, strategy points separate PID controller and Kalman filter is proposed. Through the simulation of a generator AVR model in a Hydropower Station in Yunnan Province, it is found that: the control strategy for a square wave input signal has a strong ability to follow the system response speed, adjusting time is short, and the control channel and the measurement channel interference has a strong inhibitory effect, which fully verify the feasibility of the control strategy and contribute to the stability of the power system.

Key words: AVR; integral separate PID; CMAC; Kalman filter; white noise

0 引言

目前电网的规模不断扩大, 发电机组单机电压和容量等级不断提高, 电力系统已步入大电网、大机组和高电压时代, 对电力系统的稳定性和品质要求越来越高^[1-2]。自动电压调节器(Automatic Voltage Regulator, AVR)主要用于调节发电机输出端定子的端电压^[3], 平衡电厂和电网之间的无功功率, 其控制效果直接影响到电网的输电能力和稳定运行^[3-4]。

由于比例-积分-微分(Proportional Integral Differential, PID)控制器结构简单、鲁棒性好、适用范围广等优点, 在工业控制中得到广泛的应用^[2]。

针对电网波动等对 AVR 测量和控制通道的干扰, 以及控制器对控制过程的快速性、准确性和稳定性的影响等问题, 文献[4]提出差分进化机理优化 PID 控制的策略, 虽然对不同目标函数下的仿真效果作了对比, 但是没有考虑到 AVR 在复杂环境下的跟随性和抗干扰能力; 文献[5]提出用改进人工蜂群算法优化 AVR 系统, 主要对 PID 控制器的优化效果对比, 缺少实际 AVR 模型, 而且更精确的搜索使得抗干扰能力弱些; 文献[6-7]提出微粒群和粒子群优化自动电压 PID 调节器, 虽然从仿真步长和仿真梯度上优化, 但是对于变化的工作环境该方法的适应性不强; 文献[8]提出混沌多目标分数阶寻优 PID 控制的方

法, 虽然比常规 PID 控制的控制效果有较大改进, 但是存在模型简单、适应范围窄的问题。

针对上述优化算法存在的弊端, 考虑到 AVR 控制器和实际工程的特点, 以及受复杂环境的影响, 本文提出了积分分离式 PID 和小脑模型神经网络 (Cerebellar Model Articulation Controller, CMAC) 相结合的控制策略, 以应对出现控制信号大阶跃、连续变化输入的情况, 同时增加卡尔曼滤波器, 用来提高 AVR 控制器抵抗外界干扰的能力。通过采用阶跃输入信号、方波输入信号、控制通道和测量通道加入白噪声的方式来仿真复杂工作环境下的控制效果, 结果表明了 CMAC、积分分离 PID 和卡尔曼滤波的复合控制策略大大改善了控制效果。

1 AVR 系统模型

根据文献[4-5]介绍的 AVR 控制理论, 参考文献[9-10]提出的 AVR 试验建模方法, 结合云南某水电厂某台同步发电机 AVR 的特点, 通过现场试验数据和厂家提供的参数, 其发电机参数如表 1 所示, 去除限幅环节, 经标么化处理, 建立如图 1 所示的同步发电机 AVR 模型。该模型包括超前滞后环节、综合放大环节、发电机环节和测量变送环节组成。

表 1 发电机参数

Table 1 Generator parameters

名称	参数
额定容量/MW	250
额定功率/MW	225
额定电压/kV	15.75
额定功率因数/cos ϕ	0.9
额定转速/(r/min)	115.4
额定频率/Hz	50
额定励磁电压/V	365
额定励磁电流/A	1590
直轴同步电抗/p.u.	1.017
交轴同步电抗/p.u.	0.668
直轴瞬变电抗/p.u.	0.3035
直轴超瞬变电抗/p.u.	0.2215
交轴瞬变电抗/p.u.	0.668
交轴超瞬变电抗/p.u.	0.2156
定子漏抗/p.u.	0.1576

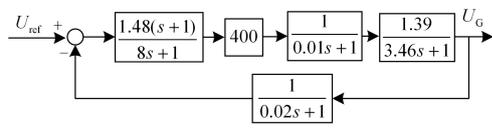


图 1 AVR 模型

Fig. 1 AVR model

根据图 1 提供的同步发电机 AVR 控制模型, 计

算出该 AVR 控制系统的开环传递函数如式(1)所示。

$$G(s) = \frac{822.88s + 822.88}{5.536 \times 10^{-3}s^4 + 0.8327s^3 + 28.02s^2 + 11.49s + 1} \quad (1)$$

采样时间设置为 0.001 s, 其开环传递函数经离散化处理后变为式(2)。

$$G(z) = \frac{2.387 \times 10^{-5}z^3 + 6.815 \times 10^{-5}z^2 - 6.975 \times 10^{-5}z - 2.213 \times 10^{-5}}{z^4 - 3.856z^3 + 5.572z^2 - 3.576z + 0.8604} \quad (2)$$

根据式(1), 绘制出如图 2 所示的该同步发电机未加入 PID 控制的 AVR 系统的 Bode 图。考虑到目前许多电厂的 AVR 控制系统都加入 PID 控制, 因此采用式(3)的 PID 控制规律。

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (3)$$

考虑到现场工况, 整定出 PID 参数: $k_p = 2.8$, $k_i = 0.02$, $k_d = 0.07$ 。由式(1)和式(3)绘制成如图 3 所示的该同步发电机加入 PID 控制的 AVR 系统的 Bode 图。根据图 2 未加入 PID 控制的 AVR 控制系统的 Bode 图, 参照文献[11]提出的控制系统判稳方法, 可判定该系统是稳定的, 相位裕量为 25.6 rad/s,

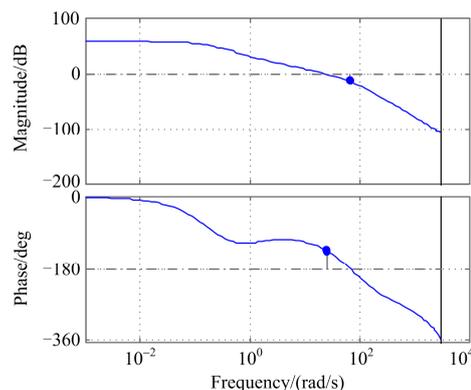


图 2 未加入 PID 控制的 AVR 系统的 Bode 图

Fig. 2 Bode plots are not added to the AVR PID control system

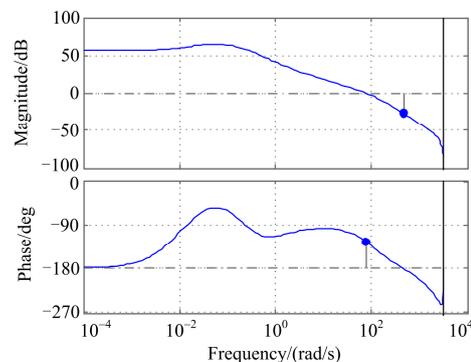


图 3 加入 PID 控制的 AVR 系统的 Bode 图

Fig. 3 Bode diagram of AVR added PID control system

幅值裕量为 13.3 dB。根据图 3 加入 PID 控制的 AVR 控制系统的 Bode 图, 可判定该系统是稳定的, 相位裕量为 77.7 rad/s, 幅值裕量为 26.6 dB。通过相位裕量和幅值裕量的对比, 加入 PID 控制能够大幅增加系统的稳定裕量, 提高系统的稳定性。

2 复杂工况下的 AVR 优化算法

2.1 积分分离式 PID

PID 控制的积分环节主要是消除静差, 但在 AVR 的启、停或大幅度增减设定值的过程中, 会造成短时间内系统大偏差, 超出执行机构的最大允许量, 引起系统超调过大, 甚至引起系统的振荡^[12]。

积分分离式 PID 算法如式(4)、式(5)所示。

$$u(k) = k_p e(k) + \beta k_i \sum_{j=0}^k e(j) T_s + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (4)$$

$$\beta = \begin{cases} 1, & |e(k)| \leq \varepsilon \\ 0, & |e(k)| > \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中: ε 为设定阈值; T_s 为采样时间; β 为积分项的开关系数。

2.2 CMAC 与积分分离式 PID

小脑模型神经网络(CMAC)算法是一种表达复杂非线性函数的表格查询型自适应神经网络, 该网络可通过学习算法改变表格的内容, 具有信息分类存储的能力^[13-16]。

结合同步发电机的控制特点, 参考如图 1 所示的同步发电机 AVR 控制模型, 结合 CMAC 算法与积分分离式 PID 控制器的特点, 采用如图 4 所示的 CMAC 算法与积分分离式 PID 控制器复合控制, 该控制系统通过 CMAC 和积分分离式 PID 的复合控制实现前馈反馈控制, 提高系统稳定性。

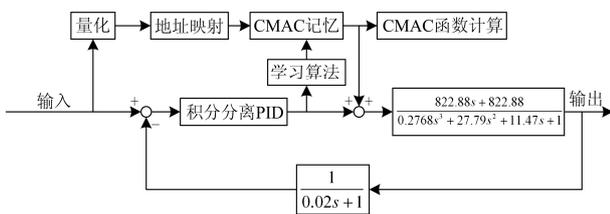


图 4 CMAC 与 PID 复合控制结构图

Fig. 4 CMAC and PID control chart

根据图 4 所示的控制结构图, 结合 CMAC 算法原理, 则有^[16]

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^c w_i a_i \quad (6)$$

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k) \quad (7)$$

式中: a_i 为二进制选择向量; $w_i(k)$ 为第 k 次迭代后

第 i 个储存单元的权值; c 为 CMAC 网络的泛化参数; $u_n(k)$ 为 CMAC 产生相应的输出; $u_p(k)$ 为 PID 控制器产生的输出; $u(k)$ 为控制器总输出。

CMAC 算法的概念映射是指从输入空间 S 到概念存储器 AC 的映射, 其数学表达式如式(8)~式(10)所示^[17]。

输入空间 S 在区间 $[S_{\min}, S_{\max}]$ 上分成 $N + 2c$ 个量化间隔, 即

$$v_1 \cdots v_c = S_{\min} \quad (8)$$

$$v_j = v_{j-1} + \Delta v_j \quad (j = c + 1, \dots, c + N) \quad (9)$$

$$v_{N+c+1} \cdots v_{N+2c} = S_{\max} \quad (10)$$

CMAC 算法的实际映射是指由概念存储器 AC 中的 c 个单元, 采用编码技术映射到实际存储器 AP 的 c 个单元中存放的相应权值, 其数学表达式如式(11)所示^[17]。

$$a_j = \begin{cases} 1 & \text{若 } S_j \in [v_j, v_{j+c}], j = c + 1, \dots, c + N \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

CMAC 算法的调整指标如式(12)~式(14)所示。

$$E(k) = \frac{1}{2} (u_n(k) - u(k))^2 \cdot \frac{a_i}{c} \quad (12)$$

$$\Delta w(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w} = \eta \frac{u(k) - u_n(k)}{c} \cdot a_i \quad (13)$$

$$w(k) = w(k-1) + \Delta w(k) + \alpha (w(k-1) - w(k-2)) \quad (14)$$

式中: η 为网络学习速率, $\eta \in (0, 1)$; α 为惯性量, $\alpha \in (0, 1)$ 。

2.3 白噪声序列

为模拟干扰对 AVR 系统的影响, 采用白噪声序列作为干扰, 该随机序列 $\{\xi(k)\}$ 均值为 0, 并且两两不相关, 其自相关函数如式(15)所示^[18-19]。

$$R_\xi(k) = \sigma^2 \delta(k), \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (15)$$

式中, $\delta(k)$ 为 Kronecker 函数, 可以用式(16)表示。

$$\delta(k) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases} \quad (16)$$

2.4 卡尔曼滤波器

针对随机信号, 维纳滤波需要对随机信号进行类别区分(有用、无用、干扰), 而卡尔曼滤波是估计出所有被处理的信号; 最小二乘法是滤除系统白噪声和测量噪声等信号, 而卡尔曼滤波是估计过程中需要利用的信息。卡尔曼滤波算法采用递推方式, 只需考虑过程噪声和测量噪声以及当前时刻系统状态的统计特性, 计算量小, 占用空间少, 效率高^[20-21]。

对于带有控制作用的离散型卡尔曼滤波, 其系统状态方程如式(17)所示。

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}(u(k) + \mathbf{w}(k)) \quad (17)$$

式中: $\mathbf{x}(k)$ 为 k 时刻的状态向量; $\mathbf{x}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻的状态向量; \mathbf{A} 为系统矩阵; \mathbf{B} 为输入矩阵; $\mathbf{u}(k)$ 为控制向量; $\mathbf{w}(k)$ 为过程噪声信号。

系统的测量方程如式(18)所示。

$$\mathbf{y}_v(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (18)$$

式中: $\mathbf{y}_v(k)$ 为输出向量; \mathbf{C} 为输出矩阵; $\mathbf{v}(k)$ 为测量噪声信号。

离散卡尔曼滤波器递推算法如式(19)一式(24)所示^[20-21]。

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (19)$$

$$\mathbf{P}(k) = \mathbf{A}\mathbf{P}(k-1)\mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{Q}\mathbf{B}^T \quad (20)$$

$$\mathbf{M}_n(k) = \frac{\mathbf{P}(k)\mathbf{C}^T}{\mathbf{C}\mathbf{P}(k)\mathbf{C}^T + \mathbf{R}} \quad (21)$$

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{M}_n(k)[\mathbf{y}_v(k) - \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{x}(k-1)] \quad (22)$$

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{E}_n - \mathbf{M}_n(k)\mathbf{C}]\mathbf{P}(k) \quad (23)$$

$$\mathbf{y}_e(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \quad (24)$$

式中: \mathbf{E}_n 为单位向量; \mathbf{Q} 为过程噪声的协方差; \mathbf{R} 为测量噪声的协方差 $\mathbf{M}_n(k)$ 为 k 时刻卡尔曼滤波器增益。

估计误差的协方差如式(24)所示。

$$e\text{cov}(k) = \mathbf{C}\mathbf{P}(k)\mathbf{C}^T \quad (25)$$

2.5 噪信比

噪信比是衡量噪声水平的一个重要指标,也是显示系统抗干扰能力的重要标志。根据文献[23]可知,噪信比是指系统输入为零时,噪声作用下的系统输出的均方根和噪声输入为零时,输入作用下的系统输出的均方根之比。

3 仿真分析

根据如图 4 所示的 CMAC 算法与 PID 控制器复合控制原理,结合控制特点,选取 CMAC 算法的参数为 $N=150$, $c=8$, $\eta=0.0004$, $\alpha=0.02$ 。PID 控制器的参数为 $k_p=2.8$, $k_i=0.02$, $k_d=0.07$ 。仿真的采样时间为 0.001 s 。

为检验控制系统对于大阶跃设定值输入信号的控制效果,设定单位阶跃信号为输入信号时,控制器分别为无常规 PID 控制器、只有常规 PID 控制器、积分分离式 PID 控制器、积分分离式 PID 和 CMAC 复合控制的响应曲线如图 5 所示,其调节性能指标统计如表 2 所示。结合图 5 和表 2 可以看出,无 PID 控制器的系统超调和调节时间都很大,积分分离式 PID 能有效抑制超调,积分分离式 PID 和 CMAC 复合控制在抑制超调、减少调节时间上有明

显的优势。

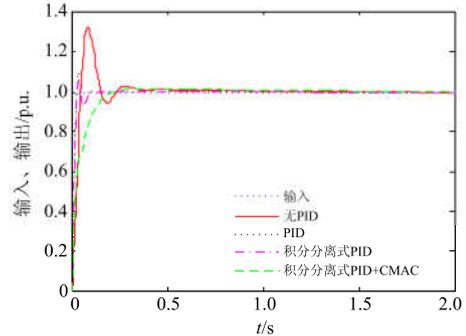


图 5 无干扰下的单位阶跃响应曲线

Fig. 5 Non-interference in the unit step response curve

表 2 调节性能指标统计

Table 2 Adjusted performance statistics

算法	上升时间/s	超调量/%	调节时间/s	静态偏差/p.u.
无 PID 控制	0.045	31.621	1.962	0.002
PID 控制	0.027	9.481	1.75	0.0008
积分分离式 PID 控制	0.025	5.312	1.66	0.0005
积分分离式 PID 与 CMAC 复合控制	0.0325	1.168	1.254	0.0001

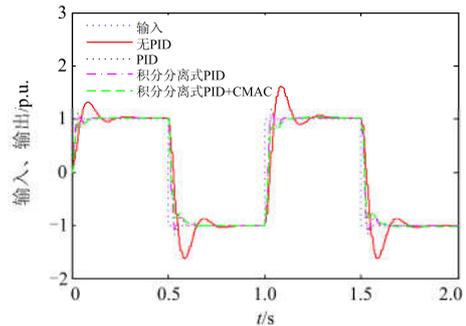


图 6 无干扰下的单位方波响应

Fig. 6 Square wave response units of non-interference

为检验控制系统对于连续大阶跃输入信号的跟随控制效果,设定当单位方波信号为输入信号时,控制器分别为无常规 PID 控制器、只有常规 PID 控制器、积分分离式 PID 控制器、积分分离式 PID 和 CMAC 复合控制等的响应曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,无 PID 控制器、常规 PID 控制器、积分分离式 PID 控制器的系统随着方波加入次数的增加,超调量和调节时间会越来越大,但是积分分离式 PID 和 CMAC 复合控制能有效抑制超调,减小调节时间。

由于现场 AVR 工作环境相对复杂,电网和电厂对于 AVR 的影响主要作用于 AVR 系统的控制通道和测量通道,因此采用在控制通道和测量通道加入

白噪声的方式产生随机干扰，用于检验控制系统在阶跃信号和干扰信号共同作用下的抗干扰能力。当无常规 PID 控制器、只有常规 PID 控制器、积分分离式 PID 控制器、积分分离式 PID 和 CMAC 复合控制中均未加入卡尔曼滤波器的响应曲线如图 7 所示，从图中可以看出，它们的抗干扰能力比较差，系统无法达到稳定。当加入卡尔曼滤波器以后，其响应曲线如图 8 所示，其调节性能指标统计如表 3 所示。结合图 8 和表 3 可以知道，卡尔曼滤波器能有效抑制干扰，与 PID 控制器结合能有效减小系统超调量，积分分离式 PID 和 CMAC 复合控制能使调节过程更加平滑，调节时间更短。

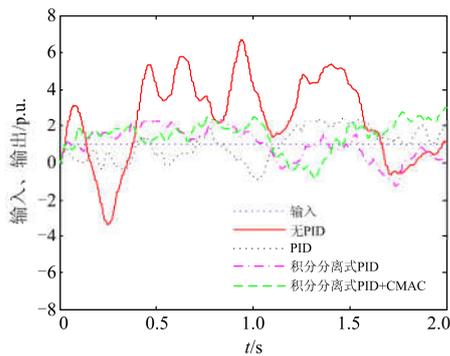


图 7 干扰作用下的无卡尔曼滤波器的响应

Fig. 7 No response Kalman filter under the action of interference

表 3 调节性能指标统计

Table 3 Adjusted performance statistics

算法	上升时间/s	超调量/%	调节时间/s	静态偏差/p.u.	噪信比 $\times 10^{-5}$
无 PID 控制	0.041	24.94	1.795	0.002	11.112
PID 控制	0.079	1.22	1.685	0.001	6.0866
积分分离式 PID 控制	0.071	1.17	1.613	0.0005	6.0801
积分分离式与 CMAC 复合控制	0.065	1.15	1.345	0.0002	5.8453

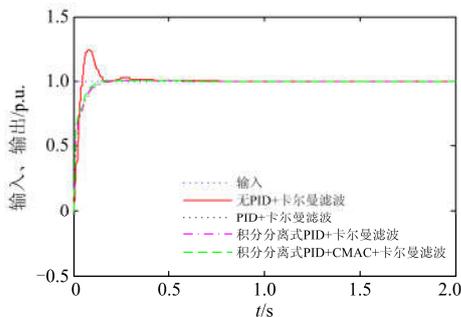


图 8 干扰作用下的卡尔曼滤波器的响应

Fig. 8 Response of interference Kalman filter

考虑到现场 AVR 系统可能面临更加严峻的工作环境，不仅在控制通道和测量通道加入白噪声用于模拟随机干扰影响，而且将输入信号改为方波信号，以检验 AVR 控制系统在干扰作用下对大阶跃、连续变化信号的跟随和控制效果。当无常规 PID 控制器、只有常规 PID 控制器、积分分离式 PID 控制器、积分分离式 PID 和 CMAC 复合控制中均未加入卡尔曼滤波器的响应曲线如图 9 所示，从图中可以看出，它们的抗干扰能力很差。当加入卡尔曼滤波器以后，其响应曲线如图 10 所示，卡尔曼滤波器有很强的抑制干扰能力，与 PID 控制器结合对于超调量的减少有明显优势，积分分离式 PID 和 CMAC 复合控制相对其他控制来说，调节更加平稳，调节时间相对更短。

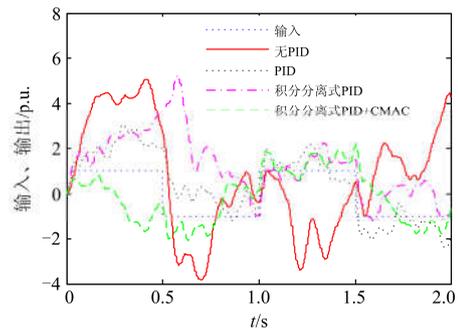


图 9 干扰作用下的无卡尔曼滤波器的响应

Fig. 9 No response Kalman filter under the action of interference

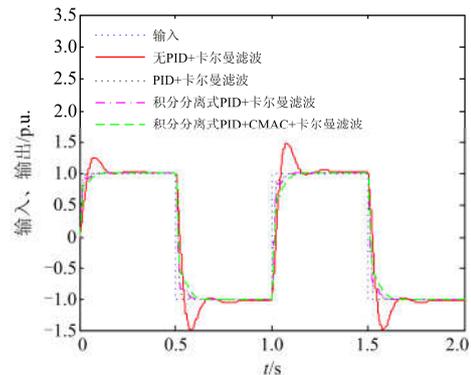


图 10 干扰作用下的卡尔曼滤波器的响应

Fig. 10 Response of interference Kalman filter

4 结论

针对复杂工作环境下，提高自动电压调节器动态性能指标，增强抗干扰和跟随能力的问题，本文提出了 CMAC 控制器、积分分离式 PID 控制器和卡尔曼滤波器复合控制的策略，通过建立云南某水电厂的一台发电机自动电压控制器模型，进行仿真研究。通过仿真发现，该控制策略对于方波输入信

号有很强的跟随能力, 而且系统响应速度快, 调节时间短。当仿真时对控制通道和测量通道加入白噪声后, 观察其响应曲线发现, 卡尔曼滤波器对于外界随机干扰的抵抗能力很强, 能够快速消除干扰, 与常规或积分分离 PID 的复合控制有利于系统稳定, 而积分分离式 PID、CMAC 控制器和卡尔曼滤波器的复合控制在多种复杂环境下的适应性更强, 调节效果更好。同步发电机 AVR 控制系统的仿真结果验证了该控制策略的可行性和对电网波动的快速响应。该复合控制策略对于电网电压的稳定发挥着重要作用。

参考文献

- [1] 林捷, 王云柳, 黄辉, 等. 自动电压控制下的地区电网电压无功运行状态评估指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 123-129.
LIN Jie, WANG Yunliu, HUANG Hui, et al. An index system for voltage and reactive power operation status evaluation in regional power grid under automatic voltage control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 123-129.
- [2] 王伟, 刘为群, 曾继伦. 用于 AVR 闭环测试的同步发电机组实时仿真研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 23-26.
WANG Wei, LIU Weiqun, ZENG Jilun. Real-time simulation of synchronous generator for automatic voltage regulator (AVR) closed-loop tests[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 23-26.
- [3] 崔远海. 同步发电机自调节 AVR 控制器的研究[J]. 中国电力, 2004, 37(10): 14-17.
CUI Yuanhai. Research of self-regulating AVR regulator for synchronous generator[J]. Electric Power, 2004, 37(10): 14-17.
- [4] 王荣杰, 詹宜巨, 周海峰, 等. 基于差分进化机理优化 PID 控制的 AVR 系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 108-114.
WANG Rongjie, ZHAN Yiju, ZHOU Haifeng, et al. PID controlled AVR system based on differential evolution mechanism optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 108-114.
- [5] ZHANG Dongli, TANG Yinggan, GUAN Xinping. Improved artificial bee colony algorithm design AVR system optimal fractional order PID controller[J]. Acta Automatica Sinica, 2014(5): 973-980.
- [6] 肖健梅, 李军军, 王锡淮. 基于微粒群优化的自动电压 PID 调节器[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2008, 48(10): 1863-1867.
XIAO Jianmei, LI Junjun, WANG Xihuai. Automatic voltage PID regulators based on particle swarm optimization[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(10): 1863-1867.
- [7] ZAMANI M, KARIMI-GHARTEMANI M, SADATI N, et al. Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(12): 1380-1387
- [8] PAN I, DAS S. Chaotic multi-objective optimization based design of fractional order PID controller in AVR system[C] // International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43(1): 393-407.
- [9] 竺士章, 陈皓, 赵红光, 等. 嘉兴发电厂 300MW 发电机励磁调节器参数测定和电力系统稳定器试验结果[J]. 电网技术, 2001, 25(4): 51-53.
ZHU Shizhang, CHEN Hao, ZHAO Hongguang, et al. Parameter measurement of AVR and field test of pass of 300 MW unit at Jiaying power plant[J]. Power System Technology, 2001, 25(4): 51-53.
- [10] 李宗泽, 史成军. 基于二维云模型同步发电机 PID 励磁系统仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 19-24.
LI Zongze, SHI Chengjun. Simulation research on PID excitation system of synchronous generator based on two-dimensional cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 19-24.
- [11] 方斌, 李仁. 关于 Bode 图稳定判据与稳态误差级数的讨论[J]. 信息与控制, 1999, 28(4): 293-297.
FANG Bin, LI Ren. The argumentation about stability criterion in Bode and steady-error series[J]. Information and Control, 1999, 28(4): 293-297.
- [12] 郑光华, 丁轲轲. 积分分离 PID 控制算法研究[J]. 计算机仿真, 1990(3): 35-38.
ZHENG Guanghua, DING Keke. Integral separating PID control algorithm[J]. Computer Simulation, 1990(3): 35-38.
- [13] 杨辉, 王爽心, 李亚光. 汽轮机调速系统 CMAC 网络 PID 并行优化控制[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10): 2662-2665.
YANG Hui, WANG Shuangxin, LI Yaguang. CMAC and PID combined optimization and control of turbine regulating system[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(10): 2662-2665.
- [14] 李辉. 一种自适应 CMAC 在交流励磁水轮发电系统中仿真研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(7): 778-781, 785.
LI Hui. Simulation research of an adaptive CMAC for hydrogenerating system with AC excitation[J]. Control and Decision, 2005, 20(7): 778-781, 785.
- [15] 潘晔, 顾幸生, 卢胜利. 基于信度分配的并行集成 CMAC 及其在建模中的应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 23(10): 1863-1867.

- 2010, 27(2): 211-215.
 PAN Ye, GU Xingsheng, LU Shengli. Credit-assignment-based parallel ensemble CMAC and its applications in modeling[J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(2): 211-215.
- [16] 蒋志明, 林廷圻, 黄先祥. 一种基于 CMAC 的自学习控制器[J]. 自动化学报, 2000, 26 (4): 542-546.
 JIANG Zhiming, LIN Tingqi, HUANG Xianxiang. A new selflearning controller based on CMAC neural network[J]. Acta Automatic Sinica, 2000, 26(4): 542-546.
- [17] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [18] 蔡坤宝, 王成良, 陈曾汉. 产生标准高斯白噪声序列的方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 207-211.
 CAI Kunbao, WANG Chengliang, CHEN Zenghan. A method for generating standard Gaussian white noise sequences[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 207-211.
- [19] 李帅, 虞小燕, 龚世敏, 等. 数字量输入式合并单元的白噪声处理[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 128-133.
 LI Shuai, YU Xiaoyan, GONG Shimin, et al. White noise processing in merging unit of digital input[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 128-133.
- [20] 吕思颖, 黎丹, 要航, 等. 基于无迹 Kalman 滤波的基波分量提取[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 79-84.
 LÜ Siying, LI Dan, YAO Hang, et al. Fundamental component extraction based on unscented Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 79-84.
- [21] 赵欣, 王仕成, 廖守亿, 等. 基于抗差自适应容积卡尔曼滤波的超紧耦合跟踪方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(11): 2530-2540.
 ZHAO Xin, WANG Shicheng, LIAO Shouyi, et al. An ultra-tightly coupled tracking method based on robust adaptive cubature Kalman filter[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(11): 2530-2540.
- [22] 张旭辉, 林海军, 刘明珠, 等. 基于蚁群粒子群优化的卡尔曼滤波算法模型参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 44-50.
 ZHANG Xuhui, LIN Haijun, LIU Mingzhu, et al. Model parameters identification of UKF algorithm based on ACO-PSO[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 44-50.
- [23] 丁锋, 杨家本. 输入输出系统噪声比的计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(9): 108-111.
 DING Feng, YANG Jiaben. Computation formulas of the noise to signal ratio of input output systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1998, 38(9): 108-111.

收稿日期: 2016-07-14; 修回日期: 2016-10-07

作者简介:

刘友宽(1973—), 男, 教授级高级工程师, 长期从事水火电机组AGC、AVC等控制研究, 以及新能源控制和先进控制理论的研究;

孙金龙(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为火电厂自动电压控制系统的应用、建模、仿真和优化; E-mail: sunjinlong2010@163.com

朱涛(1978—), 男, 工学博士, 高级工程师, 云南电力调度控制中心, 从事电力系统运行、分析与控制研究。

(编辑 姜新丽)