

概率鲁棒随机算法在电力系统稳定控制的应用

陈明媛¹, 王 钧², 周智成¹, 谢代钰¹, 李啸骢³

(1. 广西电网公司电力调度控制中心, 广西 南宁 530012;

2. 华蓝设计(集团)有限公司, 广西 南宁 530011;

3. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 为了解决鲁棒控制问题, 提出了一种概率鲁棒随机控制设计方法。将概率鲁棒控制算法成功运用到电力系统控制中, 解决电力系统控制的鲁棒问题, 能很好地兼顾系统的动静态性能。该方法充分考虑了电力系统中存在的不确定参数及干扰, 使发电机组具有较好的鲁棒性能。控制方法的求解过程计算量较小, 其解不再是 NP-hard 的问题。最后, 在单机电力系统仿真中, 对基于概率鲁棒随机控制方法所得出的鲁棒控制律进行仿真分析与讨论, 验证其有效性及优越性。

关键词: 电力系统稳定控制; 鲁棒控制; 鲁棒性能准则; 概率鲁棒控制; 随机算法

Application of probabilistic robust randomized algorithm in power system stability control

CHEN Mingyuan¹, WANG Jun², ZHOU Zhicheng¹, XIE Daiyu¹, LI Xiaocong³

(1. Power Dispatching Control Center of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530012, China;

2. Guangxi Hualan Design (Group) Co., Ltd., Nanning 530011, China;

3. College of Electrical Engineering Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to solve the problem of robust control, a probabilistic robust stochastic control design method is proposed. The probabilistic robust control algorithm is successfully applied to power system control to solve the robust problem of power system control which the dynamic and static performance of the system can be taken into account. This method fully considers the uncertain parameters and interference in the power system, so that the generator set has better robust performance. The solution process of the control method is that the amount of calculation is small, and the solution is no longer an NP-hard problem. In the single-machine power system simulation, the robust control law derived from the probabilistic robust stochastic control method is simulated, analyzed and discussed to verify its effectiveness and superiority.

Key words: power system stability control; robust control; robust performance criteria; probabilistic robust control; probabilistic randomized algorithm

0 引言

系统的鲁棒控制设计问题长期以来都是系统控制领域中的热点问题。用于解决鲁棒控制问题的工具有著名的 H_∞ 理论、结构奇异值等^[1]。然而，迄今为止这些理论只能运用到具有某种特定的不确定结构的系统中，存在着计算繁杂、其解是NP-hard^[2]、鲁棒稳定裕度保守及不连续等问题。电力系统是典型的不确定性系统，包含了众多的不确定因素，因此有必要在考虑干扰情况下设计电力系统鲁棒非线性控制器。

本文引入一种概率鲁棒随机算法，该算法将经典的鲁棒控制问题转化为概率鲁棒控制问题，大大减少了计算量，增大了鲁棒稳定裕度，其解不再是NP-hard的问题^[3]。将概率鲁棒控制随机算法用于电力系统鲁棒控制中，设计电力系统稳定运行并满足一定性能指标的鲁棒控制器，使得电力系统不仅具有较好的动态性能，还具有良好的静态性能。

1 电力系统鲁棒稳定控制

1.1 线性系统的鲁棒性能准则

用一组状态空间模型描述不确定线性系统

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(\Delta)x + B_u u, x(0) = x_0 \\ z &= C_z x + D_{zu} u \end{aligned} \quad (1)$$

式中， z 为系统的输出向量； Δ 为系统的不确定集，属于系统容许的不确定因素集 $T(\Delta)$ 。

引入系统鲁棒性能指标^[4]

$$J(\Delta) = \int_0^\infty z^T z dt = \int_0^\infty (x^T (D_{zu}^T D_{zu}) x + u^T (C_z^T C_z) u) dt \quad (2)$$

式中， $D_{zu}^T D_{zu}$ 是可逆的且 $D_{zu}^T C_z = 0$ 。对于任意 $\gamma > 0$ ，控制目标是设计矩阵变量 $P > 0$ 及控制规律 $u = -Kx$ ，使得闭环系统是稳定的且满足如下鲁棒性能指标

$$J(\Delta) \leq \gamma^{-1} x_0^T P^{-1} x_0 \quad (3)$$

对于所有 $\Delta \in T(\Delta)$ 均成立。

若存在一个对称矩阵 $P > 0$ 以及状态反馈控制规律

$$u = -(D_{zu}^T D_{zu})^{-1} B_u^T P^{-1} x \quad (4)$$

使得如下的矩阵不等式对于所有 $\Delta \in T(\Delta)$ 都成立，即

$$\begin{bmatrix} A(\Delta)P + PA^T - 2B_u(D_{zu}^T D_{zu})^{-1}B_u^T + \gamma(B_u(D_{zu}^T D_{zu})^{-1}B_u^T(C_z P)^T) \\ C_z P \\ -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

那么闭环系统是渐近稳定的且满足鲁棒性能指标式(2)。

1.2 概率鲁棒随机算法

线性最优鲁棒控制中的控制目标是设计一个控制器，使得闭环系统在所有的不确定性集 $\Delta \in T(\Delta)$ 中均能满足性能指标式(5)，求解式(5)得到线性最优鲁棒控制规律。随着控制系统的阶数增加，求解式(5)存在计算量大、有时解是NP-hard、鲁棒稳定裕度保守及不连续等问题^[5]。为解决以上问题，在本文中，旨在设计一种控制器使得闭环系统在大多数不确定性中均能满足既定的性能指标，即在概率意义上具有鲁棒性的控制器^[6]。然而，将线性最优的鲁棒控制转化为概率鲁棒控制并不能使设计方法得到简化^[7]。对此引入用于概率鲁棒性设计的随机算法，通过提取不确定性集中的样本进行计算，以置信概率使得系统具备既定性能指标^[8]。

(1) 定义

$\Delta \in D$ 满足随机分布，概率密度函数为 $f_\Delta(\Delta)$ ，令 $\rho^* \in (0,1)$ 和 $\xi \in (0,1)$ 为指定的概率水平。给出性能函数 $L(\Delta, P_N): D \times \Lambda \rightarrow R$ 及性能水平 ξ ，鲁棒性能综合随机算法要以至少 $1 - \xi$ 的置信程度求解出一个控制向量 $P_N \in \Lambda$ ，使得

$$\text{Probability}\{L(\Delta, P_N) \leq \xi\} \geq \rho^* \quad (6)$$

式中， $L(\Delta, P)$ 为系统的性能函数； ξ 为系统的性能指标； P_N 的控制参数通过计算属于 Δ 中的 N 个有限样本得到。

为求出系统的控制规律^[8]有两种计算方法：顺序计算方法和场景计算方法。在本文中，使用计算较为简化的场景概率随机计算方法。

(2) 算法1 (概率鲁棒控制的情景随机算法)

令 ρ^* 、 $\xi \in (0,1)$ 为给定的概率水平。随机算法的步数 N 选择为

$$N = \left\lceil \frac{2}{1-\rho^*} \log \frac{1}{\xi} + 2n + \frac{2n}{1-\rho^*} \log \frac{2}{1-\rho^*} \right\rceil \quad (7)$$

式中, n 为系统的维数。

令算法的目标方程为 $-\text{trace}(\mathbf{P})$, 其中 $\mathbf{P}$ 为要设计的控制矩阵, 该算法的约束条件为

$$\text{Probability}\{\text{式}(5)\} \geq \rho^* \quad (8)$$

那么, 该算法会以至少 $1-\xi$ 的置信程度求解出控制矩阵 $\mathbf{P}^{[10]}$ 。

在本文中, 使用随机算法工具箱 (RACT) 求解算法1。RACT 是免费的 MATLAB 工具箱, 用来求解概率随机鲁棒控制器。

1.3 基于概率鲁棒随机算法的励磁控制方法

对于单机无穷大系统, 考虑励磁控制的系统模型为^[11]

$$\begin{aligned} \delta &= \omega - \omega_0 \\ \omega &= \frac{\omega_0}{T_j} P_m - \frac{\omega_0}{T_j} P_e - \frac{(D + w_1)}{T_j} (\omega - \omega_0) \\ E'_q &= -\left(\frac{x_{dc}}{x'_{dc}} + w_2\right) \frac{E'_q}{T'_{d0}} + \left(\frac{x_d - x'_d}{x'_{dc}} + w_3\right) \frac{U_s \cos \delta}{T'_{d0}} + \frac{E_{qc}}{T'_{d0}} \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} x_e &= x_T + \frac{x_L}{2} \quad x'_{dc} = x'_d + x_e \quad x_{qc} = x_q + x_e \\ x_{de} &= x_d + x_e \\ P_e &= \frac{E'_q}{x'_{dc}} U_s \sin \delta + \frac{(x'_d - x_q)}{2x'_{dc} x_{qc}} U_s^2 \sin 2\delta \\ U_{fq} &= \frac{x_e}{x'_{dc}} E'_q + \frac{x'_d}{x'_{dc}} U_s \cos \delta \quad U_{fd} = \frac{x_q}{x_{qc}} U_s \sin \delta \\ U_f &= \sqrt{U_{fq}^2 + U_{fd}^2} \end{aligned}$$

式中, δ , ω 和 E'_q 是系统状态变量, 分别表示发电机的功角、角速度及暂态电动势后电抗; w_1 、 w_2 和 w_3 是系统的不确定参数; P_m 是输入机械功率; P_e 表示发电机电磁功率; U_s 是无穷大母线上电压; E_{qc} 是系统的控制规律; T'_{d0} 表示发电机定子开路时的励磁绕组时间常数; T_j 表示发电机的转子惯性时间常数; D 为发电机阻尼系数; x_d 和 x_q 分别表示发电机直轴电抗和交轴电抗; x'_d 直轴暂态电抗; x_T 和 x_L 分别表示变压器和线路上的电抗; U_f 表示发电机机端电压; U_{fq} 和 U_{fd} 分别表示 U_f 在 q 轴、 d 轴上的分量^[12]。

控制目标是为了使得 U_f 、 P_e 和 ω 在系统存在不确定参数时是稳定的, 将式 (1) 在平衡点 $[\delta_0, \omega, E'_{q0}]$ 处进行线性化, 并且将系统状态变量 $[\delta_0, \omega, E'_q]$ 用易测量的系统状态变量 $[\Delta P_e, \Delta \omega, \Delta U_f]$ 来替换。新的系统状态方程为

$$\begin{pmatrix} \Delta P_e \\ \Delta \omega \\ \Delta U_f \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \Delta P_e \\ \Delta \omega \\ \Delta U_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{K_2}{T'_{d0}} \\ 0 \\ \frac{K_6}{T'_{d0}} \end{pmatrix} \Delta E_{qc} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\omega_0}{T_j} \\ 0 \end{pmatrix} \Delta P_m \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \frac{(K_5/K_4 - K_3 K_6) K_2}{T'_{d0} \beta} & K_1 & \frac{(K_2/K_3 - K_1 K_4) K_2}{T'_{d0} \beta} \\ -\frac{\omega_0}{T_j} & -\frac{D + w_1}{T_j} & 0 \\ \frac{(K_5/K_4 - K_3 K_6) K_6}{T'_{d0} \beta} & K_6 & \frac{(K_2/K_3 - K_1 K_4) K_6}{T'_{d0} \beta} \end{bmatrix} \\ K_1 &= \frac{E'_{q0}}{x'_{dc}} U_s \cos \delta_0 + \frac{(x'_d - x_q)}{x'_{dc} x_{qc}} U_s^2 \cos 2\delta_0 \\ K_2 &= \frac{U_s \sin \delta_0}{x'_{dc}} \quad K_3 = \left(\frac{x_d - x'_d}{x'_{dc}} + w_3\right) U_s \sin \delta_0 \\ K_4 &= \frac{x'_{dc}}{x_{dc}} + \frac{1}{w_2} \quad K_5 = -\frac{U_{fq0} x'_d U_s}{U_{f0} x'_{dc}} \sin \delta_0 + \frac{U_{fd0} x_q U_s}{U_{f0} x_{qc}} \cos \delta_0 \\ K_6 &= \frac{U_{fq0} x_e}{U_{f0} x'_{dc}} \quad \beta = K_1 K_6 - K_2 K_5 \end{aligned}$$

选取系统的鲁棒稳定性能准则如式 (2) 和式 (3) 所示, 其鲁棒控制参数可以通过概率随机场景算法计算出来, 励磁控制规律可由式 (4) 得到。

2 系统仿真与结果

上述基于随机概率场景算法的鲁棒励磁控制方法, 将在单机无穷大系统模型中进行仿真。系统的参数为 $x_d=2.12(\text{pu})$; $x_q=2.12(\text{pu})$; $x'_d=0.26(\text{pu})$; $x_e=0.24(\text{pu})$; $D=2(\text{pu})$; $T_j=4.06 \text{ s}$; $T'_{d0}=5.8 \text{ s}$ 。

系统的初始运行点为 $P_{m0}=P_{e0}=0.6(\text{pu})$; $\delta=50^\circ$; $U_{f0}=1.0293(\text{pu})$ 。

不确定参数 w_1 、 w_2 和 w_3 的取值范围区间分别

为 $[-4, 0]$ 、 $[-0.85, 0.85]$ 和 $[-0.87, 0.848]$ 。系统的不确定向量可表示为 $\Delta=[w_1 \ w_2 \ w_3]^T$ 。

在算法1中选取 $\xi=e^{-5}$ 及 $\rho^*=0.99$ ，使该算法以大于 $1-\xi=0.999\ 99$ 的概率和 $\rho^*=0.99$ 的置信度求解出控制矩阵 P_N 。参与计算的随机样本数为 $T_N=5\ 488$ ，然后令 $\gamma=1.5$ ， $D_{zu}=[0;0;0;1]$ ， $C_z=[50,0,0;0,50,0;0,0,50;0,0,0]$ 。

那么系统的励磁控制规律可求出

$$u=-64.3\Delta P_e+99.2\Delta\omega-977.12\Delta U_f \quad (11)$$

为说明所提出的系统的概率随机励磁鲁棒控制规律（LEPRC）的优越性，将其与线性最优励磁控制规律（LOEC）进行对比。LOEC控制规律的参数可以通过求解利卡提方程得出。

(1) 仿真1：外部干扰

为验证控制规律的鲁棒性，当 $t=1\text{ s}$ 时，将作用在系统的不确定参数 w_1 、 w_2 和 w_3 取不同的数值。从图1～图6可知，当发电机遭受外部干扰时，发电机机端电压和功角在LEPRC作用下产生的静态偏移比在LOEC作用下的静态偏移都要小，这是由于LEPRC对外部干扰有抑制作用。LEPRC使得发电机在遭受外部干扰时，与LOEC相比不仅能更快地平息机组在暂态过程中的机械振荡，并能更好地抑制系统的超调，从而使得发电机具有良好的动态性能及鲁棒性。

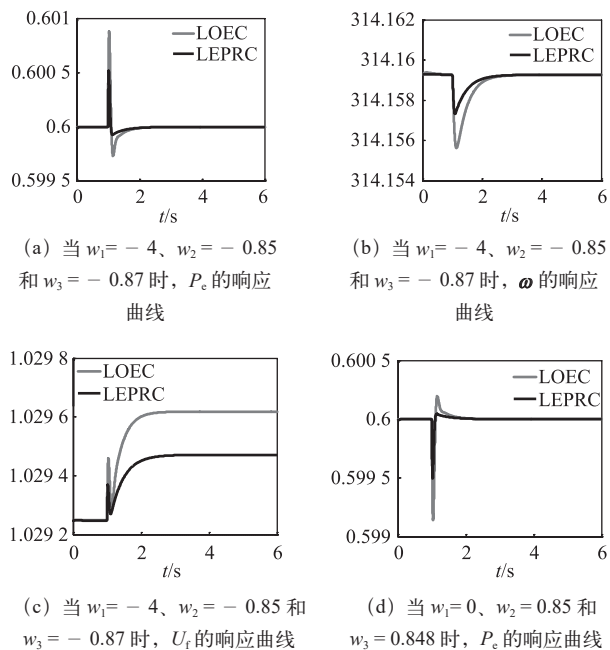
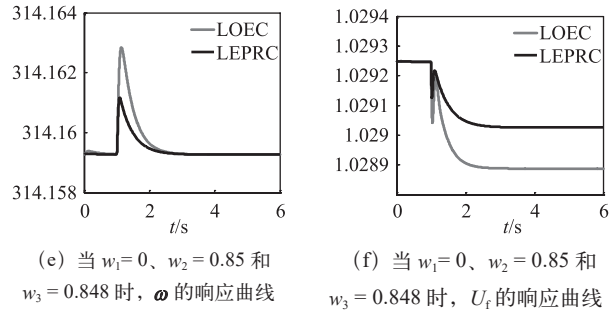


图1 仿真1的响应曲线

Fig. 1 Response curve of simulation 1

(2) 仿真2：输入机械功率 P_m 增加20%的扰动

图2表明，当机械功率 P_m 在 $t=1\text{ s}$ 时增加20%且存在不确定参数 $w_1=0$ 、 $w_2=0.85$ 和 $w_3=0.848$ 时，发电机机端电压在LEPRC作用下产生的静态偏移比在LOEC的作用下的静态偏移要小，LEPRC使得发电机在遭受输入机械功率扰动时，比LOEC能使发电机具有良好的动态性能及鲁棒性。

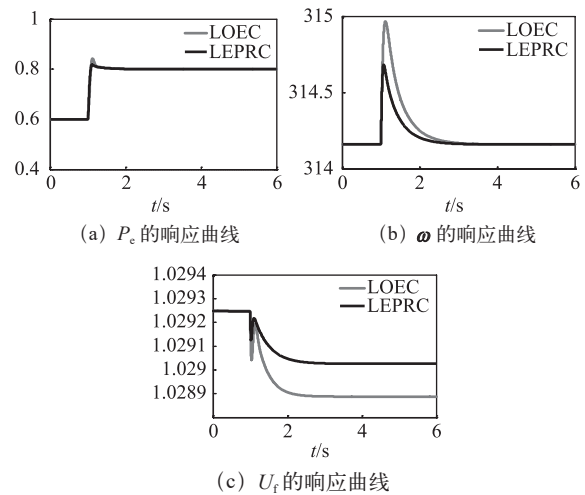


图2 仿真2的响应曲线

Fig. 2 Response curve of simulation 2

(3) 仿真3：三相短路扰动

在 $t=1\text{ s}$ 时，系统发生三相短路扰动，在 0.2 s 之后短路清除并且重合闸成功，并且系统存在不确定参数扰动。从图3可以看出，当系统发生大扰动时，尽管发电机的机端电压和有功功率在两种控制规律的作用下都得到恢复，但LEPRC比LOEC能更快地恢复机端电压到初始水平，更早地平息有功功率的摆动。LEPRC比LOEC能更好地平息系统频率振荡，更快地使系统返回初始运

行点,更有效地抑制了系统的超调,使得发电机具有良好的动静态性能。

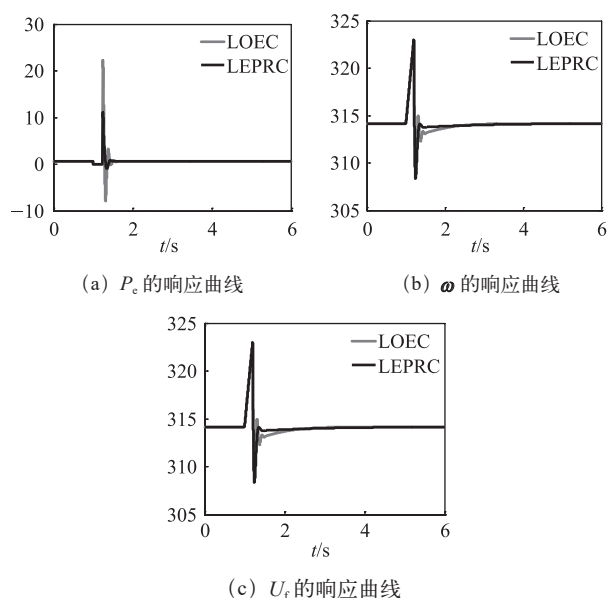


图3 仿真3的响应曲线

Fig. 3 Response curve of simulation 3

由以上的仿真实验可知,本课题提出的基于随机鲁棒控制算法的电力系统励磁鲁棒控制器使单机无穷大电力系统在有扰动及不确定参数的情况下是稳定的。仿真结果表明,该控制律能够有效提高系统在静态、暂态过程中的鲁棒性能。

3 结束语

针对一个单机无穷大电力系统,建立包含不确定干扰的鲁棒励磁控制模型,运用概率鲁棒随机算法,成功设计出发电机励磁鲁棒控制策略。仿真结果表明,该控制律能够有效提高电力系统的暂态稳定性和鲁棒稳定性。同时,概率鲁棒励磁控制规律相对于线性最优励磁控制规律能更有效地抑制扰动对系统输出的不利影响,增强了系统的鲁棒性。

参考文献

- [1] 王宏伟,谢丽蓉.基于奇异值分解的非均匀采样非线性系统的模糊模型辨识[J].控制与决策,2020,35(3):248-253.
- [2] VIDYASAGAR M, BLONDEL V D. Probabilistic

solutions to some NP-hard matrix problems [J]. Automatica, 2001, 37(9): 1397-1405.

- [3] CALAFIORE G C, CAMPI M C. The scenario approach to robust control design [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(5): 742-753.
- [4] 胡雪松,郑文俭,张苏英,等.基于线性二次型的永磁同步电机最优滑模控制[J].河北工业科技,2019,36(5):303-309.
- [5] 刘祥,孙秦.多回路气动伺服弹性系统稳定裕度的变结构 μ 分析方法[J].航空学报,2017(4).
- [6] 陈中,唐浩然,袁宇波,等.计及信号随机延时的电力系统小干扰概率稳定性分析[J].电力系统自动化,2018,635(13):151-157.
- [7] 王捷夫,施惠元,苏成利.具有执行器故障的随机鲁棒预测容错切换控制.信息与控制,2021,50(2):224-234.
- [8] CALAFIORE G C, DABBENE F, TEMPO R. Randomized algorithms for probabilistic robustness with real and complex structured uncertainty[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(12): 2218-2235.
- [9] 肖颖,宋永华,孙元章.基于混合随机算法的可用输电能力计算[J].电力系统自动化,2002,26(13):25-31.
- [10] KOLTCHINSKII V, ABDALLAH C T, ARIOLA M, et al. Improved sample complexity estimates for statistical learning control of uncertain systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(12): 2383-2388.
- [11] 王德意,谢博,孙新志.基于遗传算法的同步发电机模糊PID励磁控制器[J].电力自动化设备,2005,25(6):66-69.
- [12] 班红梅.基于遗传算法的同步发电机励磁控制器设计[J].电气开关,2021,59(3):68-71,76.

作者简介

陈明媛(1983—),女,工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定控制、鲁棒控制问题等。

(收稿日期:2021-09-12)