

基于拟广义哈密顿系统的随机电力系统可靠度最大化控制

林 雪, 孙黎霞, 鞠 平

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 随着电力系统中随机因素的增多, 研究随机因素作用下的电力系统控制十分必要。建立了励磁控制下简单随机电力系统的拟广义哈密顿系统方程, 基于拟广义哈密顿系统的随机平均法, 获得受控情况下基于能量函数的简单随机电力系统的平均伊藤方程, 根据 Bellman 随机动态规划原理, 以系统有界波动的可靠度最大为控制目标建立动态规划方程, 得到系统的最优控制律。引入条件可靠性函数衡量有界波动可靠度, 以解析的方法计算最优控制律下系统的可靠度, 并与蒙特卡洛解进行对比, 仿真结果验证了所提控制方法的有效性。

关键词: 电力系统; 拟广义哈密顿系统; 可靠度最大化; 有界波动; Bellman 随机动态规划原理

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.023

0 引言

电力系统是一个复杂的网络, 其中始终存在多种随机扰动^[1], 传统电力系统中, 这些随机扰动的影响较小, 不是影响系统安全稳定运行的主要因素。但近年来, 随着电动汽车的发展及风光等新能源的渗透率不断提高, 电网中的随机因素不断增多, 随机因素对电力系统的影响增大, 确定性模型及其分析方法已不再适应电网的发展。因此, 越来越多的学者开始研究随机因素对电力系统的影响, 文献[2]研究了负荷的随机性对电力系统稳定的影响; 文献[3-6]研究了新能源并网后, 电力系统随机潮流的计算; 文献[1, 7]研究了随机小扰动下电力系统的稳定性。

当前大部分的研究主要是针对随机因素对电力系统稳态的影响, 对于随机因素对电力系统动态特性的影响研究相对较少。电力系统是一个动态系统, 在随机因素作用下, 其动态安全性同样值得重视。现有的随机扰动强度虽然不至于使得系统失稳^[8], 但仍然会引起系统状态的波动。因此, 有必要考虑工程实际中的承受能力, 以有界波动域量度随机激励对电力系统的影响^[9], 研究随机因素作用下的电力系统动态特性并对其进行控制。

随机因素下电力系统的状态将转变为随机过程, 需要以系统状态在有界波动域内的概率进行计算分析。随机因素对电力系统会有不利影响, 如何减弱或抑制随机因素对电网的影响是关键所在。因此, 有必要在系统中加入适当的控制器, 以提高系统状态在允许波动域内的概率。而控制器的设计依赖于对系统方程的分析计算。由于电力系统的状态是随

机过程, 其运动方程将转变为随机微分方程, 如果直接从状态变量的角度, 采用数值方法进行分析, 计算量将随着系统阶数的增加而成倍增加, 计算效率很低。浙江大学朱位秋院士提出的随机平均法^[10], 对研究随机激励作用下的电力系统有极大的借鉴意义。根据随机平均法, 可选取电力系统的能量函数作为哈密顿函数, 根据电力系统状态与能量的对应关系, 将系统状态在工程上能够接受的波动域转换为能量的有界波动域^[9], 据此可将高维的运动方程转化为低维的扩散方程, 根据扩散方程研究系统能量停留在域内的概率, 将极大地简化计算。文献[9, 11-12]对此已有了一些研究, 但在这些研究中, 采用的是发电机 2 阶模型, 且没有引入控制变量, 而传统的控制器设计又没有考虑随机因素的影响^[13-14]。针对随机因素影响下受控的电力系统模型, 文献[15-16]进行了一些分析, 但没有涉及控制器的设计。

针对以上问题, 本文基于拟广义哈密顿系统的随机平均法^[10], 选取电力系统的能量函数作为哈密顿函数, 以能量有界波动域为约束, 将随机激励下受控的电力系统机电暂态模型转换为能量平均的伊藤方程。根据非线性系统随机最优控制理论^[17], 选取电力系统能量处于有界波动域内概率最大(即可靠度最大)作为控制目标, 建立动态规划方程, 求解得到最优控制律。为了衡量最优控制律下的有界波动可靠度, 引入条件可靠性函数, 以解析的方法计算最优控制律下系统的可靠度, 并与蒙特卡洛法的结果进行对比, 验证结果的正确性及控制的有效性。

1 简单电力系统的拟广义哈密顿系统方程

1.1 单机无穷大系统的随机微分方程

基于一些近似假设, 发电机采用 3 阶模型, 考虑受控的单机无穷大系统, 在随机激励下, 其机电暂态过程模型为^[14]:

收稿日期: 2017-04-14; 修回日期: 2017-06-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228204)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228204)

$$\begin{cases} d\delta = \omega_N \omega dt \\ d\omega = \frac{1}{M} [P_m - D\omega - a_1 E'_q \sin \delta + a_2 \sin(2\delta) + \xi(t)] dt \\ dE'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (-bE'_q + c \cos \delta + u) dt \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{x'_{d\Sigma}} U_s, \quad a_2 = \frac{x_q - x'_d}{2x_q \Sigma x'_{d\Sigma}} U_s^2 \\ b &= x_{d\Sigma} / x'_{d\Sigma}, \quad c = (x_d - x'_d) U_s / x'_{d\Sigma} \\ u &= E_{fbs} + u_f \\ x_{d\Sigma} &= x_d + x_T + x_L \\ x'_{d\Sigma} &= x'_d + x_T + x_L \\ x_{q\Sigma} &= x_q + x_T + x_L \end{aligned}$$

其中, $\omega_N = 2\pi f$ 为发电机的同步转子角速度, f 为频率; ω 为发电机转子角速度与同步角速度的偏差; δ 为功角; M 为发电机惯性时间常数; P_m 为发电机机械功率; D 为发电机阻尼系数; E'_q 为 q 轴暂态电势; T'_{d0} 为发电机励磁绕组的时间常数; E_{fbs} 为稳态时发电机励磁电压; U_s 为无穷大母线电压; x_d 为 d 轴电抗; x_q 为 q 轴电抗; x'_d 为 d 轴暂态电抗; x_T 为变压器电抗; x_L 为输电线路电抗; $\xi(t)$ 为均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声; u_f 为系统控制变量。上述变量中 t 、 M 、 T'_{d0} 是有名值, 单位为 s; δ 是有名值, 单位为 rad; 其余变量均是标么值。

为了应用随机平均法, 需要将式(1)转换成 Stratonovich 随机微分方程, 其中 $\xi(t)$ 需要用独立的单位强度高斯白噪声 $W(t)$ 表示, 故式(1)可表示为:

$$\begin{cases} d\delta = \omega_N \omega dt \\ d\omega = \frac{1}{M} [P_m - D\omega - a_1 E'_q \sin \delta + a_2 \sin(2\delta)] dt + \frac{\sigma}{M} W(t) dt \\ dE'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (-bE'_q + c \cos \delta + u) dt \end{cases} \quad (2)$$

根据随机动力学相关理论, 式(2)的伊藤型随机微分方程为:

$$\begin{cases} d\delta = \omega_N \omega dt \\ d\omega = \frac{1}{M} [P_m - D\omega - a_1 E'_q \sin \delta + a_2 \sin(2\delta)] dt + \frac{\sigma}{M} dB(t) \\ dE'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (-bE'_q + c \cos \delta + u) dt \end{cases} \quad (3)$$

1.2 单机无穷大系统的拟广义哈密顿系统方程

式(3)所示的伊藤型随机微分方程是一个 3 维的微分方程, 与拟哈密顿系统所要求的系统维数是偶数不同, 这是一个奇数维的系统, 因此, 这是一个拟广义哈密顿系统^[10]。

单机无穷大系统的哈密顿函数, 如式(4)所示。

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{2} M \omega_N \omega^2 + P_m (\delta_s - \delta) + a_1 (E'_{qs} \cos \delta_s - E'_q \cos \delta) + \\ &\quad \frac{1}{2} a_2 [\cos(2\delta) - \cos(2\delta_s)] + \frac{a_1 b}{2c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{fbs} \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, δ_s 为稳态时的发电机功角; E'_{qs} 为稳态时发电机 q 轴暂态电势。

式(4)所示的哈密顿函数由动能、势能和磁性势能构成^[14], 是系统能量的一种表示方式。

根据式(4), 可求得能量 H 对各个状态变量的偏导数:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial \omega} = M \omega_N \omega \\ \frac{\partial H}{\partial \delta} = -P_m + a_1 E'_q \sin \delta - a_2 \sin(2\delta) \\ \frac{\partial H}{\partial E'_q} = -a_1 \cos \delta + \frac{a_1 b}{c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{fbs} \right) \end{cases} \quad (5)$$

由稳态时 $dE'_q = 0$ 可以得出 $bE'_{qs} - c \cos \delta_s = E_{fbs}$, 并将式(5)代入式(3)可得单机无穷大系统的拟广义哈密顿方程:

$$\begin{cases} d\delta = \frac{1}{M} \frac{\partial H}{\partial \omega} dt \\ d\omega = \left(-\frac{1}{M} \frac{\partial H}{\partial \delta} - \frac{D}{M^2 \omega_N} \frac{\partial H}{\partial \omega} \right) dt + \frac{\sigma}{M} dB(t) \\ dE'_q = \left(-\frac{c}{a_1 T'_{d0}} \frac{\partial H}{\partial E'_q} + \frac{1}{T'_{d0}} u_f \right) dt \end{cases} \quad (6)$$

2 拟广义哈密顿系统的随机平均法

对于广义哈密顿系统而言, 其哈密顿函数在平衡点处可能不是极大或极小值, 为了分析系统的稳定性, 会在哈密顿函数上附加适当的函数, 使得新的哈密顿函数在平衡点处取得极大或极小值, 且可用新的函数替代原有的哈密顿函数, 进行系统稳定性判别, 这个附加的函数称为 Casimir 函数^[18]。

不考虑随机激励, 将式(6)写成矩阵形式:

$$\dot{\mathbf{x}}^* = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) u_f \quad (7)$$

$$\mathbf{x}^* = [\delta^* \quad \omega^* \quad E'^{*}_q]^T, \quad \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} = \left[\frac{\partial H}{\partial \delta} \quad \frac{\partial H}{\partial \omega} \quad \frac{\partial H}{\partial E'_q} \right]^T$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} & 0 \\ -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{M^2 \omega_N} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{c}{a_1 T'_{d0}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \left[0 \quad 0 \quad \frac{1}{T'_{d0}} \right]$$

其中, 带 * 的变量为相应变量的导数; $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 为系统结构矩阵, 其秩为 2, 而系统维数为 3 维, 因此该系统存在 $3-2=1$ 个 Casimir 函数^[10]。由于式(4)在平衡点处可取到极值, 无需另外附加函数, 因此上述 Casimir 函数已存在于哈密顿函数中。根据 Casimir 函数的性

质,在上述系统中,Casimir函数对 δ 、 ω 的导数应恒等于0^[18],因此哈密顿函数中只有如下部分满足要求:

$$C = \frac{a_1 b}{2c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{\text{fbs}} \right)^2 \quad (8)$$

显然,该Casimir函数也是系统能量的一部分^[14]。

由式(8)可得:

$$\frac{\partial C}{\partial E'_q} = \frac{a_1 b}{c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{\text{fbs}} \right) \quad (9)$$

如果式(6)中没有随机激励项 $(\sigma/M)dB(t)$,可以根据全微分方程写出:

$$\begin{cases} dH = \frac{\partial H}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial H}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial H}{\partial E'_q} dE'_q \\ dC = \frac{\partial C}{\partial E'_q} dE'_q \end{cases} \quad (10)$$

引入随机激励项之后,需要在式(10)的上一个子式中加入Wong-Zakai修正项,可得:

$$\begin{cases} dH = \frac{\partial H}{\partial \delta} \frac{1}{M} \frac{\partial H}{\partial \omega} dt + \frac{\partial H}{\partial \omega} \left(-\frac{1}{M} \frac{\partial H}{\partial \delta} - \frac{D}{M^2 \omega_N} \frac{\partial H}{\partial \omega} \right) dt + \\ \frac{\partial H}{\partial \omega} \frac{\sigma}{M} dB(t) + \frac{\partial H}{\partial E'_q} \left(-\frac{c}{a_1 T'_{d0}} \frac{\partial H}{\partial E'_q} + \frac{1}{T'_{d0}} u_f \right) dt + \\ \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{M^2} \frac{\partial^2 H}{\partial \omega^2} dt \\ dC = \frac{\partial C}{\partial E'_q} \left(-\frac{c}{a_1 T'_{d0}} \frac{\partial H}{\partial E'_q} + \frac{1}{T'_{d0}} u_f \right) dt \end{cases} \quad (11)$$

将式(5)和式(9)代入式(11),消去等式右边偏导数,整理可得:

$$\begin{cases} dH = \left(-D\omega_N \omega^2 + \frac{\sigma^2 \omega_N}{2M} \right) dt + \sigma \omega_N \omega dB(t) - \\ \frac{c}{a_1 T'_{d0}} \left[-a_1 \cos \delta + \frac{a_1 b}{c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{\text{fbs}} \right) \right]^2 dt + \\ \frac{u_f}{T'_{d0}} \left[-a_1 \cos \delta + \frac{a_1 b}{c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{\text{fbs}} \right) \right] dt \\ dC = -\frac{c}{a_1 T'_{d0}} (-a_1 \cos \delta) \frac{a_1 b}{c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{\text{fbs}} \right) dt - \\ \frac{c}{a_1 T'_{d0}} \left[\frac{a_1 b}{c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{\text{fbs}} \right) \right]^2 dt + \\ \frac{u_f}{T'_{d0}} \frac{a_1 b}{c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{\text{fbs}} \right) dt \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可得系统的能量平均伊藤方程为:

$$\begin{cases} dH = \left(\bar{m}_H(H_\Omega, C_\Omega) + \left\langle \frac{u_f}{T'_{d0}} \frac{\partial H}{\partial E'_q} \right\rangle \right) dt + \\ \sigma_{HH}(H_\Omega, C_\Omega) dB(t) \\ dC = \left(\bar{m}_C(H_\Omega, C_\Omega) + \left\langle \frac{u_f}{T'_{d0}} \frac{\partial C}{\partial E'_q} \right\rangle \right) dt \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \bar{m}_H(H_\Omega, C_\Omega) &= \frac{1}{T(H_\Omega, C_\Omega)} \int_{\Omega} \left\{ \left(-D\omega_N \omega^2 + \frac{\sigma^2 \omega_N}{2M} \right) - \right. \\ &\quad \left. \frac{c}{a_1 T'_{d0}} \left[-a_1 \cos \delta + \frac{a_1 b}{c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{\text{fbs}} \right) \right]^2 \right\} \frac{\partial H}{\partial \omega} d\delta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{m}_C(H_\Omega, C_\Omega) &= \frac{1}{T(H_\Omega, C_\Omega)} \int_{\Omega} \left[-\frac{c}{a_1 T'_{d0}} \times \right. \\ &\quad \left. \left[-a_1 \cos \delta - \frac{a_1 b}{c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{\text{fbs}} \right) \right] \times \right. \\ &\quad \left. \frac{a_1 b}{c} \left(E'_q - \frac{1}{b} E_{\text{fbs}} \right) \right] \frac{\partial H}{\partial \omega} d\delta \end{aligned}$$

$$\sigma_{HH}^2(H_\Omega, C_\Omega) = \frac{1}{T(H_\Omega, C_\Omega)} \int_{\Omega} (\sigma \omega_N \omega)^2 \frac{\partial H}{\partial \omega} d\delta$$

$$\left\langle \frac{u_f}{T'_{d0}} \frac{\partial H}{\partial E'_q} \right\rangle = \frac{1}{T(H_\Omega, C_\Omega)} \int_{\Omega} \frac{u_f}{T'_{d0}} \frac{\partial H}{\partial E'_q} \frac{\partial H}{\partial \omega} d\delta$$

$$\left\langle \frac{u_f}{T'_{d0}} \frac{\partial C}{\partial E'_q} \right\rangle = \frac{1}{T(H_\Omega, C_\Omega)} \int_{\Omega} \frac{u_f}{T'_{d0}} \frac{\partial C}{\partial E'_q} \frac{\partial H}{\partial \omega} d\delta$$

$$T(H_\Omega, C_\Omega) = \int_{\Omega} 1 / \frac{\partial H}{\partial \omega} d\delta$$

$$\Omega = \{ \delta | H(0, \delta, E'_q) < H_\Omega, C(0, \delta, E'_q) < C_\Omega \}$$

积分区域 Ω 为系统能量的有界波动域,鉴于控制律 u_f 尚未确定,暂时无法对式(13)中控制律部分进行平均,将在后文做进一步说明。

3 非线性随机最优控制

由于上述单机无穷大系统考虑了随机激励的影响,在得到系统平均伊藤方程的基础上,该系统的控制问题需要参考随机最优控制理论,该理论主要用于研究扩散过程的Markov控制^[17]。

3.1 性能指标

最优控制的控制目标通常是一个泛函的极大或极小值,这个泛函被称为性能指标^[17]。本文考虑了随机激励的影响,系统的状态变量皆为随机过程,由此得到的系统能量也为随机过程,不适宜再采用确定性分析中使用的性能指标,需要从概率的角度加以分析。

参照电力系统的直接法暂态稳定分析,取系统状态临界轨迹所对应的系统能量为临界能量 H_{cr} ^[19],当系统能量处于域内时,系统的状态也将位于与之相对应的域内。考虑到随机激励的强度一般不至于使得系统失稳,选取工程上能够接受的有界波动域,其能量最大值 H_{max} 为一定比例的临界能量,即 $H_{\text{max}} = kH_{\text{cr}} (0 < k < 1)$,更具有工程意义^[20]。

因此,将性能指标选取为能量停留在有界波动域内的概率,如式(14)所示,最优控制的目标是使得该概率最大。

$$J(u_f) = P\{H(s, u_f) \in [0, H_{\text{max}}], C(s, u_f) \in [0, C_{\text{max}}], t_s < s \leq t_f\} \quad (14)$$

其中, H_{max} 为系统有界波动域能量的最大值; C_{max} 为与 H_{max} 相对应的Casimir函数的最大值; u_f 为控制律, $u_f \in U$ 表示控制约束,其形式取决于控制器; t_s 为控制的开始时刻; t_f 为控制的终止时刻。

3.2 随机动态规划方法

随机最优控制问题有 2 种解决方案:第一种是基于变分法的庞特利雅金极值原理;第二种是基于贝尔曼方程的动态规划法^[17]。本文采用第二种方法。

值函数是用动态规划方法分析最优控制问题的一个工具^[17],由可靠性性能指标式(14)研究以可靠度最大为目标的随机最优控制问题,定义值函数为:

$$V(H_\Omega, C_\Omega, t_s) = \sup_{u \in U} P\{H(s, u_t) \in [0, H_{\max}), C(s, u_t) \in [0, C_{\max}), t_s \leq s \leq t_f | H(t_s, u_t) \in [0, H_{\max}), C(t_s, u_t) \in [0, C_{\max})\} \quad (15)$$

由式(15)可建立相应的动态规划方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t_s} = & -\sup_{u \in U} \left(\frac{1}{2} \sigma_{HH}^2(H_\Omega, C_\Omega) \frac{\partial^2 V}{\partial H^2} + \right. \\ & \left[\overline{m}_H(H_\Omega, C_\Omega) + \left\langle \frac{u_f}{T'_{d0}} \frac{\partial H}{\partial E'_q} \right\rangle \right] \frac{\partial V}{\partial H} + \\ & \left. \left[\overline{m}_C(H_\Omega, C_\Omega) + \left\langle \frac{u_f}{T'_{d0}} \frac{\partial C}{\partial E'_q} \right\rangle \right] \frac{\partial V}{\partial C} \right) \quad (16) \end{aligned}$$

其边界条件为: $V(H_{\max}, C_\Omega, t_s) = 0, V(H_\Omega, C_{\max}, t_s) = 0$; $V(0, C_\Omega, t_s)$ 为有限值, $V(H_\Omega, 0, t_s)$ 为有限值。终值条件为: $V(H_\Omega, C_\Omega, t_f) = 1, H \in [0, H_{\max}), C \in [0, C_{\max})$ 。

若能有合适的控制律使得式(16)等号右边取极大值,该控制律即为最优控制律。

取控制约束束为 $|u_f/T'_{d0}| \leq K$, 当 $|u_f/T'_{d0}| = K$ 且 u_f/T'_{d0} 值的正负性使得 $\frac{u_f}{T'_{d0}} \left(\frac{\partial H}{\partial E'_q} \frac{\partial V}{\partial H} + \frac{\partial C}{\partial E'_q} \frac{\partial V}{\partial C} \right)$ 为正时,式(16)等号右边取极大值,所以最优控制律为:

$$\frac{u_f^*}{T'_{d0}} = K \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial E'_q} \frac{\partial V}{\partial H} + \frac{\partial C}{\partial E'_q} \frac{\partial V}{\partial C} \right) \quad (17)$$

将式(17)代入式(13)取代 u_f , 完成随机平均,即可得到受控系统的平均伊藤方程系数,如式(18)所示。

$$\begin{cases} dH = m_H(H_\Omega, C_\Omega)dt + \sigma_{HH}(H_\Omega, C_\Omega)dB(t) \\ dC = m_C(H_\Omega, C_\Omega)dt \end{cases} \quad (18)$$

$$m_H(H_\Omega, C_\Omega) = \overline{m}_H(H_\Omega, C_\Omega) +$$

$$\frac{1}{T(H_\Omega, C_\Omega)} \int_{\Omega} \frac{u_f^*}{T'_{d0}} \frac{\partial H}{\partial E'_q} / \frac{\partial H}{\partial \omega} d\delta$$

$$m_C(H_\Omega, C_\Omega) = \overline{m}_C(H_\Omega, C_\Omega) +$$

$$\frac{1}{T(H_\Omega, C_\Omega)} \int_{\Omega} \frac{u_f^*}{T'_{d0}} \frac{\partial C}{\partial E'_q} / \frac{\partial H}{\partial \omega} d\delta$$

3.3 条件可靠性函数

为了衡量式(17)所得最优控制律下的系统可靠度,需要计算系统能量停留在域内的概率,因此引入条件可靠性函数,如式(19)所示,它表示系统能量位于域内,且在 $(0, t]$ 内始终位于域内的概率。

$$R(t|H_0, C_0) =$$

$$P\{H(s) \in [0, H_{\max}), C(s) \in [0, C_{\max}), s \in (0, t] | H(0) = H_0 \in [0, H_{\max}), C(0) = C_0 \in [0, C_{\max})\} \quad (19)$$

条件可靠性函数满足后向 Kolmogorov 方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial t} = & m_H(H_0, C_0) \frac{\partial R}{\partial H_0} + m_C(H_0, C_0) \frac{\partial R}{\partial C_0} + \\ & \frac{1}{2} \sigma_{HH}^2(H_0, C_0) \frac{\partial^2 R}{\partial H_0^2} \quad (20) \end{aligned}$$

其边界条件为:

$$R(t|H_{\max}, C_0) = 0, R(t|H_0, C_{\max}) = 0$$

初始条件为:

$$R(0|H_0, C_0) = 1$$

其中, $m_H(H_0, C_0)$ 、 $m_C(H_0, C_0)$ 与 $\sigma_{HH}^2(H_0, C_0)$ 由式(18)中的 $m_H(H_\Omega, C_\Omega)$ 、 $m_C(H_\Omega, C_\Omega)$ 与 $\sigma_{HH}^2(H_\Omega, C_\Omega)$ 取 $H_\Omega = H_0$ 和 $C_\Omega = C_0$ 得到; H_0 和 C_0 分别为能量函数与 Casimir 函数的初值。

引入条件可靠性函数之后,可用解析的方法求得系统有界波动域内概率。

3.4 评价指标

为评价控制策略的优劣,引入以下两评价指标^[21]。

a. 控制效果:

$$k_h = (\sigma_h^u - \sigma_h^c) / \sigma_h^u \quad (21)$$

其中, σ 为标准差; h 为某个动力学量,例如功角、转速等;上标 u 表示未受控制,上标 c 表示受控制。

b. 控制效率:

$$\mu_h = k_h / \sigma_{u^*} \quad (22)$$

其中, σ_{u^*} 为控制律的标准差。

显然,控制效果、控制效率越大,控制策略就越好。

4 仿真算例

单机无穷大系统的参数选取如下: $P_m = 0.9$ p.u., $a_1 = 1.2835$, $a_2 = 0.4170$, $b = 2.9479$, $c = 1.9253$, $M = 7$ s, $T'_{d0} = 8$ s, $D = 4.6889$, $\delta_0 = 1.1999$ rad, $E'_{q0} = 0.9879$ p.u., $f = 60$ Hz, $E_{fbs} = 2.2144$ p.u.。

考虑在系统中加入适当的随机激励,以风电带来的不确定性为例,风电有功功率的波动应在总装机容量的 1/3 以内^[22-23],由于本文采用高斯白噪声表示系统中的随机激励,根据其性质,随机激励的幅值大部分落在 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 之中,因此 3σ 应小于稳态功率的 1/3,即 σ 小于稳态功率的 1/9。

取 $\sigma = 0.01$,通过仿真可以发现,此时的随机激励既包含幅值较小的激励,也包含能够使得系统失稳的较大激励,符合电力系统的实际情况。

选取系统的有界波动域的能量边界为 $H_{\max} = 0.070$ p.u.,用 Casimir 函数替换哈密顿函数中的 E'_q ,相对应的系统临界轨迹如图 1 所示,图中 C 为标么值。

由图 1 可得, Casimir 函数的临界值为 $C_{\max} = 0.1870$ p.u.,最大的积分区域为 $\delta \in [0.9347, 1.5555]$ rad。

取单机无穷大系统的稳定平衡点作为初始运行点,则 $H_0 = 0.0551$ p.u., $C_0 = 0.0551$ p.u.,该系统的条件可靠性函数如图 2 所示,图中 R 为标么值。

图 2 中离散点为根据式(1)得出的蒙特卡洛解,

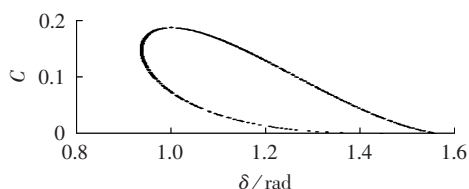


图 1 系统临界轨迹

Fig.1 Critical trajectory of system

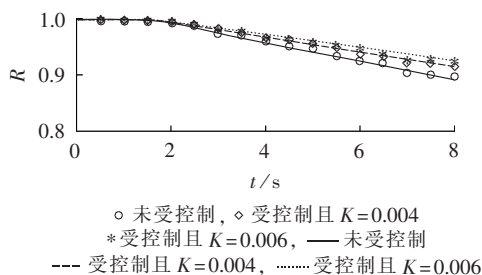


图 2 条件可靠性函数

Fig.2 Conditional reliability function

蒙特卡洛仿真次数 5000 次,步长为 0.01;连续曲线为计算获得的解析解。由图 2 可知:系统条件可靠性函数的解析解与蒙特卡洛解吻合较好;加控制之后,系统能量在有界波动域内的概率增大,提升了系统在有界波动域内的可靠性,尽管随机激励中存在能使系统失稳的较大激励,该控制器仍能有效保证系统能量在有界波动域内的概率;控制约束的边界 K 越大,系统能量在有界波动域内的概率就越高。

在不同的控制约束边界下,由功角计算所得控制效果和控制效率,见图 3。由图 3 可得,随着控制约束边界的增大,控制效果明显增大,控制效率略有降低,但基本一致,说明所加控制是有效的,但如何在控制效果和控制效率之间取得平衡,仍需进一步研究。

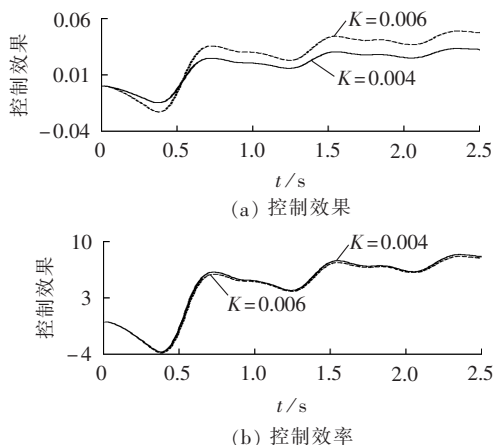


图 3 控制策略的控制效果与控制效率

Fig.3 Control effect and control efficiency

5 结论

本文基于拟广义哈密顿系统的随机平均法,忽略系统结构,建立了随机激励下受控单机无穷大系统的模型,并将其转换为伊藤平均方程。根据随机最

优控制理论,建立了以可靠度最大为目标的动态规划方程,求解得到最优控制律。为了分析控制的效果,引入量化有界波动域内概率的条件可靠性函数,用解析的方法求得解析解,并与蒙特卡洛解进行对比。根据仿真结果,蒙特卡洛解与解析解吻合得较好,加入控制之后,系统的可靠性得到了提高,控制效果明显增大。

本文只考虑了单机无穷大系统,同时随机激励仅考虑了高斯白噪声,后续工作可以进一步研究随机激励下的多机电力系统的控制问题,并结合电力系统的实际情况,考虑更加复杂的随机激励注入。

参考文献:

- [1] 王芮,王杰,弥潇. 计及随机小扰动影响下的多机系统稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):164-170.
WANG Rui,WANG Jie,MI Xiao. Multi-generator system stability analysis considering influence of stochastic small disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):164-170.
- [2] KUMARAN R C,SWARUP K S,VENKATESH T G. Simulation of SMIB power system with stochastic load[C]//2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems(PMAPS). Singapore:IEEE,2010:190-193.
- [3] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述[J]. 电工技术学报,2013,28(10):257-270.
ZHU Xingyang,LIU Wenxia,ZHANG Jianhua,et al. Reviews on power system stochastic load flow and its applications in safety evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013,28(10):257-270.
- [4] 朱星阳,刘文霞,张建华. 考虑大规模风电并网的电力系统随机潮流[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):77-85.
ZHU Xingyang,LIU Wenxia,ZHANG Jianhua. Probabilistic load flow method considering large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(7):77-85.
- [5] 丁明,吴兴龙,陆巍,等. 含多个不对称光伏并网系统的配电网三相随机潮流计算[J]. 电力系统自动化,2012,36(16):47-52.
DING Ming,WU Xinglong,LU Wei,et al. Three-phase probabilistic power flow calculation in distribution systems with multiple unsymmetrical grid-connected photovoltaic systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(16):47-52.
- [6] 王秀丽,张择策,侯雨伸. 基于拟蒙特卡罗模拟法的主动配电网随机潮流计算[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):7-12.
WANG Xiuli,ZHANG Zece,HOU Yushen. Stochastic load flow calculation based on quasi-Monte Carlo method for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2017, 37(3):7-12.
- [7] 许纹碧,王杰. 非线性电力系统随机小干扰稳定性分析[J]. 电网技术,2014,38(10):2735-2740.
XU Wenbi,WANG Jie. Stochastic small disturbance stability analysis of nonlinear power system[J]. Power System Technology, 2014,38(10):2735-2740.
- [8] 刘咏飞,鞠平,薛禹胜,等. 随机激励下电力系统特性的计算分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):137-142.
LIU Yongfei,JU Ping,XUE Yusheng,et al. Calculation analysis on power system characteristics under random excitation[J]. Auto-

- mation of Electric Power Systems, 2014, 38(9):137-142.
- [9] 李洪宇, 鞠平, 陈新琪, 等. 多机电力系统的拟哈密顿系统随机平均法[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(7):766-772.
- LI Hongyu, JU Ping, CHEN Xinqi, et al. Stochastic averaging method for quasi Hamiltonian system of multi-machine power systems[J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(7):766-772.
- [10] 黄志龙, 朱位秋. 拟广义哈密顿系统的随机平均法[C]//第七届全国非线性动力学学术会议和第九届全国非线性振动学术会议论文集. 南京, 中国: 中国振动工程学会, 2004:399-403.
- HUANG Zhilong, ZHU Weiqiu. Stochastic averaging method for quasi generalized hamiltonian systems[C]//The 7th National Symposium on Nonlinear Dynamics and the Proceedings of the 9th National Conference on Nonlinear Vibration. Nanjing, China: Chinese Society for Vibration Engineering, 2004:399-403.
- [11] 周海强, 鞠平, 薛禹胜, 等. 基于拟哈密顿理论的随机电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19):9-14.
- ZHOU Haiqiang, JU Ping, XUE Yusheng, et al. Transient stability analysis of stochastic power system based on quasi-hamiltonian system theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19):9-14.
- [12] 鞠平, 李洪宇, 薛禹胜, 等. 考虑随机激励的电力系统机电暂态过程模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(6):536-541.
- JU Ping, LI Hongyu, XUE Yusheng, et al. Stochastic models for study of electromechanical transient process in power systems[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(6):536-541.
- [13] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008:168-188.
- [14] 孙元章, 焦晓红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007:113-120.
- [15] CHEN Lincong, ZHU Weiqiu. First passage failure of dynamical power systems under random perturbations[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(9):2495-2500.
- [16] CHEN Lincong, ZHU Weiqiu. First passage failure of quasi non-integrable generalized Hamiltonian systems[J]. Archive of Applied Mechanics, 2010, 80(8):883-893.
- [17] 朱位秋. 非线性随机动力学与控制: Hamilton 理论体系框架[M]. 北京: 科学出版社, 2003:370-474.
- [18] 李继彬, 赵晓华, 刘正荣. 广义哈密顿系统理论及其应用[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007:105-113.
- [19] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002:185-190.
- [20] 李洪宇, 鞠平, 余一平, 等. 随机激励下电力系统有界波动域及域内概率解析分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3561-3568.
- LI Hongyu, JU Ping, YU Yiping, et al. Bounded fluctuations region and analytic method of intraregion probability in power system under stochastic excitations[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3561-3568.
- [21] 朱位秋, 应祖光. 拟哈密顿系统非线性随机最优控制[J]. 力学进展, 2013, 43(1):39-55.
- ZHU Weiqiu, YING Zuguang. Advances in research on nonlinear stochastic optimal control of quasi-Hamiltonian systems[J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(1):39-55.
- [22] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29):5029-5040.
- XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5029-5040.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

作者简介:



林 雪

林 雪(1992—), 女, 福建闽侯人, 博士研究生, 主要研究方向为有界波动的最小化控制(E-mail: linxue1992fjjs@163.com);

孙黎霞(1978—), 女, 江苏丹阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统建模与控制(E-mail: lixiasun@163.com);

鞠 平(1962—), 男, 江苏靖江人, 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(E-mail: pju@hhu.edu.cn)。

Control of stochastic power system reliability maximization based on quasi-generalized Hamiltonian system

LIN Xue, SUN Lixia, JU Ping

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The research of power system control affected by the increasing stochastic factors of power system becomes more necessary. The quasi-generalized Hamiltonian system functions of simple stochastic power system with excitation control are built. The stochastic average method of quasi-generalized Hamiltonian system is applied to obtain the average Itô functions of the controlled simple stochastic power system based on the energy functions. According to the Bellman stochastic dynamic programming theory, a dynamic programming equation is established with the maximum reliability of the bounded fluctuation region as its control objective to obtain the optimal control law of system. A conditional reliability function is introduced to measure the reliability of bounded fluctuation region. Analytical method is applied to calculate the system reliability under the optimal control law and it is compared with the result of Monte Carlo method. Simulative results verify the effectiveness of the proposed control method.

Key words: electric power systems; quasi-generalized Hamiltonian system; reliability maximization; bounded fluctuations; Bellman stochastic dynamic programming theory