

基于 Hamilton 能量整形的多机电力系统励磁控制

陆冬良, 张秀彬

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 基于广义 Hamilton 理论, 提出将非线性微分-代数系统表示为一种改进的 Hamilton 系统的实现方法。通过重构结构矩阵, 对所提系统的 Hamilton 函数进行能量整形, 给出了镇定控制器的设计方法。以此为基础, 研究了结构保留多机电力系统的 Hamilton 实现问题, 运用能量整形方法, 提出了可作为系统 Lyapunov 函数的 Hamilton 能量函数, 并设计了可镇定该系统的励磁控制器。仿真结果证明了所提方法和控制策略对提高电力系统暂态稳定的有效性。

关键词: Hamilton 系统; 能量整形; 多机电力系统; 结构保留模型; 励磁控制

Excitation control of multi-machine power systems based on Hamiltonian energy-shaping

LU Dong-liang, ZHANG Xiu-bin

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on generalized Hamiltonian theory, this paper proposes the realization method of expressing the nonlinear differential-algebraic system as an improved Hamiltonian system. The total energy of the Hamiltonian function of the presented system is shaped via reconfiguration of structure matrixes, and the design method of stabilizing controller is given. Based on the above, the Hamiltonian realization for structure preserving multi-machine power systems is studied. The Hamiltonian energy function, which can be used as a system Lyapunov function, is presented via the approach of energy shaping. Furthermore, nonlinear excitation controller is designed, which can stabilize the multi-machine power systems. The simulation results verify that the proposed method and control strategy are effective in enhancing transient stability of the system.

Key words: Hamilton system; energy-shaping; multi-machine power systems; structure preserving model; excitation control

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0045-06

0 引言

电力系统是庞大而复杂的非线性动态系统, 其稳定性日益重要。在电力系统稳定控制领域, 发电机励磁控制已成为改善系统稳定性最有效且经济的手段之一^[1]。非线性系统理论在电力系统励磁控制中已得到广泛应用, 如基于微分几何理论的非线性系统反馈精确线性化方法、直接反馈线性化方法。但这些方法本质上是將非线性控制系统转换为线性控制系统, 运用线性控制系统的设计方法来设计励磁控制器^[2-4]。

随着非线性微分-代数系统(NDAS)的Hamilton实现不断得到深入研究^[5-6], 将Hamilton系统理论应用于电力系统励磁控制中的相关研究成果不断涌现^[7-10]。文献[7-8]研究了单机无穷大系统的Hamilton实现, 通过无源控制(PBC)方法设计了励磁控制器。文献[9]研究了多机电力系统微分-代数模型的常规

Hamilton实现, 直接给出了励磁控制器。文献[10]提出了发电机内电势为恒值情况下的多机电力系统Hamilton实现, 通过注入计及内电势动态分量部分的能量, 以修改Hamilton能量函数, 并设计励磁控制器。能量整形方法是有目的的对系统能量函数进行修改, 以实现系统的镇定控制^[11-13]。因此, 先要建立可作为系统Lyapunov函数的能量函数, 而基于能量的Lyapunov函数多源于非线性系统完成Hamilton实现后的Hamilton函数^[14]。

本文针对NDAS的Hamilton实现问题, 提出一种改进的Hamilton系统, 并通过重构系统结构矩阵, 对所提Hamilton函数进行能量整形, 给出了镇定控制器的设计方法。以此为基础, 将能量整形方法应用于具有结构保留模型的多机电力系统非线性励磁控制器设计。此处重构多机电力系统的结构矩阵, 实质是增强发电机的机电耦合, 为机电能量转化更有效地提供阻尼, 提高电力系统稳定; 同时以此构

造的闭环Hamilton函数极小点和系统平衡点保持一致，可直接作为系统的Lyapunov函数并据此设计镇定控制律。最后给出了仿真结果，验证了所提方法的正确性，及对提高电力系统暂态稳定的有效性。

1 非线性微分-代数系统的 Hamilton 实现及能量整形方法

考虑如下 NDAS:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{u} \\ 0 = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbf{R}^n$ 是状态向量, $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_l)^T \in \mathbf{R}^l$ 是代数向量, $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T \in \mathbf{R}^m$ 是输入向量; $\mathbf{f}: \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^l \rightarrow \mathbf{R}^n$ 、 $\mathbf{G}: \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^l \rightarrow \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^m$ 、 $\boldsymbol{\sigma}: \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^l \rightarrow \mathbf{R}^l$ 均为充分光滑函数。

为便于讨论, 作如下假设:

假设1: \mathbf{f} 、 \mathbf{G} 、 $\boldsymbol{\sigma}$ 在某开连通集 $\Omega \in \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}^l$ 上是充分光滑函数, 且系统在 Ω 上是指数为 1 的, 即 $\text{rank}(\partial_z \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z})) = l$, 其中 $\partial_z \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \partial \boldsymbol{\sigma} / \partial \mathbf{z}$, $\forall (\mathbf{x}, \mathbf{z}) \in \Omega$ 。

假设2: 系统匹配初始条件为 $(\mathbf{x}_0, \mathbf{z}_0)$, 且满足 $0 = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}_0, \mathbf{z}_0)$; 系统存在孤立平衡点 $(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*) \in \Omega$, 且满足 $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*) = 0$, $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*) = 0$ 。

定义 1: 存在连续可微函数 $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 、矩阵函数 $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = [a_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{z})]_{l \times l}$ 、 $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = [b_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{z})]_{l \times m}$ 、 $n \times n$ 反对称阵 $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 、 $n \times n$ 对称半正定阵 $\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 在开连通集 Ω 使系统式 (1) 可表示为式 (2):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{J} - \mathbf{R})\partial_x H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{u} \\ \partial_z H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{A}\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{B}\mathbf{G}^T(\mathbf{x}, \mathbf{z})\partial_x H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \\ 0 = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\partial_x H = (\partial_{x_1} H, \dots, \partial_{x_n} H)^T$, $\partial_z H = (\partial_{z_1} H, \dots, \partial_{z_l} H)^T$, 则称系统式 (2) 为 NDAS 的广义受控 Hamilton 实现, 称 $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 为 Hamilton 函数。

通常, NDAS 完成常规的 Hamilton 实现后, 所构建的 Hamilton 函数极小点和期望镇定的平衡点不一致, 不能直接作为系统的 Lyapunov 函数, 这就需要对能量函数进行修改整形。

基于能量整形方法的 Hamilton 系统重构问题如定义 2 所述。

定义 2: 存在连续可微函数 $H_a(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 、矩阵函数 $\mathbf{A}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = [a_{dij}(\mathbf{x}, \mathbf{z})]_{l \times l}$ 、 $\mathbf{B}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = [b_{dij}(\mathbf{x}, \mathbf{z})]_{l \times m}$ 、 $n \times n$ 反对称阵 $\mathbf{J}_a(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 、 $n \times n$ 对称半正定阵 $\mathbf{R}_a(\mathbf{x}, \mathbf{z})$, 在开连通集 Ω 使 Hamilton 系统保留原结构: $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + H_a(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 、 $\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 、

$\mathbf{R}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{R}_a(\mathbf{x}, \mathbf{z})$, 可由控制器 $\mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 使系统式 (2) 重构如式 (3)。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{J}_d - \mathbf{R}_d)\partial_x H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{v} \\ \partial_z H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{A}_d\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{B}_d\mathbf{G}^T(\mathbf{x}, \mathbf{z})\partial_x H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \\ 0 = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \end{cases} \quad (3)$$

则系统式 (3) 仍为 NDAS 的一个 Hamilton 实现, 称 $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 为经能量整形后的 Hamilton 函数。

定理 1: 存在 $H_a(\mathbf{x}, \mathbf{z})$, 使定义 2 中 Hamilton 函数 $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 在系统平衡点 $(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)$ 有极小值, 则使系统在平衡点 $(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)$ 处稳定的闭环镇定控制器为 $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{a}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$, 具体如下:

$$\mathbf{a}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \left[\mathbf{G}^T(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \right]^{-1} \mathbf{G}^T(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \left\{ \left[\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \right] \partial_x H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) - \left[\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) - \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \right] \partial_x H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \right\} \quad (4)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = -\mathbf{B}_d^{-1}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\dot{\mathbf{z}} \quad (5)$$

如 $\{(x, z) \in \Omega \mid \partial_x^T H_d(x, z) \mathbf{R}_d(x, z) \partial_x H_d(x, z) = 0, \boldsymbol{\sigma}(x, z) = 0\}$ 的最大不变集仅包含平衡点 $\{(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)\}$, 则系统在平衡点 $(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)$ 处渐进稳定, 且 $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 为 NDAS 的一个 Lyapunov 函数。

证明: 综合方程式 (2) 和式 (3) 可得式 (6)。

$$\begin{aligned} & \left[\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \right] \partial_x H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \\ & - \left[\mathbf{J}_a(\mathbf{x}, \mathbf{z}) - \mathbf{R}_a(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \right] \partial_x H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{a}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \end{aligned} \quad (6)$$

进而可得 $\mathbf{a}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 表达式 (4), 结合式 (5) 对 $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 沿系统 (3) 轨迹求导可得:

$$\dot{H}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = -\partial_x^T H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \partial_x H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \leq 0 \quad (7)$$

由 $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \Big|_{(x, z) = (x^*, z^*)} > 0$, 根据 Lyapunov 稳定性定义, $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 是系统的一个 Lyapunov 函数, 且系统在平衡点 $(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)$ 处稳定。

又 $\{(x, z) \in \Omega \mid \dot{H}_d(x, z) = 0, \boldsymbol{\sigma}(x, z) = 0\}$ 的最大不变集仅包含平衡点 $\{(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)\}$, 根据 LaSalle 不变集原理, 系统渐近稳定^[15]。

2 多机电力系统的 Hamilton 能量整形及非线性励磁控制

2.1 电力系统结构保留模型

考虑由 Tsolas 等人提出的电力系统结构保留模型^[16]: 该系统共有 $n+m+1$ 个节点, 其中发电机节点为 $1 \sim n$, 设第 $n+1$ 个节点为平衡节点, 负荷节点为 $n+2 \sim n+m+1$; 设节点端电压为 $V_i \angle \theta_i$, 平衡节点电压为 $1 \angle 0$, 发电机内电压 E_i' 由其 q 轴分量 $E_{qi}' \angle \delta_i$ 表示; 负荷节点有功功率为 P_i^d , 且为恒功率

负载, 无功功率为 Q_i^d ; 不考虑系统转移电导, 系
统节点导纳矩阵为 $\mathbf{Y}=[Y_{ij}]=[jB_{ij}], i \neq i+1$ 。

第 $i (i=1, \dots, n)$ 台发电机模型:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{M_i} (P_i^m - P_i^e) - \frac{D_i}{M_i} (\omega_i - \omega_0) \\ \dot{E}'_{qi} = -\frac{x_{di}}{x'_{di} T'_{d0i}} E'_{qi} + \frac{x_{di} - x'_{di}}{x'_{di} T'_{d0i}} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + \frac{E_{fi}}{T'_{d0i}} \end{cases} \quad (8)$$

其中: $P_i^e = \frac{x'_{di} - x_{qi}}{2x_{qi} x'_{di}} V_i^2 \sin 2(\delta_i - \theta_i) + \frac{E'_{qi}}{x'_{di}} V_i \sin(\delta_i - \theta_i)$;

ω_i 为发电机角速度; $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为同步转速; x_{di} 和 x_{qi} 分别为发电机纵轴同步电抗和横轴同步电抗; x'_{di} 为纵轴暂态电抗; T'_{d0i} 为纵轴开路时间常数; M_i 为发电机惯性时间常数; D_i 为阻尼系数; 机械功率 P_i^m 设为常数; E_{fi} 为与励磁电压成正比的发电机同步电抗后的电势。

系统满足功率平衡, 在第 $i (i=1, \dots, n)$ 个发电机节点, 有 $P_i^d = Q_i^d = 0$, 且有有功功率、无功功率平衡方程为式 (9)、(10)。

$$0 = g_i = -\frac{x'_{di} - x_{qi}}{2x'_{di} x_{qi}} V_i^2 \sin 2(\delta_i - \theta_i) - \frac{E'_{qi}}{x'_{di}} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + \sum_{j=1}^{n+m+1} V_i V_j B_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (9)$$

$$0 = h_i = V_i^{-1} \left[\frac{x'_{di} + x_{qi}}{2x'_{di} x_{qi}} V_i^2 - \frac{E'_{qi}}{x'_{di}} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - \frac{x'_{di} - x_{qi}}{2x'_{di} x_{qi}} V_i^2 \cos 2(\delta_i - \theta_i) - \sum_{j=1}^{n+m+1} V_i V_j B_{ij} \cos \theta_{ij} \right] \quad (10)$$

其中, $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 。

在第 $i (i=n+2, \dots, n+m+1)$ 个负荷节点, 有功功率、无功功率平衡方程为式 (11)、(12):

$$0 = g_i = \sum_{j=1}^{n+m+1} V_i V_j B_{ij} \sin \theta_{ij} - P_i^d \quad (11)$$

$$0 = h_i = V_i^{-1} \left(-\sum_{j=1}^{n+m+1} V_i V_j B_{ij} \cos \theta_{ij} - Q_i^d \right) \quad (12)$$

将式 (8) ~ (12) 以向量形式表示为式 (13)。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{M} (P^m - P^e) - \frac{D}{M} (\omega - \omega_0) \\ \dot{E}'_q = -\frac{x_d}{x'_d T'_{d0}} E'_q + \frac{x_d - x'_d}{x'_d T'_{d0}} V \cos(\delta - \theta) + \frac{E_f}{T'_{d0}} \\ 0 = g(\delta, E'_q, \theta, V) \\ 0 = h(\delta, E'_q, \theta, V) \end{cases} \quad (13)$$

2.2 多机电力系统 Hamilton 实现及能量函数整形

将式 (13) 所表示的结构保留多机电力系统以微分-代数方程形式表示为式 (14)。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \mathbf{u} \\ 0 = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\mathbf{x} = (\delta, \omega, E'_q)$ $\mathbf{x}_i = (\delta_i, \omega_i, E'_{qi})^T$; $\mathbf{z} = (\theta, V)$, $\mathbf{z}_i = (\theta_i, V_i)^T$; $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$, $f_i = (f_{i1}, f_{i2}, f_{i3})^T$ 为方程 (8) 右端对应表达式; $\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \text{diag}\{\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_n\}$, $\mathbf{G}_i = (0, 0, 1)^T$; $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = (\sigma_1, \dots, \sigma_n, \sigma_{n+2}, \dots, \sigma_{n+m+1})^T$, $\sigma_i = (g_i, h_i)^T$; $\mathbf{u}_i = E_{fi} / T'_{d0i}$ 。

根据定义1, 提出如下矩阵:

$$\mathbf{J} = (\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2, \dots, \mathbf{J}_n)^T, \quad \text{其中 } \mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 / M_i & 0 \\ -\omega_0 / M_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R} = (\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n)^T, \quad \text{其中 } \mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_0 D_i / M_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & x_{di} - x'_{di} / T'_{d0i} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{I}_{n+m}; \quad \mathbf{B} = \mathbf{0}.$$

考虑如下 Hamilton 函数:

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = & \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{2\omega_0} (\omega_i - \omega_0)^2 - \sum_{i=1}^n P_i^m (\delta_i - \delta_i^*) - \\ & \sum_{i=1, i \neq n+1}^{n+m+1} P_i^d (\theta_i - \theta_i^*) - \sum_{i=1, i \neq n+1}^{n+m+1} Q_i^d (\ln V_i - \ln V_i^*) - \\ & \sum_{i=1}^n \frac{(x'_{di} - x_{qi})}{4x'_{di} x_{qi}} [V_i^2 \cos 2(\delta_i - \theta_i) - V_i^{*2} \cos 2(\delta_i^* - \theta_i^*)] + \\ & \sum_{i=1}^n \frac{x'_{di} + x_{qi}}{4x'_{di} x_{qi}} (V_i^2 - V_i^{*2}) + \sum_{i=1}^n \frac{x_{di}}{2x'_{di} (x_{di} - x'_{di})} (E'_{qi} - E_{qi}^*)^2 - \\ & \sum_{i=1}^n \frac{E'_{qi}}{x'_{di}} [V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - V_i^* \cos(\delta_i^* - \theta_i^*)] - \\ & \sum_{i=1, i \neq n+1}^{n+m+1} \sum_{j=1}^{n+m+1} [V_i V_j B_{ij} \cos \theta_{ij} - V_i^* V_j^* B_{ij} \cos \theta_{ij}^*] \end{aligned} \quad (15)$$

验证可知, 以上所提矩阵和函数 $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 满足定义 (1), 可见是结构保留多机电力系统式 (14) 的 Hamilton 实现。根据定义2对函数 $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 进行整形, 提出如下矩阵:

$$\mathbf{J}_a(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = (\mathbf{J}_{a1}, \mathbf{J}_{a2}, \dots, \mathbf{J}_{an})^T, \quad \text{其中 } \mathbf{J}_{ai} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j_i \\ 0 & -j_i & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_a = (\mathbf{R}_{a1}, \mathbf{R}_{a2}, \dots, \mathbf{R}_{an})^T, \quad \text{其中 } \mathbf{R}_{ai} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_i \end{bmatrix}.$$

考虑如下函数:

$$\begin{aligned}
H_a(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = & -\sum_{i=1}^n \frac{j_i}{x'_{di}} V_i [\sin(\delta_i - \theta_i) - \sin(\delta_i^* - \theta_i^*)] + \\
& \frac{j_i x_{di}}{x'_{di}(x_{di} - x'_{di})} (E'_{qi} - E''_{qi}) [(\delta_i - \theta_i) - (\delta_i^* - \theta_i^*)] + \\
& \sum_{i=1}^n \frac{j_i^2 x_{di}}{x'_{di}(x_{di} - x'_{di})} \left[\frac{1}{2} (\delta_i - \theta_i) - (\delta_i^* - \theta_i^*) \right] + \\
& \sum_{i=1}^n \cos(\delta_i^* - \theta_i^*) \left\{ \frac{j_i}{x'_{di}} V_i [(\delta_i - \theta_i) - (\delta_i^* - \theta_i^*)] + \right. \\
& \left. \frac{1}{x'_{di}} (E'_{qi} V_i - E''_{qi} V_i - E'_{qi} V_i^* + E''_{qi} V_i^*) \right\} \quad (16)
\end{aligned}$$

其中, $j_i = -\frac{x_{di} - x'_{di}}{x_{di}} V_i^* \sin(\delta_i^* - \theta_i^*)$ 。

经修改后的 Hamilton 系统参数如下:

$$\begin{aligned}
\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = & (\mathbf{J}_{d1}, \mathbf{J}_{d2}, \dots, \mathbf{J}_{dn})^T, \text{ 其中 } \mathbf{J}_{di} = \mathbf{J}_i + \mathbf{J}_{ai}; \\
\mathbf{R}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = & (\mathbf{R}_{d1}, \mathbf{R}_{d2}, \dots, \mathbf{R}_{dn})^T, \text{ 其中 } \mathbf{R}_{di} = \mathbf{R}_i + \mathbf{R}_{ai}; \\
\mathbf{A}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = & \mathbf{I}_{(n+m)};
\end{aligned}$$

$$\mathbf{B}_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{d1}(\mathbf{x}_1, \mathbf{z}_1) & & & \\ & \ddots & & \\ & & \mathbf{B}_{dn}(\mathbf{x}_n, \mathbf{z}_n) & \\ & & & \mathbf{I}_{(n+m) \times n} \end{bmatrix},$$

其中, $\mathbf{B}_{di}(\mathbf{x}_i, \mathbf{z}_i) = [b_{di1} \ b_{di2}]^T \ i=1, \dots, n$ 。

$H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + H_a(\mathbf{x}, \mathbf{z})$, 验证可知, 经整形后的函数 $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 可满足定义2, 仍是系统式(14)的 Hamilton 函数。

2.3 励磁控制器的设计

由 $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 和 $H_a(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 表达式可知, 在平衡点 $(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)$ 处, 有 $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})|_{(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)} = 0$ 、 $\frac{\partial H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}}|_{(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)} = 0$ 、 $\frac{\partial H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}}|_{(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)} = 0$ 。如果 $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 在平衡点有极小值, 则其 Hessian 矩阵在平衡点处大于零, 并由其结构可得, $\text{Hess}(H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z}))|_{(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)} > 0$ 的充要条件如式(17)。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial g}{\partial \delta} & & \\ \frac{\partial h}{\partial \delta} & \mathbf{J}_F & \\ \frac{\partial h}{\partial \delta} & & \end{bmatrix}_{(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)} > 0 \quad (17)$$

其中: $\mathbf{P} = \mathbf{P}^e - \mathbf{P}^m$; \mathbf{J}_F 为系统潮流方程的 Jacobian 矩阵, 矩阵式(17)的正定性可得证^[17]。可见在平衡点 $(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)$ 邻域内, Hamilton 函数 $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 在平衡

点处取极小值。

$$\text{令 } |b_{di1}| \leq \frac{x_{di} - x'_{di}}{x_{di}} V_i^*, \quad |b_{di2}| \leq \frac{x_{di} - x'_{di}}{x_{di}}, \quad |\dot{\theta}_i| \leq \lambda_{\gamma_1},$$

$|\dot{V}_i| \leq \lambda_{\gamma_2}$ 。根据定理1, 可得系统的镇定控制器为 $u_i(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \alpha_i(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + v_i(\mathbf{x}, \mathbf{z})$, 且可使 $H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 作为系统(14)的 Lyapunov 函数, 其中:

$$\begin{aligned}
\alpha_i(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = & -j_i(\omega_i - \omega_0) + \frac{x_{di}}{T'_{d0i} x'_{di}} (E'_{qi} - E''_{qi}) - \\
& \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i} x'_{di}} [V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - V_i^* \cos(\delta_i^* - \theta_i^*)] - \\
& (\gamma_i + \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}}) \frac{\partial H_d}{\partial E'_{qi}} \quad (18)
\end{aligned}$$

$$v_i(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = -\text{sign}\left(\frac{\partial H_d}{\partial E'_{qi}}\right) \frac{x_{di} - x'_{di}}{x_{di}} (\lambda_{\gamma_1} V_i^* + \lambda_{\gamma_2}) \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial H_d(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\partial E'_{qi}} = & \frac{j_i x_{di}}{x'_{di}(x_{di} - x'_{di})} [(\delta_i - \theta_i) - (\delta_i^* - \theta_i^*)] - \\
& \frac{1}{x'_{di}} V_i [\cos(\delta_i - \theta_i) - \cos(\delta_i^* - \theta_i^*)] + \\
& \frac{x_{di}}{x'_{di}(x_{di} - x'_{di})} (E'_{qi} - E''_{qi}) \quad (20)
\end{aligned}$$

由 $u_i = E_{fi} / T'_{d0i}$, 可得第 i 台发电机的励磁控制律为:

$$\begin{aligned}
E_{fi} = & \frac{x_{di}}{x'_{di}} E'_{qi} - \frac{x_{di} - x'_{di}}{x'_{di}} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + \\
& T'_{d0i} \left\{ -j_i(\omega_i - \omega_0) - (\gamma_i + \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}}) \frac{\partial H_d}{\partial E'_{qi}} - \right. \\
& \left. \text{sign}\left(\frac{\partial H_d}{\partial E'_{qi}}\right) \frac{x_{di} - x'_{di}}{x_{di}} (\lambda_{\gamma_1} V_i^* + \lambda_{\gamma_2}) \right\} \quad (21)
\end{aligned}$$

从式(21)可见, 每台发电机的励磁控制器只与本机组的变量和参数有关, 说明控制律具有分散性。对于单机系统而言, 由于发电机只有一台, 控制参数只与本机组节点有关, 能量函数的建立也相对简单。由于文中受控多机系统模型保留了网络结构, 计及网络导纳, 使得能量函数的建立有一定难度; 同时考虑到不同机组之间的控制器参数可能会相互影响, 有必要实现控制参数的分散性, 以便于实现。

3 仿真结果及分析

为验证所提方法和控制策略对提高系统暂态稳定的有效性, 对图1所示的 IEEE 三机九节点系统进行仿真研究, 具体的发电机参数和网络参数详见文献[18]。为了与常规线性控制方法作比较, 相同的故障分两种情况进行动态仿真: ①所有发电机安装常规线性自动电压调节器(AVR)和电力系统稳定器(PSS)^[19], 其模型详见图2, 参数详见表

1。②采用基于 Hamilton 能量整形方法所设计的励磁控制器。

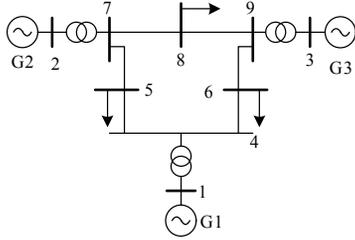


图 1 三机九节点系统

Fig.1 A three-machine nine-bus power system

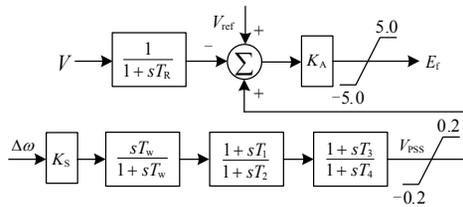


图 2 含 AVR 和 PSS 的励磁系统

Fig.2 Excitation controller with AVR and PSS

表 1 AVR 和 PSS 参数
Tab. 1 Parameters of AVR and PSS

	K_S	T_w	T_1	T_2	T_3	T_4	T_R	K_A
G1	3.5	5	0.71	0.05	0.49	0.05	0.01	200
G2	13.6	5	0.35	0.05	0.35	0.05	0.01	200
G3	2.1	5	1.28	0.05	1.06	0.05	0.01	200

考虑如下两种系统故障情况，故障发生时间为均为 $t = 0.3\text{ s}$ ，仿真结果如图 3~6 所示。

故障 1：一个自清除短路故障发生在节点 7，故障清除时间为 0.1 s ，图 3 和图 4 分别给出了在不同控制方式下发电机的相对功角变化曲线对比图。

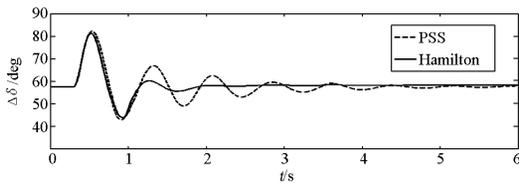


图 3 发电机功角 δ_{21} 响应曲线对比(故障 1)

Fig.3 Response curves of rotor angle δ_{21} (fault 1)

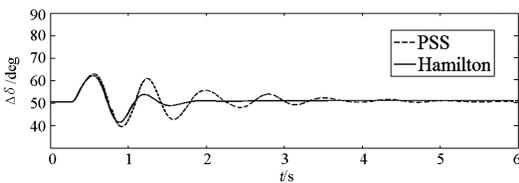


图 4 发电机功角 δ_{31} 响应曲线(故障 1)

Fig.4 Response curves of rotor angle δ_{31} (fault 1)

故障 2：负荷水平提高 25%，一个自清除短路故障发生在节点 4，故障清除时间为 0.15 s ，图 5 和图 6 分别给出了在不同控制方式下发电机的相对功角变化曲线对比图。

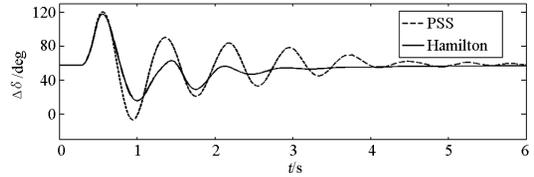


图 5 发电机功角 δ_{21} 响应曲线(故障 2)

Fig.5 Response curves of rotor angle δ_{21} (fault 2)

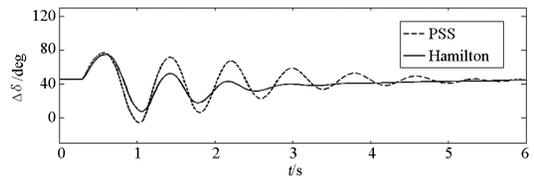


图 6 发电机功角 δ_{31} 响应曲线(故障 2)

Fig.6 Response curves of rotor angle δ_{31} (fault 2)

从以上仿真结果可见，在两种故障情况下，基于 Hamilton 能量整形方法的励磁控制策略，相较于常规的线性励磁控制方法，能使系统具有更好的震荡阻尼性能，并保持系统的暂态稳定。

4 结论

本文以非线性微分-代数系统的 Hamilton 实现及其能量函数整形方法为基础，研究了多机电力系统的非线性励磁控制问题。完成了对具有结构保留模型的多机电力系统的 Hamilton 实现，构造了可作为系统 Lyapunov 函数的 Hamilton 能量函数，并设计了可镇定该系统的励磁控制器。最后给出了仿真结果，仿真结果验证了所提方法的正确性，及相关控制策略对提高电力系统暂态稳定的有效性。

参考文献

- [1] 杨晓静, 赵书强, 马燕峰. 考虑信息结构约束的多机系统励磁控制协调[J]. 继电器, 2006, 34(5): 24-28. YANG Xiao-jing, ZHAO Shu-qiang, MA Yan-feng. Coordination of excitation control with information structure constraint in multi-machine power system[J]. Relay, 2006, 34(5): 24-28.
- [2] Lu Q, Sun Y Z, Xu Z, et al. Decentralized nonlinear optimal excitation control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1957-1962.
- [3] 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.
- [4] 杨大志, 杜正春, 方万良. 多机电力系统变结构励磁

控制器的设计研究[J]. 继电器, 2004, 32(16): 8-11.
 YANG Da-zhi, DU Zheng-chun, FANG Wan-liang. Design and study of variable structure excitation controller for multi-machine power systems[J]. Relay, 2004, 32(16): 8-11.

[5] Ortega R, Schaft A J van der, Mareels I, et al. Putting energy back in control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(2):18-33.

[6] Ortega R, Mareels I. Energy-balancing passivity-based control[C]. //Proceedings of the American Control Conference. Chicago, IL (USA): 2002(2):1265-1270.

[7] Galaz M, Ortega R, Bazanella A S, et al. An energy-shaping approach to the design of excitation control of synchronous generators[J]. Automatica, 2003, 39(1): 111-119.

[8] Shen T L, Mei S W, Sun Y Z, et al. An energy-shaping approach to the design of exciter-governor controller for power systems[C]. //2003 ICCA. Montreal, Canada: 2003:521-524.

[9] Hao Jin, Wang J, Chen C, et al. Nonlinear excitation control of multi-machine power systems with structure preserving models based on Hamilton system theory[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74(3): 401-408.

[10] He B, Zhang X B, Zhao X Y. Transient stabilization of structure preserving power systems with excitation control via energy-shaping[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2007, 29: 822-830.

[11] 孙元章, 彭疆南. 基于 Hamilton 理论的受控电力系统暂态稳定分析方法[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 1-6.
 SUN Yuan-zhang, PENG Jiang-nan. A direct method of transient stability analysis for controlled power systems based on hamilton theory[J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 1-6.

[12] Ortega R, Garcia-Canseco E. Interconnection and damping assignment passivity-based control: towards a constructive procedure-Part I [C]. //Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Nassau, Bahamas: 2004(4): 3412-3417.

[13] 梁志珊, 谢争先, 张化光. 基于能量整形的先进静止无功发生器(ASVG)控制器设计[J]. 继电器, 2007, 35(19): 50-59.
 LIANG Zhi-shan, XIE Zheng-xian, ZHANG Hua-guang. Novel ASVG controller design for stability improvement via energy shaping[J]. Relay, 2007, 35(19): 50-59.

[14] Jeltsema D, Ortega R, Scherpen J M A. An energy-balancing perspective of interconnection and damping assignment control of nonlinear systems[J]. Automatica, 2004, 40: 1643-1646.

[15] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[16] Tsolas N A, Arapostathis A, Varaiya P P. A structure preserving energy function for power system transient stability analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1985, CAS-32 (10): 1041-1049.

[17] Hiskens I A, Hill D J. Energy functions, transient stability and voltage behaviour in power systems with nonlinear loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(4):1525-1533.

[18] Anderson P M, Fouad A A. Power systems control and stability[M]. Ames, IA, U S A: Iowa State University Press, 1977.

[19] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.

收稿日期: 2010-03-02; 修回日期: 2010-04-10
 作者简介:

陆冬良(1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统的稳定与控制、柔性输电; E-mail: doliya@sju.edu.cn
 张秀彬(1946-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统的稳定与控制。

(上接第 44 页 continued from page 44)

[10] Hansen P, Mladenovic N. Variable neighborhood search: principles and applications[J]. Eur J Oper Res, 2001, 130 (3): 449-467.

[11] Hansen P, Mladenovic N, Moreno P J. Variable neighborhood search[J]. Eur J Oper Res, 2008, 191 (3): 593-595.

[12] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitor placement on distributionsystems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4 (1): 72-732.

收稿日期: 2010-03-14; 修回日期: 2010-04-27
 作者简介:

王林川(1955-), 男, 教授, 现从事教学和配电网方面的研究;
 梁峰(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析; E-mail: 86977876@qq.com
 李漫(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析。