

STATCOM 控制的电力系统稳定性分析

孙元章¹, 赵 枚¹, 黎 雄¹, 宋永华², 肖 颖²

(1. 清华大学电机系, 北京 100084; 2. Brunel 大学, 英国)

摘要: 基于哈密顿系统理论, 将含有 STATCOM 的简单电力系统表示为标准的哈密顿系统, 推导了该系统的哈密顿函数, 并证明了所得到的哈密顿函数可作为判断系统稳定性的 Lyapunov 函数。根据该函数, 提出了 STATCOM 控制的电力系统的暂态稳定分析新方法。对含有 STATCOM 控制的简单电力系统的数值仿真结果证实了这一方法的有效性。

关键词: 电力系统; STATCOM; 受控哈密顿系统; 哈密顿函数; 李雅普诺夫函数; 暂态稳定性
中图分类号: TM 712

0 引言

柔性交流输电系统 (flexible AC transmission system, 缩写为 FACTS) 是近几年来兴起的基于现代电力电子技术的新一代电网控制技术^[1]。静止无功发生器 (STATCOM) 是 FACTS 家族中的重要成员之一。近几年来, 美国和日本都已将大容量的 STATCOM 投入实际运行中^[2,3]。然而, 如何更好地利用 STATCOM 的新特性还有待进一步探索。

本文基于受控哈密顿 (Hamiltonian) 系统理论, 分析了 STATCOM 对系统暂态稳定性的影响, 为 STATCOM 的稳定控制提供了一种新的分析方法。对单机无穷大系统的理论计算和数值仿真结果表明了这一分析方法的有效性。

1 受控哈密顿系统的主要结论

传统的哈密顿系统是定义在偶数维流形上的保守力学系统 (流形是将向量空间中曲线和曲面概念推广了的拓扑空间, $\mathbf{R}^m$ 是最简单的 m 维流形^[4])。为了研究包括奇数维系统在内的非线性系统, 我们考虑广义哈密顿系统。广义哈密顿系统的运动方程具有以下结构:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{x} \in M$ (M 是一个流形); $H(\mathbf{x})$ 为系统的哈密顿函数, 代表系统的总能量; $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 是一个反对称矩阵, 即满足 $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x})$ 。

系统的能量平衡方程为:

$$\frac{dH(\mathbf{x})}{dt} = \left[\frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right]^T \mathbf{J}(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = 0 \quad (2)$$

可以看出, $H(\mathbf{x})$ 是系统的一个不变量。这表示一个没有输入和输出的保守系统的系统能量是守恒的。

为了研究一般非线性系统, 提出了带耗散项的受控哈密顿系统模型^[4]。仍然采用哈密顿函数代表系统能量, 系统的运动方程可表示为:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$, 表示系统的控制变量; $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 是一个非负对称阵。

定义 $\mathbf{y}$ 为与 $\mathbf{u}$ 维数相同的系统输出向量:

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (4)$$

则系统的能量平衡方程为:

$$\frac{dH(\mathbf{x})}{dt} = - \left[\frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right]^T \mathbf{R}(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{u}^T \mathbf{y} \quad (5)$$

由于 $\mathbf{R}(\mathbf{x}) \geq \mathbf{0}$, 所以上式中右边第 1 项是非负的, 它代表了系统阻尼元件的能量耗散; 第 2 项表示外部供给系统的能量。由耗散系统理论可知, 这样的系统是一个耗散系统^[5], 即满足:

$$H(\mathbf{x}(t)) - H(\mathbf{x}(0)) \leq \int_0^t S(\mathbf{u}, \mathbf{y}) dt \quad (6)$$

其中 $S(\mathbf{u}, \mathbf{y}) = \mathbf{u}^T \mathbf{y}$, 为系统的能量供给率。

根据李雅普诺夫稳定性判据的定义, 如果 $H(\mathbf{x})$ 在系统运动方程 (式 (3)) 的平衡点 $\mathbf{x}_s$ 处有极小值并满足 $dH(\mathbf{x})/dt \leq 0$, 函数 $H(\mathbf{x})$ 就可以作为系统 (式 (3)) 的一个李雅普诺夫函数。因此, 对于非受控系统, 即 $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ 的系统, 如果 $H(\mathbf{x})$ 在平衡点 $\mathbf{x}_s$ 处有极小值, 则 $\mathbf{x}_s$ 为方程 (7) 的解。

$$[\mathbf{J}(\mathbf{x}_s) - \mathbf{R}(\mathbf{x}_s)] \frac{\partial H(\mathbf{x}_s)}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{0} \quad (7)$$

同时,能量平衡方程可变为:

$$\frac{dH(x)}{dt} = - \left[\frac{\partial H(x)}{\partial x} \right]^T R(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} \quad (8)$$

由于 $R(x) \geq 0$, 所以 $dH(x)/dt \leq 0$ 。由此,系统总的储存能量 $H(x)$ 可以作为研究非受控系统平衡点 x_s 处的李雅普诺夫函数。

对于受控的哈密顿系统,若输入 $u \in \mathbb{R}^m$ 为非零常量,则受控系统的平衡点 x_s 为方程(9)的解。

$$[J(x_s) - R(x_s)] \frac{\partial H(x_s)}{\partial x} + g(x_s)u = 0 \quad (9)$$

这时,受控系统的能量平衡方程为:

$$\frac{dH(x)}{dt} = - \left[\frac{\partial H(x)}{\partial x} \right]^T R(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} + u^T g^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} \quad (10)$$

其中右边第1项表示系统能量的耗散,是由系统阻尼元件引起的;第2项表示外部供给系统的能量。

从式(10)可以看出,系统的能量平衡方程并不能保证是负定的,所以哈密顿函数 $H(x)$ 不能作为研究受控系统在平衡点 x_s 处稳定性的李雅普诺夫函数。必须寻找受控系统稳定性分析的新的方法,从而建立满足李雅普诺夫稳定性判据的哈密顿函数 $H_r(x)$, 即满足:①在 x_s 点, $H_r(x_s)$ 有一局部最小值;② $dH_r(x_s)/dt < 0$ 。

考虑定常输入 $u = \bar{u}$, 哈密顿系统运动方程(式(3))可改写为:

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)\bar{u} \quad (11)$$

且式(11)满足式(9),设 $\bar{x}_s$ 为式(11)的平衡点,如果矩阵 $[J(x) - R(x)]$ 对于所有的 $x \in M$ 都是可逆的,那么定义矩阵 $K(x)$ 为:

$$K(x) = -[J(x) - R(x)]^{-1}g(x) \quad (12)$$

如果矩阵 $K(x)$ 的元素 K_{ij} 对于 $j \in \bar{m} \triangleq \{1, 2, \dots, m\}$ 满足:

$$\frac{\partial K_{ij}}{\partial x_k} = \frac{\partial K_{kj}}{\partial x_i} \quad i, k \in \bar{n} \triangleq \{1, 2, \dots, n\} \quad (13)$$

则存在局部连续函数 $C_1, C_2, \dots, C_m$, 且满足:

$$K_{ij}(x) = \frac{\partial C_j(x)}{\partial x_i} \quad i \in \bar{n}, j \in \bar{m} \quad (14)$$

取函数为:

$$H_r(x) = H(x) - \sum_{j=1}^m \bar{u}_j (C_j(x) + c_j) \quad (15)$$

常数 $c_1, c_2, \dots, c_m$ 决定于系统的初始条件^[6]。

系统动态方程(3)可写成:

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H_r(x)}{\partial x} \quad (16)$$

显然,式(11)的平衡点 $\bar{x}_s$ 为 $H_r(x)$ 的极值点。系统能量平衡方程为:

$$\frac{dH_r(x)}{dt} = - \left[\frac{\partial H_r(x)}{\partial x} \right]^T R(x) \frac{\partial H_r(x)}{\partial x} \leq 0 \quad (17)$$

这样,只要证明 $\bar{x}_s$ 是 $H_r(x)$ 的一个极小值点, $H_r(x)$ 就可以作为分析受控系统(式(11))在平衡点处的李雅普诺夫函数。

2 具有 STATCOM 控制的电力系统数学模型

对具有 STATCOM 控制的单机无穷大系统,其中 STATCOM 安装在发电机内部节点和无穷大母线的电气距离中点处^[7]。具有 STATCOM 控制的单机无穷大系统的等值电路如图1所示。

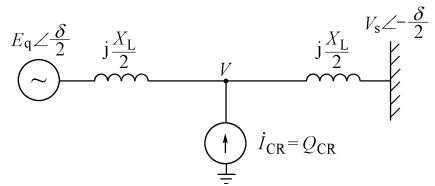


图1 具有 STATCOM 控制的单机无穷大系统的等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of a single-machine infinite bus system with STATCOM as constant current source

如果把 STATCOM 作为一个恒流源,并假设系统中的电压 $E_q = V_s = 1.0$, 则在 STATCOM 处的电压可写为:

$$V = \cos \frac{\delta}{2} + \frac{X_L}{4} Q_{CR} \quad (18)$$

因此,发电机的输出电磁功率可表示为:

$$P_e = \frac{2}{X_L} \left(\cos \frac{\delta}{2} + \frac{X_L}{4} Q_{CR} \right) \sin \frac{\delta}{2} = \frac{1}{X_L} \sin \delta + \frac{1}{2} Q_{CR} \sin \frac{\delta}{2} \quad (19)$$

受控系统的动态方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \omega_r \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{T_J} \left(P_m - D\omega_r - P_M \sin \delta - \frac{1}{2} Q_{CR} \sin \frac{\delta}{2} \right) \end{cases} \quad (20)$$

其中 δ 是转子角,单位为 rad; $\omega_r = \omega - 1$, 是角速度的偏差量(标么值); $\omega_0 = 2\pi f_0$; P_m 是恒定的输入机械功率(标么值); $P_M = 1/X_L$; T_J 是发电机的惯性时间常数,单位为 s; D 是发电机的阻尼衰减系数; Q_{CR} 是 STATCOM 的输出无功,也是系统的控制变量。

如果视下式为系统动能:

$$E = \frac{1}{2} T_J \omega_0 \omega_r^2 = \frac{1}{2} T_J \delta^2 \quad (21)$$

且系统的势能为:

$$P = - \int_{\delta_s}^{\delta} (P_m - P_e(\delta)) d\delta \quad (22)$$

那么,系统的总能量为:

$$H = E + P = \frac{1}{2} T_J \omega_0 \omega_r^2 - \int_{\delta_s}^{\delta} (P_m - P_e(\delta)) d\delta \quad (23)$$

可以看出,

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial \delta} = - (P_m - P_e(\delta)) \\ \frac{\partial H}{\partial \omega_r} = T_J \omega_0 \omega_r \end{cases} \quad (24)$$

那么系统可以表示为受控哈密顿系统的形式:

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)u \quad (25)$$

其中 $x = [\delta, \omega_r]^T$ $u = Q_{CR}$

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H(\delta, \omega_r)}{\partial \delta} \\ \frac{\partial H(\delta, \omega_r)}{\partial \omega_r} \end{bmatrix} \quad J(x) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_J} \\ -\frac{1}{T_J} & 0 \end{bmatrix}$$

$$R(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{\omega_0 T_J^2} \end{bmatrix} \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2T_J} \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}$$

从式(25)可以看出,矩阵 $J(x)$ 为反对称矩阵,它代表系统动能和势能之间的能量转换; $R(x)$ 为对称矩阵,且满足 $R(x) \geq 0$, 它代表系统阻尼项引起的能量耗散。

3 STATCOM 控制电力系统的哈密顿函数

假设 STATCOM 的输出无功是恒定的,即控制 $u = \bar{u}$, 则式(25)可描述为:

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)\bar{u} \quad (26)$$

由于 $[J(x) - R(x)]$ 是可逆的,可以构造矩阵 $K(x)$ 为:

$$K(x) = - [J(x) - R(x)]^{-1} g(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \sin \frac{\delta}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

且 $K(x)$ 满足式(13)的条件。由此可求出满足式(14)的光滑曲线函数 $C(x)$ 为:

$$C(x) = \cos \frac{\delta}{2} + c_0 \quad (28)$$

这里常数 c_0 决定于原系统的初始状态^[6]。通常,在故障后系统的稳定平衡点 $\bar{x}_s = [\bar{\delta}_s, 0]$ 处,有 $C(\bar{x}_s) = 0$ 。因此,

$$c_0 = -\cos \frac{\bar{\delta}_s}{2}$$

这样,可以建立以下的哈密顿函数:

$$H_r(x) = H(x) - \bar{u}(C(x) + c_0) = \frac{1}{2} T_J \omega_0 \omega_r^2 - [P_m(\delta - \bar{\delta}_s) + P_m(\cos \delta - \cos \bar{\delta}_s)] - \bar{u} \left(\cos \frac{\delta}{2} - \cos \frac{\bar{\delta}_s}{2} \right) \quad (29)$$

受控系统(式(26))就可表示为:

$$\dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H_r(x)}{\partial x} \quad (30)$$

其能量平衡方程为:

$$\frac{dH_r(x)}{dt} = - \left[\frac{\partial H_r(x)}{\partial x} \right]^T R(x) \frac{\partial H_r(x)}{\partial x} \quad (31)$$

由于 $R(x) \geq 0$, 所以 $dH_r(x)/dt \leq 0$ 。根据李雅普诺夫稳定性定义,为了使哈密顿函数 $H_r(x)$ 可作为研究具有 STATCOM 的受控电力系统的李雅普诺夫函数,必须确定哈密顿函数 $H_r(x)$ 在故障后平衡点 $\bar{x}_s = [\bar{\delta}_s, 0]$ 是极小值点。

由于

$$\frac{\partial H_r(x)}{\partial x} = \frac{\partial H(x)}{\partial x} - \frac{\partial C(x)}{\partial x} \bar{u} \quad (32)$$

上式两边同时乘以 $[J(x) - R(x)]$, 代入式(28), 则式(32)可表示为:

$$\begin{aligned} [J(x) - R(x)] \frac{\partial H_r(x)}{\partial x} &= \\ [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} - [J(x) - R(x)] \frac{\partial C(x)}{\partial x} \bar{u} &= \\ [J(x) - R(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g(x)\bar{u} & \end{aligned} \quad (33)$$

系统(式(26))的平衡点 $\bar{x}_s = [\bar{\delta}_s, 0]$ 满足:

$$[J(\bar{x}_s) - R(\bar{x}_s)] \frac{\partial H(\bar{x}_s)}{\partial x} + g(\bar{x}_s)\bar{u} = 0 \quad (34)$$

这样,式(33)可写成:

$$[J(\bar{x}_s) - R(\bar{x}_s)] \frac{\partial H_r(\bar{x}_s)}{\partial x} = 0 \quad (35)$$

由于 $[J(x) - R(x)]$ 对于所有 $x \in M$ 都是可逆的,因此,满足 $\partial H_r(\bar{x}_s)/\partial x = 0$, 即对恒定控制下系统稳定平衡点 $\bar{x}_s = [\bar{\delta}_s, 0]$ 是哈密顿函数 $H_r(x)$ 的一个极值点。下面进一步考察稳定平衡点 $\bar{x}_s = [\bar{\delta}_s, 0]$ 是否是函数 $H_r(x)$ 的一个极小值。

由于 $\bar{x}_s = [\bar{\delta}_s, 0]$ 是故障后系统的平衡点,它必须满足以下方程:

$$\begin{cases} P_m - P_m \sin \bar{\delta}_s - \frac{1}{2} \bar{u} \sin \frac{\bar{\delta}_s}{2} = 0 \\ \bar{\omega}_s = 0 \end{cases} \quad (36)$$

计算 $H_r(x)$ 的 Hessian 矩阵,得到:

$$H_{\text{ESS}}(\bar{x}_s) = \begin{bmatrix} P_M \cos \bar{\delta}_s + \frac{\bar{u}}{4} \cos \frac{\bar{\delta}_s}{2} & 0 \\ 0 & T_J \omega_0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

可以看出,当满足式(38)关系时 $H_{\text{ESS}}(\bar{x}_s)$ 是负定的。

$$h(\bar{\delta}_s, \bar{u}) = P_M \cos \bar{\delta}_s + \frac{\bar{u}}{4} \cos \frac{\bar{\delta}_s}{2} > 0 \quad (38)$$

对于含 STATCOM 的故障后系统,式(36)和式(38)的关系如图 2 所示。

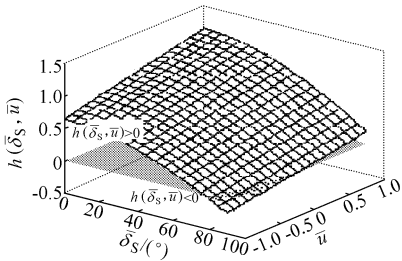


图 2 稳定运行点与 Hessian 矩阵的关系
Fig. 2 Relationship between steady state solution and Hessian matrix

根据以上结论,可以用受控系统的哈密顿函数 $H_r(\delta, \omega_r)$ 来获得具有 STATCOM 控制系统的稳定性判据。故障后受控系统要保持其稳定性必须使故障切除时刻的系统储存能量小于临界能量,即满足下面的稳定条件:

$$H_r(\delta_c, \omega_{rc}) < H_r(\bar{\delta}_u, 0) \quad (39)$$

其中 δ_c 和 ω_{rc} 分别表示故障切除时刻的转子角和转子角速度的偏差量; $H_r(\delta_c, \omega_{rc})$ 代表故障切除时刻的系统储存能量; $\bar{\delta}_u$ 表示故障切除后受控电力系统的不稳定平衡点, $\bar{\delta}_u = \pi - \bar{\delta}_s$; $H_r(\bar{\delta}_u, 0)$ 代表故障后系统的临界能量。

4 仿真分析

所研究的系统如图 1 所示,其中 $P_m = 0.9$, $T_J = 7.0$ s, $X_L = 1.0$ 。仿真中考虑 2 种干扰方式:第 1 种是假设 1.0 s 在 STATCOM 的安装点处发生三相短路,1.1 s 时故障消失,系统恢复到原来的运行状态;第 2 种干扰方式是 1.0 s 在线路中点发生永久性故障,1.12 s 切除故障线路,故障后的传输阻抗 X_L 增至 1.5。利用哈密顿系统表示的暂态稳定准则 $H_r(\delta_c, \omega_{rc}) < H_r(\bar{\delta}_u, 0)$,对于不同的无功控制 $\bar{u} = Q_{CR}$,表 1 给出了第 1 种干扰方式下部分哈密顿函数的理论计算结果和通过仿真分析程序得到的时域稳定性仿真结果,仿真曲线如图 3 所示。

表 1 瞬时故障的暂态仿真结果
Table 1 Transient simulation results for instantaneous fault

$\bar{u}$	$H_r(\delta_c, \omega_{rc})$	$H_r(\bar{\delta}_u, 0)$	仿真结果
0.00	0.224 0	0.059 9	不稳定
0.30	0.192 9	0.177 7	不稳定
0.33	0.190 2	0.191 7	稳定
0.40	0.184 1	0.225 9	稳定
0.50	0.175 9	0.278 1	稳定

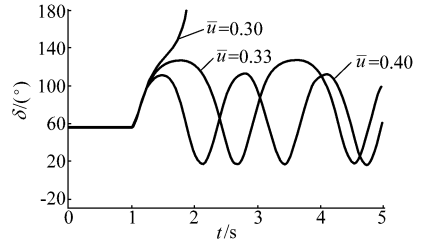


图 3 转子角摇摆曲线(第 1 种干扰方式)
Fig. 3 Rotor angle swing curves (disturbance I)

从表 1 和图 3 可以看出,当无功控制 $\bar{u} \leq 0.30$ 时,系统无法满足基于哈密顿函数的稳定性准则 $H_r(\delta_c, \omega_{rc}) < H_r(\bar{\delta}_u, 0)$,相应的仿真结果表明,这时的系统无法保持稳定。当无功控制 $\bar{u} \geq 0.33$ 时,满足 $H_r(\delta_c, \omega_{rc}) < H_r(\bar{\delta}_u, 0)$,因此系统是稳定的。

表 2 给出了第 2 种扰动方式下哈密顿函数的理论计算结果和通过仿真分析程序得到的时域稳定性仿真结果,仿真曲线见图 4。

表 2 永久性故障的暂态仿真结果
Table 2 Transient simulation results for a permanent fault

$\bar{u}$	$H_r(\delta_c, \omega_{rc})$	$H_r(\bar{\delta}_u, 0)$	仿真结果
0.00	0.146 8	0.040 0	不稳定
0.20	0.127 0	0.118 5	不稳定
0.22	0.125 3	0.127 8	稳定
0.30	0.119 0	0.167 7	稳定
0.50	0.105 5	0.283 3	稳定
0.60	0.099 7	0.348 9	稳定

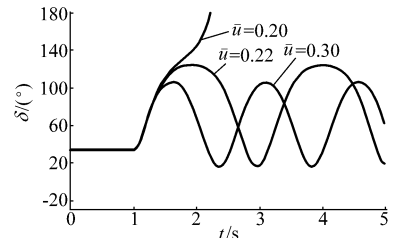


图 4 转子角摇摆曲线(第 2 种干扰方式)
Fig. 4 Rotor angle swing curves (disturbance II)

表 2 和图 4 同样证明了基于哈密顿函数的稳定性准则判断系统暂态稳定性的正确性。

上述的仿真结果证实了基于哈密顿函数的稳定性准则 $H_r(\delta_c, \omega_{rc}) < H_r(\bar{\delta}_u, 0)$ 可正确估计具有 STATCOM 控制的单机无穷大系统的稳定性。

5 结论

本文将具有 STATCOM 控制的电力系统表示为标准的哈密顿系统。根据单机无穷大系统的暂态能量函数,运用哈密顿系统理论,推导了具有 STATCOM 控制的电力系统的哈密顿函数,并证明了该函数可以作为受控系统的李雅普诺夫函数来分析受控电力系统的暂态稳定性。运用这个李雅普诺夫函数,提出了判断系统稳定性的准则,并对具有 STATCOM 的单机无穷大系统进行了不同干扰条件下系统的暂态稳定性分析和仿真计算。结果表明该哈密顿函数可用于准确分析具有 STATCOM 控制的单机无穷大电力系统的暂态稳定性。进一步的研究将推导具有复杂模型的受控系统和多机系统的哈密顿方程,并进行稳定性分析及设计。

参考文献

1 Song Y H, Johns A T. Flexible AC Transmission System. In: IEE Power and Energy Series 30. London: 1999

2 刘文华,姜齐荣,梁旭,等(Liu Wenhua, Jiang Qirong, Liang Xu, et al). ± 20 Mvar STATCOM 的工业现场测试及试运行(Field Test and Operation of ± 20 Mvar STATCOM). 电力系统自动化(Automation of Electric

Power Systems), 2000, 24(23)

3 Schauder C, Gernhardt M, Stacey E, et al. Development of a ± 100 Mvar Static Condenser for Voltage Control of Transmission System. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3)

4 程代展,秦化淑,洪奕光,等(Cheng Daizhan, Qin Huashu Hong Yiguang, et al). 从守恒到开放——广义哈密顿控制系统的理论和应用(From Conservation to Openness—Theory and Applications of Generalized Controlled Hamiltonian System). 控制理论与应用(Control Theory and Application), 1999, 增刊(Supplement)

5 Van der Schaft A J. L_2 -Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control. London: Springer, 2000

6 Maschke B M, Ortega R, Van der Schaft A J. Energy-Based Lyapunov Function for Forced System with Dissipation. In: IFAC Congress. Beijing (China): 1999

7 Matsuno K, Nagasawa T, Ohtsuki H, et al. Power System Stability Enhancement by Static VAR System Using Selfcommutated Inverters. TIEE Japan, 1992, 112-B(1): 57~66

孙元章,男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统分析、非线性控制、鲁棒控制、智能控制、FACTS 应用。

赵枚,女,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、非线性控制。

黎雄,男,副教授,研究方向为电力系统分析、非线性控制、鲁棒控制、FACTS 应用。

TRANSIENT STABILITY ANALYSIS FOR POWER SYSTEM WITH STATCOM

Sun Yuanzhang¹, Zhao Mei¹, Li Xiong¹, Song Yonghua², Xiao Ying²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Brunel University, London, UK)

Abstract: Based on the Hamiltonian system theory, a simplified power system with static synchronous compensator (STATCOM) is expressed as a standard Hamiltonian system at first. Then the Hamiltonian function of this system is derived, and it is proved to be a candidate Lyapunov function for stability analysis. So by this function, a novel transient stability analytical method is proposed for the controlled power system with STATCOM. Simulation results of the simplified power system with STATCOM verify the correctness of the proposed method.

This project is supported by National Key Basic Research Special Fund of China (No. G1998020314), National Natural Science Foundation of China (No. 59837270) and National Natural Science Foundation of China for National Outstanding Young Investigators (No. 5982510).

Keywords: power systems; STATCOM; controlled Hamiltonian system; Hamiltonian function; Lyapunov function; transient stability